



FAKULTÄT FÜR INFORMATIK  
DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Dissertation

zum Erlangen des Grades eines Doktors der Naturwissenschaften

# Wirksamkeit von informationellen Triggern untersucht anhand von Energieverbrauchsfeedbacksystemen in Automobilen

von

Matthias Gottlieb, M. Sc. (TUM)

München, 11. Oktober 2018





Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik

Wirksamkeit von informationellen Triggern untersucht anhand von Energieverbrauchsfeedbacksystemen in Automobilen

Matthias Gottlieb

Vollständiger Abdruck der von der promotionsführenden Einrichtung  
Fakultät für Informatik  
der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades  
eines Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)  
genehmigten Dissertation.

Vorsitzende: Prof. Dr. Gudrun Klinker

Prüfende/-r der Dissertation:

1. Prof. Dr. Helmut Krcmar
2. Prof. Dr.-Ing. Jörg Ott

Die Dissertation wurde am 11.10.2018 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Informatik am 26.02.2019 angenommen.



## **Zusammenfassung**

In dieser Arbeit weisen die Ergebnisse eines 2 x 3 faktoriellen Fahrsimulatorexperimentes überraschend zwischen den Energieverbrauchsfeedbacksystemen (visuell, visuell-haptisch und haptisch) keine signifikanten Differenzen im Energieverbrauch auf. Außerdem zeigen die Ergebnisse in zwei gegensätzlichen Fahrszenarien, dass Menschen, welche motiviert sind energieeffizient zu fahren, relativ gesehen energieeffizienter fahren als nicht-motivierte Menschen. Zusätzlich untermauern die Ergebnisse, dass das Fahrszenario selbst einen stärkeren Einfluss auf das menschliche Handeln hat als das Feedbacksystem. Des Weiteren belegt die Auswertung, dass je höher die Anzahl an gefahrenen Kilometern, umso geringer die Nutzung von Energieverbrauchsfeedbacksystemen.

**Abstract**

In this paper, the results of a 2 x 3 factorial driving simulator experiment surprisingly illustrate no significant differences in energy consumption between the energy consumption feedback systems (visual, visual-tactile and haptic). In addition, the results in two contrasting driving scenarios expose that people who are motivated to drive energy-efficient are relatively more energy efficient than non-motivated people. In addition, the results support that the driving scenario itself has a greater impact on human action than the feedback system. Furthermore, the evaluation presents that the higher the number of driven kilometers, the lower the use of energy consumption feedback systems.

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	x
Tabellenverzeichnis.....	xii
Abkürzungsverzeichnis .....	xiii
Danksagung .....	xv
1 Einleitung .....	1
1.1 Motivation .....	1
1.2 Ziel und Gegenstand.....	3
1.3 Forschungsleitende Fragestellungen .....	3
1.4 Aufbau und Ablauf der Arbeit.....	4
2 Grundlagen .....	6
2.1 Forschungsmethoden.....	6
2.1.1 Literaturrecherche .....	6
2.1.2 Experimentdesign: Skizzierung.....	7
2.1.2.1 Definition des Untersuchungsobjektes.....	7
2.1.2.2 Auswahl des Experimentdesigns.....	8
2.1.2.3 Prozedur und Modell für Datengenerierung und -analyse .....	8
2.1.2.4 Datenanalyse und Interpretation der Ergebnisse .....	9
2.2 Begrifflichkeiten.....	10
2.2.1 Energieverbrauchsanzeige.....	10
2.2.2 Energiebewusstsein .....	11
2.2.2.1 Allgemein .....	11
2.2.2.2 Energiebewusstsein beim Steuern eines Fahrzeuges .....	12
2.2.3 Motivation .....	12
2.2.4 Verhalten .....	17
2.3 Das Forschungsdesign .....	18
3 Domänenverständnis .....	19
3.1 Kategorien von Energieverbrauchsanzeigen .....	22
3.1.1 Visuell .....	22
3.1.2 Haptisch.....	23
3.1.3 Akustisch.....	24
3.1.4 Multimodal .....	25
3.2 Feedbackarten.....	25
3.3 Das Feedback beeinflussende Komponenten .....	26
3.4 Ergebnisse der Literatursuche .....	27
3.4.1 Visuell .....	27
3.4.2 Haptisch.....	39
3.4.3 Akustisch.....	41
3.4.4 Multimodal .....	42
3.5 Diskussion und Zusammenfassung .....	46
3.6 Forschungslücken.....	49
4 Planung des Fahrsimulatorexperiments .....	52
4.1 Hypothesen.....	52
4.2 Experimentdesign im Detail .....	54
4.2.1 Definition des Untersuchungsobjektes.....	54
4.2.1.1 Feedback.....	54
4.2.1.2 Szenarien .....	55
4.2.1.2.1 Nicht-motivierte Benutzer .....	56
4.2.1.2.2 Motivierte Benutzer.....	57
4.3 Auswahl des Experimentdesigns im Detail.....	57
4.4 Prozedur und Modell für die Datengenerierung und -analyse.....	57

4.5	Datenanalyse und Interpretation der Ergebnisse im Detail .....	59
4.6	Limitationen im Forschungsdesign .....	59
5	Messmodell: Energieverbrauch.....	61
5.1	Messgröße zur Messung von energiebewusstem Autofahren anhand des Energieverbrauchs .....	61
5.1.1	Allgemein .....	62
5.1.2	Energiebewusstes Fahren .....	63
5.2	Methodisches Vorgehen .....	64
5.3	Literaturanalyse zu Energieverbrauchsanzeigen .....	65
5.4	Dimensionen der Messgrößen .....	67
5.4.1	Antizipatives Fahren .....	67
5.4.2	Geschwindigkeitseinhaltung .....	69
5.4.3	Gangschaltung.....	70
5.4.4	Beschleunigung .....	70
5.4.5	Verzögerung .....	72
5.4.6	Motordrehzahl .....	73
5.5	Synthese der Messgrößen .....	74
5.6	Messmodell für energiebewusstes Fahren: Vor- und Nachteile.....	75
5.6.1	Die Dimensionen.....	75
5.6.2	Gangschaltung und Motordrehzahl .....	76
5.6.3	Beschleunigung und Verzögerung .....	77
5.6.4	Energiebewusstes Fahren .....	78
5.7	Validierung .....	79
5.7.1	Aufbau und Fragestellungen des Fragebogens.....	79
5.7.2	Ergebnisse der Experteninterviews .....	80
5.7.2.1	Selbsteinschätzungen der Experten.....	81
5.7.2.2	Konstrukt energiebewusstes Fahren.....	81
5.7.2.3	Betrachtung der Dimensionen und der einzelnen Messgrößen.....	81
5.7.2.4	Komponenten der Dimension Beschleunigung.....	82
5.7.2.5	Komponenten der Dimension Verzögerung.....	83
5.7.2.6	Komponenten des Konstruktes energiebewusstes Fahren .....	83
5.7.2.6.1	<i>Messung des Energieverbrauchs des Konstruktes</i> ..... <i>energiebewusstes Fahren</i> .....	83
5.7.2.6.2	<i>Messung des Energieverlustes beim Konstrukt</i> .....	84
5.7.2.6.2	<i>energiebewusstes Fahren</i> .....	84
5.7.2.7	Dimensionen des antizipativen Fahrens.....	84
5.7.2.8	Dimensionen der Motordrehzahl.....	85
5.7.2.9	Modell-Struktur .....	86
5.7.2.10	Weitere Anmerkungen der Experten zum Messmodell .....	87
5.7.3	Die Validierung des Messmodells.....	87
5.7.3.1	Energiebewusstes Fahren .....	87
5.7.3.1.1	Das Konstrukt und dessen Komponenten.....	88
5.7.3.1.2	Einfluss auf den Energieverbrauch.....	89
5.7.3.1.3	Verbindungen zum Energieverlust .....	89
5.7.3.2	Dimensionen der Messgrößen .....	90
5.7.3.2.1	Antizipatives Fahren.....	91
5.7.3.2.2	Motordrehzahl .....	91
5.7.3.2.3	Gangschaltung .....	93
5.7.3.2.4	Beschleunigung .....	94
5.7.3.2.5	Verzögerung .....	95
5.7.3.2.6	Geschwindigkeitseinhaltung.....	96

5.7.3.2.7	Empfehlungen für zusätzliche Dimensionen.....	97
5.7.3.3	Sonstige Anmerkungen zur Validierung des Messmodells.....	99
5.7.4	Synthese der Anregungen zu einem validierten Messmodell .....	99
5.7.5	Zusammenstellung des validierten Messmodells.....	101
5.8	Zusammenfassung.....	102
6	Erhebungsinstrument zur Messung des Energiebewusstseins .....	104
6.1	Methodisches Vorgehen .....	104
6.2	Motivationale Einflussfaktoren .....	107
6.2.1	Motivationstheorien im Vergleich .....	107
6.2.1.1	Instinkttheorien.....	107
6.2.1.2	Triebreduktionstheorie .....	108
6.2.1.3	Erregungstheorie .....	110
6.2.1.4	Inhaltstheorien.....	111
6.2.1.5	Prozesstheorien.....	115
6.2.2	Theorien aus der Wirtschaftsinformatik.....	118
6.2.3	Intrinsische und extrinsische Motivation .....	121
6.2.4	Zusammenfassung.....	121
6.3	Messung von Motivation.....	123
6.3.1	General Causality Orientation Scale .....	124
6.3.2	Fragebogen zur wahrgenommenen Autonomieunterstützung.....	124
6.3.3	Fragebogen zur Selbstregulierung.....	125
6.3.4	Aspirations Index .....	125
6.3.5	Basic Psychological Needs Scales .....	126
6.3.6	Selbstbestimmungsskala.....	126
6.3.7	Subjektive Vitalitätsskala .....	126
6.3.8	Skala der Wahrnehmung von Eltern .....	126
6.3.9	Problem in School/Work Scale .....	126
6.3.10	Theorie des geplanten Verhaltens .....	127
6.3.11	Technologie-Akzeptanz-Modelle.....	127
6.3.12	Motivation Sources Inventory .....	127
6.4	Messung der Bereitschaft zur Nutzung von Energieverbrauchsfeedbacksystemen... ..	128
6.4.1	Erstellung des Erhebungsinstrumentes.....	130
6.4.2	Ergebnisse des Pretests.....	131
6.4.3	Diskussion des Pretests .....	132
6.5	Validierung des Erhebungsinstrumentes: Energiebewusstseinsskala .....	133
6.5.1	Methodisches Vorgehen.....	133
6.5.2	Ergebnisse .....	134
6.6	Diskussion .....	140
6.7	Zusammenfassung.....	143
7	Umsetzung im Fahrsimulator .....	144
7.1	Messmodells zur Messung des Konstruktes energiebewusstes Fahren.....	144
7.2	Messung des Energieverbrauchs .....	146
8	Fahrszene für die Experimente.....	150
8.1	Fahrzyklen und Bewertung zum Testen des Energieverbrauchs.....	150
8.2	Aufbereitung des NEFZ für die Entwicklung einer Fahrszene .....	155
8.2.1	Innerstädtischer Bereich.....	155
8.2.1.1	Städtischer Abschnitt mit 50 km/h.....	156
8.2.1.2	Städtischer Abschnitt mit 30 km/h.....	158
8.2.2	Außerstädtischer Bereich .....	158
8.2.3	Zusammenfassung.....	159
8.3	Validierung der Fahrszene.....	160

8.3.1	Stufe eins .....	160
8.3.2	Stufe zwei .....	160
8.3.2.1	Strecke ohne Autobahn .....	163
8.3.2.2	Strecke mit Autobahn .....	165
8.4	Diskussion der Fahrscenarios .....	168
9	Implementierung der Energieverbrauchsfeedbacksysteme .....	170
9.1	Visuell .....	170
9.2	Haptisch .....	171
10	Fahrsimulatorexperiment: Pretest .....	173
10.1	Feedbacktests .....	173
10.1.1	Visuell .....	174
10.1.2	Haptisch .....	174
10.1.3	Kombination der Feedbackarten .....	175
10.2	Ergebnisse des Pretest .....	175
11	Fahrsimulatorexperiment: Durchführung .....	178
11.1	Grundgesamtheit .....	178
11.2	Fahraufgabe .....	179
11.3	Fahrsimulator .....	179
11.4	Messgrößen und Experimentdesign .....	181
11.5	Durchführung .....	182
12	Fahrsimulatorexperiment: Auswertung .....	184
12.1	Fahrscenarios .....	184
12.1.1	Vergleich der Fahrscenarios „Pendler“ und „Familie“ .....	185
12.1.2	Vergleich der Feedbacksysteme .....	188
12.1.2.1	Fahrscenario „Pendler“ .....	189
12.1.2.2	Fahrscenario „Familie“ .....	189
12.2	Moderatoren .....	190
12.2.1	Alter .....	190
12.2.2	Computerspiele .....	191
12.2.3	Geschlecht .....	191
12.2.4	Fahrerfahrung .....	191
12.2.5	Energiebewusstes Fahren .....	193
12.3	Diskussion .....	196
12.3.1	Fahrscenarios .....	196
12.3.2	Fahrscenario „Pendler“ .....	198
12.3.3	Fahrscenario „Familie“ .....	200
12.3.4	Sonstiges .....	201
12.4	Limitationen .....	202
13	Experiment zur Überprüfung des haptischen Feedbacks .....	204
13.1	Implementierung und Netzwerkinfrastruktur der Versuchsumgebung .....	204
13.2	Definition des Untersuchungsobjektes .....	205
13.3	Experimentdesign .....	207
13.4	Reaktionstest: Experiment .....	207
13.4.1	Durchführung .....	207
13.4.2	Ergebnisse .....	209
13.4.3	Diskussion .....	216
13.4.4	Limitationen .....	218
14	Zusammenfassung und Ausblick .....	220
14.1	Zusammenfassung .....	220
14.2	Relevanz der Ergebnisse und Forschungsbedarf .....	222
	Literaturverzeichnis .....	224

Anhang A Energiebewusstseinskala: Fragebogen.....	253
Anhang B Experiment Umfragen.....	254
B.1 Umfragebogen Demografische Datenerhebung .....	254
B.2 Umfragebogen Energiebewusstsein und Motivation.....	255

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau der Arbeit .....	5
Abbildung 2: Grundmodell der klassischen Motivationspsychologie .....	13
Abbildung 3: Erweitertes kognitives Modell der Motivationspsychologie .....	14
Abbildung 4: Theory of Planned Behavior .....	15
Abbildung 5: Extension of the Extended Model of Goal-Directed Behavior (EMGB).....	15
Abbildung 6: EMGB im Kontext von Autofahren.....	16
Abbildung 7: Kombination Erweiterung EMGB und EMGB mit Kontext Autofahren .....	17
Abbildung 8: Überblick methodisches Vorgehen: Forschungsdesign .....	18
Abbildung 9: Mindmap zur Literatursuche .....	20
Abbildung 10: Nachbildbare gerätefähige kinästhetische und taktile Schnittstellen.....	24
Abbildung 11: Eco-Driving Anzeigen: a) Dot, b) Gauge und c) Foot.....	29
Abbildung 12: Feedbacksystem: a) Beschleunigung und b) Schaltung.....	33
Abbildung 13: Feedbacksysteme: a) einfach (DB-System) vs. b) komplex (EID-System mit verschiedenen Darstellungen).....	34
Abbildung 14: Feedbacksystem im Elektrofahrzeug: a) Saab 9-3, b) nutzerbasiert.....	36
Abbildung 15: Schematische Darstellung der Funktionsweise des Eco Pedals. Gestrichelte Linie: Grenze zum energieeffizienten Fahren, a) energieeffiziente Fahrweise, b) energieineffiziente Fahrweise .....	40
Abbildung 16: Gaspedal mit Widerstand: links – Prototyp, rechts – Umsetzung.....	40
Abbildung 17: Gefundene Publikationen nach Jahren .....	46
Abbildung 18: Verteilung der Feedbackarten .....	47
Abbildung 19: Forschungsmethodik .....	51
Abbildung 20: Forschungsmodell .....	54
Abbildung 21: Beispiel Benzinverbrauch .....	62
Abbildung 22: Messmodell für energiebewusstes Fahren .....	75
Abbildung 23: Messmodell mit validierten Ergebnissen .....	86
Abbildung 24: Beeinflussungskette der Dimensionen nach Experten B .....	92
Abbildung 25: Gruppierung der Dimensionen nach Einschätzung von Experten E.....	93
Abbildung 26: Überarbeitete Aufteilung der Dimension Verzögerung in Komponenten .....	95
Abbildung 27: Überarbeitete Aufteilung der Dimension Verzögerung in Komponenten mit Erweiterung für Elektrofahrzeuge .....	96
Abbildung 28: Expertenvorschlag zur Unterteilung der Geschwindigkeit .....	97
Abbildung 29: Messmodell nach Validierung durch Experten.....	101
Abbildung 30: Validiertes Messmodell.....	102
Abbildung 31: SDT und das Zusammenwirken mit der organismischen Integrationstheorie.	115
Abbildung 32: Historische Entwicklung der Motivationstheorien .....	122
Abbildung 33: Plot der bmep Kurve nach RPM .....	147
Abbildung 34: Leistungsspektrum BMW TwinPower Turbo 4-Zylinder Benzinmotoren ....	148
Abbildung 35: Leistungsspektrum BMEP für Benzinmotoren .....	148
Abbildung 36: Neuer europäischer Fahrzyklus (NEFZ).....	153
Abbildung 37: Städtischer Abschnitt – Start der Fahrscene: Ortseingang.....	156
Abbildung 38: Städtischer Abschnitt – Ampelstatus .....	157
Abbildung 39: Städtischer Abschnitt – 30-km/h-Zone .....	158
Abbildung 40: Außerstädtischer Bereich – 100-km/h-Straße .....	159
Abbildung 41: Modell – Vogelperspektive der Bereichseinteilung mit städtischem und..... außerstädtischem Bereich .....	161
Abbildung 42: Fahrstrecke – Vogelperspektive – Fahrsituationen.....	162
Abbildung 43: Fahrstrecke ohne Autobahn – Übersicht Streckenverlauf.....	163
Abbildung 44: Strecke ohne Autobahn – Gefahrene Geschwindigkeit nach Fahrsituationen .....	164

Abbildung 45: Strecke ohne Autobahn – NEFZ-Abdeckung .....	164
Abbildung 46: Strecke mit Autobahn – Streckenverlauf inkl. Fahrmanöver.....	166
Abbildung 47: Streckenabschnitt mit Autobahn – Geschwindigkeit nach Fahrsituation .....	166
Abbildung 48: Strecken mit Autobahn – NEFZ-Abdeckung.....	167
Abbildung 49: Eco-Driving-Status des visuellen Feedbacksystems.....	170
Abbildung 50: Haptisches Feedbacksystem via Smartwatch LG Urban .....	171
Abbildung 51: Nutzerperspektive: Fahrsimulator: a) Blick nach links, b) Blick nach vorne, c) Blick nach rechts und d) Fahrscene aus Fahrerperspektive.....	180
Abbildung 52: Aufbau der Versuchsumgebung: Fahrsimulator .....	181
Abbildung 53: Vergleich der standardisierten Energieverbräuche je Treatment in..... Abhängigkeit zur Fahrscene .....	188
Abbildung 54: Verwendungshäufigkeit eines Energieverbrauchsfeedbacksystems im..... Vergleich zur Häufigkeit der Nutzung eines Fahrzeugs.....	193
Abbildung 55: Einfluss des Energiebewusstseins auf Energieverbrauch je Fahrscenario.....	194
Abbildung 56: Einfluss der Motivation auf den Energieverbrauch je Fahrscenario.....	195
Abbildung 57: ANOVA Fahrscenario „Pendler“. Unterschiede im normalisierten .....	199
Abbildung 58: ANOVA Fahrscenario „Familie“. Unterschiede im normalisierten .....	200
Abbildung 59: Netzwerkinfrastruktur der Versuchsumgebung .....	205
Abbildung 60: Sequenzdiagramm der Timestamps ( $t_1$ - $t_8$ ) von Latenz-Nachrichten.....	206
Abbildung 61: Forschungsmodell: Reaktionszeit .....	207
Abbildung 62: Vergleich der Mittelwerte der Treatments nach Geschlecht.....	211

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Taxonomie.....	7
Tabelle 2: Abschätzung der Effektgröße und des Stichprobenumfangs .....	10
Tabelle 3: Übersicht der verwendeten Schlüsselwörter .....	20
Tabelle 4: Domänenverständnis: Ergebnis der Literatursuche .....	22
Tabelle 5: Auswertung visuelle Feedbacksysteme.....	39
Tabelle 6: Auswertung haptische Feedbacksysteme .....	41
Tabelle 7: Auswertung akustische Feedbacksysteme .....	42
Tabelle 8: Auswertung multimodale Feedbacksysteme.....	46
Tabelle 9: Übersicht der Literatursuche zu Energieverbrauchsanzeigen .....	64
Tabelle 10: Konzeptmatrix.....	66
Tabelle 11: Durchschnitts- und Varianzwerte der Selbsteinschätzung der Interviewten.....	81
Tabelle 12: Energiebewusstes Fahren beeinflussende Dimensionen und Messgrößen .....	100
Tabelle 13: Taxonomie der Literaturrecherche – Erhebungsinstrument.....	105
Tabelle 14: Details der Literatursuche – Erhebungsinstrument .....	106
Tabelle 15: Motivationsformen und Regulationsebenen der Theorie der organismischen..... Integration sowie die Orientierungen der Theorie der .....	115
Kausalitätsorientierungen .....	115
Tabelle 16: Kategorisierung der Autoren nach intrinsischer und extrinsischer Motivation ..	118
Tabelle 17: Übersicht der Nutzung des Motivation Sources Inventory .....	128
Tabelle 18: Anzahl identifizierter Evaluierungsmethoden.....	129
Tabelle 19: Energiebewusstseinskala .....	139
Tabelle 20: Fahrzyklen im Vergleich.....	154
Tabelle 21: Rankingsystem für die Fehlerbehebung des Fahrsimulators .....	173
Tabelle 22: Ergebnisse des Pretests der Reaktionszeiten .....	209
Tabelle 23: Tests auf Homoskedastizität und Normalverteilung der Reaktionszeit .....	210
Tabelle 24: Deskriptive Statistiken: Reaktionstest.....	211
Tabelle 25: t-Test für Reaktionszeiten: Mittelwert und Median .....	211
Tabelle 26: Maximum Likelihood angepasste Werte für Normal- und .....	212
ExGaussian-Verteilung .....	212
Tabelle 27: Statistik der Paarungen des t-Tests für verbundene Stichproben.....	212
Tabelle 28: Deskriptive Statistiken und Shapiro-Wilk Normalverteilungstest auf die .....	213
transformierten Daten des Reaktionstests .....	213
Tabelle 29: t-Test für verbundene Stichproben der transformierten Reaktionstestdaten.....	213
Tabelle 30: Ergebnisse unabhängiger Stichproben des t-Tests zwischen den Geschlechtern	213
Tabelle 31: Ergebnisse Wilcoxon-Test für Reaktionszeit.....	214
Tabelle 32: Ergebnisse Reaktionstest rANCOVA .....	215
Tabelle 33: Deskriptive Statistik zu den Reaktionszeiten in ms .....	215
Tabelle 34: Test bei unabhängigen Stichproben in ms .....	216
Tabelle 37: Energiebewusstseinskala .....	253

## Abkürzungsverzeichnis

ack	Acknowledgement
ANOVA	Analysis of Variances (deutsch: Varianzanalyse)
AI	Aspirations Index
CACD	Common Artemis Driving Cycles
CAN	Controller Area Network
CHI	Computer Human Interaction
CFA	Confirmatory Factor Analysis (deutsch: konfirmatorische Faktoranalyse)
CI	Confidence Interval (deutsch: Konfidenzintervall)
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
ECD	Energy Consumption Display
EFA	Exploratory Factor Analysis (deutsch: exploratorische Faktoranalyse)
EMGB	Extended Model of Goal-directed Behavior (deutsch: Erweitertes Modell des zielgerichteten Verhaltens)
EPA	Environmental Protection Agency
ERG	Existenz (Existence), Beziehung (Relatedness) und Wachstum (Growth), ERG-Theorie
ExGaussian	Exponentially Modified Gaussian distribution
FCR	Kraftstoffverbrauchsrate (englisch: Fuel Consumption Rate)
GCOS	General Causality Orientation Scale
GFI	Goodness of Fit Index
GPS	Global Positioning System
HCCQ	Health Care Climate Questionnaire
ITR	Informationeller Trigger
KMO	Kaiser-Meyer-Olkin Kriterium
LHV	Brennwert des verwendeten Kraftstoffes (englisch: Lower Heat Value)
M	Mean (deutsch: Mittelwert)
Mdn	Median (deutsch: Median)
MGB	Model of Goal-directed Behavior (deutsch: Modell des zielgerichteten Verhaltens)
MSA	Measure of Sampling Adequacy
MSE	Mean Square Error (deutsch: mittlerer quadratischer Fehler)
MSI	Motivation Sources Inventory
NEDC	New European Driving Cyclus (vgl. NEFZ)
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
P	Leistung
PBC	Wahrgenommene Verhaltenssteuerung (englisch: Perceived Behavioral Control)
PCA	Principal Component Analysis (deutsch: Hauptkomponentenanalyse)
PCS	Perceived Competence Scale
POPS	Perceptions of Parents Scales (deutsch: Skala der Wahrnehmung der Eltern)
RAI	Relatively Autonomy Index
rANCOVA	repeated measures Analysis of Co-Variances

RMSEA	Root Mean Square Error of Approximation (deutsch: mittlere quadratische Fehler der Anpassung)
RPM	Revolutions Per Minute (deutsch: Umdrehungen pro Minute)
RTT	Round Trip Time
SD	Standard Deviation (deutsch: Standardabweichung)
SDT	Self-Determination Theory (deutsch: Selbstbestimmungstheorie)
SE	Standard Error (deutsch: Standardfehler)
SET	Self-Efficacy Theory (deutsch: Selbstwirksamkeitstheorie)
StVO	Straßenverkehrsordnung
SVS	Subjektive Vitalitätsskala (englisch: Subjective-Vitality Scale)
TAM	Technologie-Akzeptanz-Modell (englisch: Technology Acceptance Model)
TAM2	Technologie-Akzeptanz-Modell 2 (englisch: Technology Acceptance Model 2)
TAM3	Technologie-Akzeptanz-Modell 3 (englisch: Technology Acceptance Model 3)
TRA	Theorie des überlegten Handelns (englisch: Theory of Reasoned Action)
TPB	Theorie des geplanten Verhaltens (englisch: Theory of Planned Behavior)
U/min	Siehe RPM
UTAUT	Unified Theory of Acceptance and Use of Technology
UTAUT2	Consumer Acceptance and User of Information Technology be-zeichnet die Erweiterung des Unified Theory of Acceptance and Use of Technology
V	Hubraum

## Danksagung

Mein Dank gilt zunächst meinem Doktorvater, Professor Dr. Helmut Krcmar, für die Betreuung der Arbeit, die Hilfe und vielen Ideen, welche mir auch eine kritische Sichtweise auf das Thema gaben. Die ertragreichen Gespräche und die begleitende Wanderung beim Anfertigen der Dissertation werden mir in guter Erinnerung bleiben.

Prof. Dr.-Ing. Jörg Ott danke ich für die wissenschaftliche Betreuung als Zweitgutachter.

Außerdem danke ich Prof. Dr. Michael Schermann und Dr. Markus Böhm, meinen Cluster-Leitern für die fruchtbaren Diskussionen. Prof. Dr. Gudrun Klinker und Prof. Dr. Johann Schlichter für das stets offene Ohr und Anregungen. Prof. Dr. Tobias Engel, Robert Heininger und Dr. Nina Röder für ihre Ermunterung und Motivation sowie Christoph Rommerskirchen für den kritischen Diskurs und Unterstützung von Seiten des Lehrstuhls für Ergonomie. Danken möchte ich allen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Wirtschaftsinformatik für das Feedback, die Anregungen, die Denkanstöße und dergleichen mehr.

Mein Dank gilt den zahlreichen, betreuten Studierenden, die unter anderem im Hintergrund den benötigten Fahrsimulator hegten, pflegten und weiterentwickelten. Diese sind Mateusz Burek, Christoph Eifert, Fabian Ewers, Daniel Huynh, Arash Khatayee, Ellen Maeckelburg, Christian Müller, Christopher Robson, Sebastian Speth, Maria Stöcker, Tobias Tetzner, Roman Trapićkin, Sonja Weyermann, Elena Wolz und Peter Zarnitz.

Außerdem gilt mein Dank den zahlreichen Studienteilnehmern – ohne sie wären die Experimente und Umfragen nicht möglich gewesen.

Mein besonderer Dank gilt Dr.-Ing. Harald Hagel für seine Unterstützung bei der Anfertigung dieser Doktorarbeit.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Familie, welche mich bei meinem Lebensweg begleitet und mich stets bestärkt – meinen Weg zu gehen, und der ich diese Arbeit widme.



# 1 Einleitung

Informationsmanagement ist eine Disziplin der Wirtschaftsinformatik Krcmar (vgl. 2015). Sie soll den bestmöglichen Einsatz von Informationen gewährleisten (Krcmar 2015, 1). Bei der steigenden Anzahl von Fahrerassistenz- und Fahrzeuginformationssystemen ist das Informationsmanagement von wachsender Bedeutung (Truschin et al. 2011), vor allem um dem Nutzer während der Fahrt Informationen zur Verfügung zu stellen (Heigemeyr/Harrer 2014).

Die Auswahl der Informationen ist zwingend erforderlich, damit sich der Fahrer auf die jeweilige Fahrsituation konzentrieren und erforderliche Fahrmanöver durchführen kann (Green 2004). Dazu bedarf es geeigneter Informationssysteme.

*„Informationssysteme ... sind soziotechnische Systeme, die menschliche und maschinelle Komponenten (Teilsysteme) umfassen. Sie unterstützen die Sammlung, Strukturierung, Verarbeitung, Bereitstellung, Kommunikation und Nutzung von Daten, Informationen und Wissen sowie deren Transformation. Informationssysteme tragen zur Entscheidungsfindung, Koordination, Steuerung und Kontrolle von Wertschöpfungsprozessen sowie deren Automatisierung, Integration und Virtualisierung unter insbesondere ökonomischen Kriterien bei. Informationssysteme können Produkt-, Prozess- und Geschäftsmodellinnovationen bewirken.“* (WKWI 2011; Herv. durch Verfasser)

Die Fahrerassistenz- und Fahrzeuginformationssysteme transferieren Informationen vom Fahrzeug zum Fahrer/Nutzer des Informationssystems. Zu den Informationssystemen zählen Energieverbrauchsanzeigen als soziotechnische Systeme.

Energieverbrauchsanzeigen ermitteln mit Sensorik den Energieverbrauch und stellen Informationen zu verschiedenen Verbräuchen und der Restreichweite von Verbrauchsstoffen wie Benzin oder Diesel dar.

## 1.1 Motivation

Informationssysteme, welche den Energieverbrauch beeinflussen, stellen in der Wirtschaftsinformatik eine offene Forschungslücke dar (Watson et al. 2010). Informationen besitzen einen komplexen Charakter. Sie beeinflussen das menschliche Verhalten (Stern 2000). Verhaltensänderungen können folglich durch Informationen ausgelöst werden, welche hier als informationelle Trigger (ITRs) bezeichnet werden.

Die Untersuchung konzentriert sich auf das Automobil während der Fahrt. Die Informationsbereitstellung wird in Zusammenhang mit den Erkenntnissen von Watson et al. (2010) untersucht. Gegenstand der Untersuchung sind ITRs, welche den Energieverbrauch wiedergeben, um den Fahrer bei der Entscheidungsfindung zu unterstützen.

Zur Übertragung der Informationen zum Fahrer wird Software, die mit dem Fahrer interagiert, eingesetzt. Sie ist im Forschungsbereich der Mensch-Maschine-Kommunikation von wachsender Bedeutung (Krum et al. 2008). Im Auto werden Informationen mittels verschiedener Interaktionskanäle übermittelt.

Die übertragenen Informationen können in externe und interne Daten eingeteilt werden. Die *externen Daten* stammen aus Datenquellen, welche von Dritten erzeugt werden, zum Beispiel Informationen über das Verkehrsaufkommen durch den Rund- oder Mobilfunk. Die *internen Daten* stammen von Datenquellen innerhalb des Fahrzeugs oder vom Fahrzeug selbst, die durch Sensoren erfasst werden, beispielsweise der Abstand zu vorausfahrenden Fahrzeugen, die Geschwindigkeit oder die Tankfüllung. Die Arbeit fokussiert sich auf interne Daten, sodass die Verfügbarkeit der Daten sichergestellt ist und äußere Einflüsse vernachlässigt werden können.

Die Fahrinformationen werden zu drei Gruppen von Fahraufgaben zugeordnet: (i) primäre, (ii) sekundäre und (iii) tertiäre (Kern/Schmidt 2009; Ablaßmeier et al. 2007). Zur *primären Fahraufgabe* gehört es, das Fahrzeug sicher von einem Punkt A zu einem Punkt B zu führen (Kern/Schmidt 2009; Ablaßmeier et al. 2007; Poitschke et al. 2007). Die *sekundäre Fahraufgabe* erhöht die Sicherheit für den Fahrer, das Fahrzeug und die Umgebung. Der Aufgabe werden Funktionen wie Kollisionswarnungen, Anschalten von Abblendlicht oder Energieverbrauchsanzeigen zugeordnet (Kern/Schmidt 2009; Ablaßmeier et al. 2007; Gottlieb 2015). Der *tertiären Fahraufgabe* werden sonstige Funktionen wie Info- oder Entertainment zugeordnet (Kern/Schmidt 2009; Ablaßmeier et al. 2007).

Im Rahmen der sekundären Aufgabe wird nicht nur die Sicherheit erhöht, sondern besteht auch die Möglichkeit, dass Menschen ihr Verhalten ändern (Fogg 2009a, 2009b, 2009c, 2002; Fogg/Nass 1997; Moraveji et al. 2011). Es stellt sich die Frage, welchen Einfluss ITRs auf das Fahrverhalten haben und ob durch sie der Energieverbrauch verändert wird.

Neben ITRs kann auch das Schulen eines energieeffizienten Fahrstils zu einer Reduzierung des Energieverbrauchs führen (Azzi et al. 2011). Andererseits ist zu berücksichtigen, dass das Erlernen von einem energieeffizienten Fahrstil keinen langfristigen Effekt hat (Wählberg 2007). Die Untersuchung von Corcoba Magaña/Muñoz Organero (2015) bestätigt die Untersuchung von Wählberg (2007) und empfiehlt aktives Feedback, das dem Fahrer den Energieverbrauch kontinuierlich während der Fahrt mitteilt.

Ein aktives Feedback führt zu Einsparungen im Energieverbrauch. Dahlinger/Wortmann (2016) weisen auf die Möglichkeit von Einsparungen zwischen 0 bis 32 % an Kraftstoff hin. Barbé/Boy (2006) zeigen, dass durch ein angepasstes Verhalten Reduzierungen im Energieverbrauch von bis zu 25 % möglich sind. Van der Voort et al. (2001) beziffern die mögliche Reduzierung des Energieverbrauchs auf 16 %, Fonseca Gonzalez et al. (2010) auf 14 %, was mit den Ergebnissen von Evans (1979) übereinstimmt. Barić et al. (2013) belegen eine Reduzierung von 32 %. Sivak/Schoettle (2012) legen dar, dass der Energieverbrauch durch Verhaltensänderung um bis zu 45 % reduziert werden kann. Sie unterscheiden drei Steuerungsmöglichkeiten: (i) strategisch (Instandhaltung), (ii) taktisch (Streckenauswahl, Fahrzeugbeladung) oder (iii) operativ (Fahrverhalten). Diese Arbeit befasst sich mit operativen Entscheidungen, welche das Fahrverhalten beeinflussen.

## 1.2 Ziel und Gegenstand

Ziel der Arbeit ist es, den Effekt von informationellen Triggern auf den Energieverbrauch zu analysieren. Für die Analyse des Effektes wird der Fokus der Arbeit auf zwei oder mehr ITRs für motivierte und nicht-motivierte Fahrer eingeschränkt. Ein motivierter Fahrer ist ein Fahrer, der – intrinsisch oder extrinsisch – motiviert ist, energiesparend zu fahren.

Die zu untersuchenden ITRs wurden mithilfe einer Literaturrecherche festgelegt. Außerdem hat die Literaturrecherche gezeigt, dass keine Arbeit vorliegt, die Unterschiede zwischen motivierten und nicht-motivierten Fahrern in der Reaktion auf Energieverbrauchsanzeigen untersucht hat.

Für eine umfassendere Analyse der Literatur zu Energieverbrauchsanzeigen wird der Fokus der Literaturanalyse von Dahlinger/Wortmann (2016) um die Bereiche des Transportation Research und der Psychologie erweitert. Diese Erweiterung des Erkenntnisstands der Wirtschaftsinformatik ermöglicht, die Untersuchung der Auswirkungen des motivationalen Verhaltens mit der bisherigen Forschung über Energieverbrauchsanzeigen im Bereich des Eco-Drivings zu vereinen.

Eco-Driving ist definiert als eine ökonomischere und ökologischere Fahrweise, um Kraftstoffverbrauch und Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)-Emissionen zu reduzieren (Ando/Nishihori 2011; Cristea et al. 2012; Dogan et al. 2011; Harvey et al. 2013; Jamson et al. 2015a; Barth/Boriboonsomsin 2009; Boriboonsomsin et al. 2010; Barkenbus 2010). Die Begrifflichkeit des Eco-Drivings wird als für diese Fahrweise verwendet.

## 1.3 Forschungsleitende Fragestellungen

Drei Forschungsfragen strukturieren das Forschungsvorhaben. Zunächst ist es notwendig, einen Überblick über Energieverbrauchsanzeigen im Automobil zu geben und die vorhandenen und untersuchten Energieverbrauchsanzeigen darzustellen, und zu zeigen, bei welchen ITRs Forschungsbedarf besteht und welche ITRs als Untersuchungsgegenstand herangezogen werden können. Die Arbeit setzt sich daher mit folgenden Fragestellungen auseinander:

### **Forschungsfrage 1: Was ist der aktuelle Forschungsstand über Energieverbrauchsanzeigen als Auslöser von verändertem Fahrverhalten?**

Ziel der Fragestellung ist die Eingrenzung des Themengebietes auf Energieverbrauchsanzeigen als ITRs auf das Fahrverhalten, welche eine energieeffizientere Fahrweise ermöglichen.

Ergebnis der Forschungsfrage 1 ist eine Liste von Energieverbrauchsanzeigen, welche als ITR auf das Fahrverhalten wirken. Die Liste stellt den aktuellen Stand der Technik und der Forschung dar. Sie beinhaltet auch medizinische und neuronale Informationen, die die unterschiedliche Verarbeitung von Energieverbrauchsinformationen verständlich machen. Die Liste liefert auch einen Beitrag zum Domänenverständnis und ermöglicht es, eine oder mehrere Forschungslücken zu identifizieren, sowie eine Forschungstheorie aufzustellen.

Im nächsten Schritt kann der Einfluss von Energieverbrauchsanzeigen auf das Fahrverhalten beobachtet und zwischen motivierten und nicht-motivierten Fahrern unterschieden werden.

Daraus ergeben sich die zweite und die dritte Forschungsfrage:

**Forschungsfrage 2: Was ist der Einfluss von Energieverbrauchsanzeigen auf das Fahrverhalten von motivierten Benutzern?**

**Forschungsfrage 3: Was ist der Einfluss von Energieverbrauchsanzeigen auf das Fahrverhalten von nicht-motivierten Benutzern?**

Ziel der Forschungsfrage 2 ist es, den Einfluss von Energieverbrauchsanzeigen auf das Fahrverhalten von motivierten Benutzern zu erkennen und zu analysieren, mit welchen Energieverbrauchsanzeigen das Fahrverhalten zu einer energieeffizienteren Fahrweise verändert werden kann. Bei Forschungsfrage 3 bezieht sich die Frage auf nicht-motivierte Fahrer. Sie ermöglicht zudem den Vergleich zwischen motivierten und nicht-motivierten Benutzern sowie möglichen Unterschieden in Bezug auf die Energieverbrauchsanzeigen.

Zur Unterscheidung von motivierten und nicht-motivierten Fahrern wurde ein Fragebogen entwickelt. Zusätzlich wurden zwei Fahrscenarien entwickelt, welche jeweils energiesparendes und nicht-energiesparendes Fahren unterscheiden. Es wird angenommen, dass ein energiebewusster Mensch motiviert ist, energiesparend zu fahren, während ein nicht-energiebewusster Mensch nicht motiviert ist, energiesparend zu fahren.

Die Untersuchung wird aufzeigen, in wieweit Energieverbrauchsanzeigen in bestimmten Situationen Einfluss auf eine effiziente Fahrweise nehmen. Unter einer Situation wird verstanden, dass die Verhältnisse und Umstände während der gesamten Fahrt gleich bleiben, beispielsweise der Weg zur Arbeit auf einer bestimmten Strecke.

Die Arbeit wird das Wissen über den Nutzen verschiedener Energieverbrauchsanzeigen erweitern. Zusätzlich werden Erkenntnisse gewonnen, wann welches Feedbacksystem für die Informationsdarstellung am besten geeignet sein könnte und/oder eine Äquivalenz in der Informationsdarstellung besteht. Praktiker aus der Automobilindustrie könnten mit den Erkenntnissen den Energieverbrauch spezifischer darstellen und somit kundenorientiertere Systeme entwickeln.

#### **1.4 Aufbau und Ablauf der Arbeit**

In Kapitel 2 werden in einem ersten Schritt die **Grundlagen** zu den verwendeten Forschungsmethoden und die Begrifflichkeiten für ein grundlegendes Verständnis gegeben. Danach kann ein **Domänenverständnis** in Kapitel 3 gegeben werden. Zusätzlich ermöglicht es, den Fokus der Arbeit auf die ITRs zu legen, bei welchen Forschungsbedarf besteht. Dadurch kann sichergestellt werden, dass die zu gewinnenden Erkenntnisse die nötige Aktualität aufweisen und auf der Theorie aufbauen. In Kapitel 4 kann anschließend die **Planung des Fahrsimulatorexperimentes** mit den ITRs vorgenommen werden. Nachdem das Erkenntnisinteresse eingehender dargelegt worden ist und der Experimentaufbau dargestellt wurde, kann mit der Vorbereitung

des Fahrsimulatorexperimentes begonnen werden. Für das Experiment sind fünf Einzelschritte notwendig: (1) Entwicklung eines **Messmodells zur Erfassung des Energieverbrauchs** (Kapitel 5), (2) Entwicklung eines **Erhebungsinstrumentes für das Energiebewusstsein** (Kapitel 6), (3) Überprüfung der **Umsetzbarkeit im Fahrsimulator** (Kapitel 7), (4) Entwicklung einer **Fahrscene** für das Experiment (Kapitel 8) und (5) die **Implementierung der ITRs** (Kapitel 9). Daran schließt sich das Fahrsimulatorexperiment mit einem **Pretest** in Kapitel 10 und der **Durchführung des Experiments** in Kapitel 11 an. Nach der Durchführung des Experiments folgt die **Auswertung des Experiments** in Kapitel 12. Die Daten werden mit einem weiteren Experiment in Kapitel 13 **überprüft**, ob eine Ersetzung des visuellen durch ein haptisches Feedback möglich ist. Abschließend erfolgen in Kapitel 14 eine **Zusammenfassung und ein Ausblick**. Abbildung 1 stellt den Aufbau der Arbeit dar.

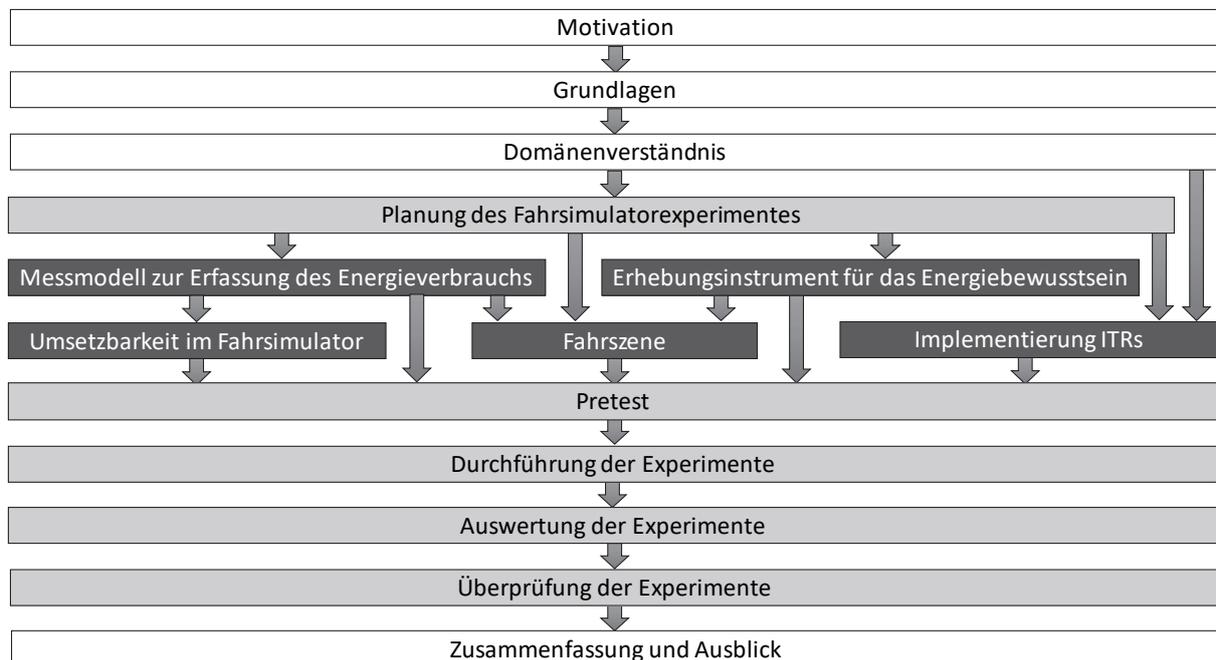


Abbildung 1: Aufbau der Arbeit  
Quelle: Eigene Darstellung

## 2 Grundlagen

In einem ersten Schritt werden die grundlegenden Forschungsmethoden erklärt. Hieran schließt sich das Forschungsdesign mit der Definition der entscheidenden Begrifflichkeiten an. Abschließend wird die Forschungsidee skizziert.

### 2.1 Forschungsmethoden

Das methodische Vorgehen besteht aus vier Schritten: (1) Literaturrecherche, (2) Vorbereitung der Experimente, (3) Experimente und (4) Analyse der Experimente.

#### 2.1.1 Literaturrecherche

Für einen Überblick über die gewählte Domäne Energieverbrauchsanzeigen wird eine Literaturrecherche nach vom Brocke et al. (2009), bestehend aus fünf Schritten, durchgeführt:

- (i) Definition des Suchraumes,
- (ii) Konzeptualisierung des Themas (Cooper 1988),
- (iii) Literatursuche,
- (iv) Literaturanalyse und -synthese sowie
- (v) Forschungsagenda.

Die (i) **Definition des Suchraumes** wird nach der Taxonomie von Cooper (1988) vorgenommen, welche sich in sechs Ausprägungen unterteilt:

- (1) Fokus,
- (2) Ziel,
- (3) Perspektive,
- (4) Umfang,
- (5) Aufbau und
- (6) Zielgruppe.

Der (1) **Fokus** liegt auf den bisherigen Ergebnissen aus der Forschung, um Erkenntnisse über bereits untersuchte und noch genauer zu untersuchende Energieverbrauchsanzeigen zu erhalten. Aus dem Alltag sind bereits erste Energieverbrauchsanzeigen im Fahrzeug bekannt wie die Tankanzeige. Daher wird der Schwerpunkt um bereits in der Praxis vorhandene Anwendungen erweitert. Das (2) **Ziel** ist in Anlehnung an Cooper (1988) mit einem integrierenden Ansatz zu identifizieren. Der Ansatz gliedert sich in die drei Schritte:

- Formulierung allgemeiner Aussagen von mehreren spezifischen Instanzen, eine Art Synthese der Forschungsliteratur;
- Lösung des Konflikts zwischen widersprüchlichen Vorstellungen oder Aussagen durch ein neues Konzept, das die Inkonsistenzen erklärt; und
- Überbrückung der Forschungslücke zwischen den Theorien oder Disziplinen durch die Erschaffung eines gemeinsamen Verständnisses.

Als (3) **Perspektive** wird die neutrale Repräsentation gewählt, um dem objektiven Charakter einer wissenschaftlichen Arbeit gerecht zu werden. Der (4) **Umfang** soll die vorhandenen Forschungserkenntnisse berücksichtigen. Dabei werden neben der Wirtschaftsinformatik die Disziplinen Maschinenbau und Psychologie herangezogen. Somit ist nach der Taxonomie von Cooper (1988) der Umfang als *umfassend mit ausgewählter Zitierung* einzuordnen. Der (5)

**Aufbau** ist nach Cooper (1988) als historisch und konzeptuell anzusehen. Energieverbrauchsanzeigen sind in den heutigen Automobilen Standard geworden. Zur Eingrenzung der Untersuchung wird der Zeitpunkt der Einführung der ersten Energieverbrauchsanzeige in einem Serienfahrzeug bis zum März 2017 gewählt. Die (6) **Zielgruppe** der Literaturrecherche sind nach Cooper (1988) spezialisierte Wissenschaftler. Die Recherche zeigt Wissenschaftlern eine Forschungslücke, ohne die praktische Bedeutung der Aufbereitung von Energieverbrauchsanzeigen im Fahrzeug für Entscheidungsträger in der Automobilindustrie zu vernachlässigen. In Tabelle 1 ist die Einordnung der Literatursuche in die Taxonomie nach Cooper (1988) dargestellt.

Ausprägung		Kategorie			
(1)	Fokus	Forschungsergebnisse	Forschungsmethoden	Theorien	Praxis/Anwendungen
(2)	Ziel	integrierend		kritisierend	identifizieren von zentralen Herausforderungen
(3)	Perspektive	neutrale Repräsentation			Positionsbeziehend
(4)	Umfang	vollumfassend	umfassend mit ausgewählter Zitierung	repräsentativ	zentral/entscheidend
(5)	Aufbau	historisch	konzeptuell		Methodologisch
(6)	Zielgruppe	spezielle Wissenschaftler	Allgemeine Wissenschaftler	Praktiker/Entscheidungsträger	Allgemeinheit

Tabelle 1: Taxonomie

Quelle: In Anlehnung an (Cooper 1988)

Für den Schritt (ii) wird das **Thema konzeptualisiert** um einen Überblick für das zu untersuchende Thema zu erhalten. Die zu erfassenden Disziplinen sind im zu erfassenden Umfang der Arbeit in Schritt (i) aufgezeigt worden.

Für den Schritt (iii) wird die **Literatursuche** in Anlehnung an Webster/Watson (2002) durchgeführt, welche zusammen mit den Schritten (iv) und (v) in Kapitel 3 eingehender behandelt wird.

## 2.1.2 Experimentdesign: Skizzierung

Für die Erstellung des Experimentdesigns wird die von Lawson (2015, 6-7) vorgeschlagene Vorgehensweise, welche aus fünf Schritten besteht, zur Gestaltung von Experimenten herangezogen. Als erstes wird das zu untersuchende Objekt definiert. Im zweiten Schritt wird das Experimentdesign ausgewählt. Parallel wird im dritten Schritt die Prozedur für die Datensammlung festgelegt und das Modell zur Analyse der Daten bestimmt. Im vierten Schritt werden die Datenanalyse und die Interpretation der Ergebnisse vorgenommen. Im letzten Schritt, welcher erst nach Durchführung des Experimentes möglich ist, werden die Ergebnisse zusammengefasst.

### 2.1.2.1 Definition des Untersuchungsobjektes

Das zu untersuchende Objekt ist der Energieverbrauch. Der Energieverbrauch soll mit zwei oder mehreren Treatments aus Forschungsfrage 1 beeinflusst werden, um den Effekt der Treatments auf den Energieverbrauch zu messen. Zusätzlich soll der Unterschied zwischen motivierten und nicht-motivierten Fahrern gemessen werden. Folglich können Rückschlüsse auf das

menschliche Verhalten in Bezug auf den Energieverbrauch bei einem bestimmten Treatment unter Berücksichtigung der Motivation gezogen werden.

### **2.1.2.2 Auswahl des Experimentdesigns**

Zur Überprüfung der in der Literatur gefundenen Ergebnisse wird in einem ersten Schritt die interne Validität mit einem Laborexperiment überprüft (Bortz/Schuster 2010, 8-9). Die Prüfung der externen Validität ist nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Laborexperimente gehören zu den quantitativen-verhaltenswissenschaftlich basierten Forschungsmethoden der Wirtschaftsinformatik (Wilde/Hess 2007). Laborexperimente sind für die Überprüfung von soziotechnischen Systemen geeignet, wie Studien belegen (Truschin et al. 2014; Benbasat/Todd 1993; Alpern/Minardo 2003; Politis et al. 2013).

Bei der Gestaltung von Experimenten sind nach Quenouille (1953, 5) drei Hauptüberlegungen anzustellen:

- (1) Notwendigkeit der Reproduzierbarkeit,
- (2) Notwendigkeit der Randomisierung und
- (3) Auswahl des Experimentdesigns für eine Erwartungstreue der Treatments und bestmögliche Fehlerfreiheit.

Für die **Reproduzierbarkeit** werden mehrere Vorkehrungen getroffen: Die Versuchsumgebung wird nicht verändert, die Versuche werden mithilfe von Videoaufnahmen festgehalten, der Zeitraum wird im Vorfeld festgelegt, die teilnehmenden Probanden werden anonymisiert dokumentiert, die verwendete Software wird in einem Git-Repository abgelegt und es werden demografische Daten erfasst. Zur Sicherstellung der **Randomisierung** wird ein sogenanntes komplett zufälliges („completely randomized“), experimentelles Design verwendet (Friedman/Sunder 1994, 24). Die Umgebung wird gleich belassen und das Treatment wird jedem einzelnen Probanden zufällig zugeordnet. Bei der Zuordnung wird auf eine Gleichverteilung der Treatments geachtet. Für die **Auswahl des Experimentdesigns** werden in Abschnitt 4.1 zunächst Hypothesen aufgestellt und anschließend in Abschnitt 4.2 das genaue Experimentdesign festgelegt.

### **2.1.2.3 Prozedur und Modell für Datengenerierung und -analyse**

Eine detailliertere Planung der Untersuchung hinsichtlich der abhängigen und unabhängigen Variablen erfolgt in Kapitel 4. Vorab wird eine erste Idee zur Datenerhebung vorgestellt. Für die Datengenerierung ist ein Laborexperiment mit einem Fahrsimulator vorgesehen. Für die Messung der Motivation wird ein Erhebungsinstrument in Kapitel 6 entwickelt und validiert. Die Variablen, welche mit der Versuchsumgebung gemessen werden können, werden in Abschnitt 7.1 festgelegt und in Abschnitt 7.2 wird untersucht, ob die in der Fahrsimulationssoftware hinterlegten Daten zur Energieverbrauchsberechnung für die Messung geeignet sind. Die genaue Fahrscene wird in Kapitel 8 eingehender dargestellt.

Aus dem Domänenverständnis werden zwei oder mehrere Treatments (unabhängige Variablen) abgeleitet, welche eingehender hinsichtlich der abhängigen Variablen untersucht werden. Somit ist ein Testverfahren wie die Varianzanalyse (englisch: Analysis of Variances, kurz: ANOVA)

notwendig, das zwei oder mehr Werte auf Unterschiede untersuchen kann. Studien im Bereich von Energieverbrauchsanzeigen haben zur Analyse bereits die ANOVA verwendet (Jung et al. 2015; Shim et al. 2015). Die ANOVA scheint also ein geeignetes Messverfahren darzustellen.

Für die Verwendung der ANOVA müssen zwei Voraussetzungen erfüllt sein: Varianzhomogenität (Homoskedastizität) und Normalverteilung. Für die Prüfung auf Normalverteilung wird der Shapiro-Wilk-Test herangezogen (Bortz/Schuster 2010, 145 ff; Shapiro et al. 1968). Die Varianzhomogenität wird mit dem Levene-Test überprüft (Bortz/Schuster 2010, 128-130).

#### **2.1.2.4 Datenanalyse und Interpretation der Ergebnisse**

Sind die Voraussetzungen für eine ANOVA gegeben, kann die Datenanalyse durchgeführt werden. Ergibt sich aus der Analyse ein p-Wert von  $< 0,05$ , so ergibt sich ein signifikanter Unterschied zwischen den unabhängigen Variablen.

Im nächsten Schritt ist das Signifikanzniveau  $\alpha$  zu bestimmen. Die Auswirkungen eines Fehlers würden in einem Feedback resultieren, das den Energieverbrauch mehr oder weniger stark beeinflusst. Der Energieverbrauch kann jedoch die physikalischen Grenzen des Fahrzeugs nicht überschreiten, sodass die Folgen als geringer einzuschätzen sind als bei einer fehlerhaften Wetterprognose (Bortz/Schuster 2010, 101). Dies würde ein Signifikanzniveau von 0,1 rechtfertigen. Das Signifikanzniveau sollte 0,1 demgemäß nicht überschreiten, weil die Auswirkungen eines Irrtums bei 10 % liegen würden. Jedoch sind weitere Gründe anzuführen, die für ein niedrigeres Signifikanzniveau sprechen. Bortz/Schuster (2010) geben als Standardwerte 0,05 und 0,01 an. Nach eigenen Erfahrungen verwenden die Studien in der zu untersuchenden Domäne ein Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$ . Zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse wird daher das Signifikanzniveau  $\alpha = 0,05$  festgelegt.

Damit die Teststärke bestimmt werden kann, ist die zu erwartende Effektgröße zu bestimmen. „Die Teststärke gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Signifikanztest zugunsten einer spezifischen Alternativhypothese entscheidet, falls diese gilt.“ (Bortz/Schuster 2010, 108).

Angenommen ein Fahrzeug verbraucht 6 l auf 100 km (Volkswagen AG 2017). Nach der Studie von Dahlinger/Wortmann (2016) ergibt dies ein Einsparungspotenzial zwischen 0 und 32 %. Unter gewissen Umständen lassen sich Extreme im Energieverbrauch erzeugen, wie beim Fahren im vierten Gang bei 190 km/h oder dem Fahren im sechsten Ganges bei 60 km/h auf einer ebenen Strecke. Es ist somit eine Vergleichbarkeit der Strecken herzustellen, d. h. die Geschwindigkeitsbegrenzungen auf den Strecken müssen übereinstimmen und es muss immer das Fahren im gleichen Gang bei gleicher Geschwindigkeit erfolgen. Dies führt zu einer besseren Vergleichbarkeit der Werte. Es wird eine Varianz auf 100 km von 1 l im durchschnittlichen Verbrauch angenommen. Dies entspricht einem Unterschied von  $\pm 16,67$  %, welcher in der Mitte von den Daten von Dahlinger/Wortmann (2016) liegt. Hieraus lässt sich unter der Voraussetzung einer Normalverteilung die Effektgröße abschätzen (Bortz/Schuster 2010, 112), welche in Tabelle 2 dargestellt ist.

Energieeffizienz in %	Energieeffizienz in l/100 km	Effektgröße	Stichprobenumfang
1	0,06	0,06 (klein)	120
2	0,12	0,12 (klein)	30
3	0,18	0,18 (klein)	13,33
5	0,3	0,3 (mittel)	4,8
10	0,6	0,6 (mittel)	1,2
13	0,78	0,78 (mittel)	0,71
15	0,9	0,9 (groß)	0,53
20	1,2	1,2 (groß)	0,3
25	1,5	1,5 (groß)	0,192
30	1,8	1,8 (groß)	0,13
32	1,92	1,92 (groß)	0,12

Tabelle 2: Abschätzung der Effektgröße und des Stichprobenumfangs  
Quelle: Eigene Darstellung

Die nähere Untersuchung der Tabelle 2 zeigt, dass eine Einsparung zwischen 1 bis 3 % eine kleine Effektgröße aufweist, während die Werte 4 bis 13 % einer mittleren Effektgröße sowie 14 % und größer einer großen Effektgröße entsprechen würden (Bortz/Schuster 2010, 108-109).

Dahlinger/Wortmann (2016) fanden nur zwei Studien, welche eine größere Energieeffizienz als 13 % nachweisen. Eine Effektgröße zwischen 1 bis 13 % wird als realistischer angesehen. Die erwartete Effektgröße ist somit klein bis mittel (Bortz/Schuster 2010, 108-109).

Es wird erwartet, dass mindestens 30 Probanden je Treatment teilnehmen. Daraus ergibt sich ein empirischer z-Wert von 0,33 (Bortz/Schuster 2010, 103). Somit wäre die Teststärke ab einer Energieeffizienz von 2 % ausreichend (Bortz/Schuster 2010, 110). Ist die Effektgröße kleiner, so ist die Anzahl der Probanden zu erhöhen, um den Stichprobenumfang zu vergrößern (Bortz/Schuster 2010, 111).

## 2.2 Begrifflichkeiten

Für das weitere Vorgehen und ein einheitliches Verständnis ist es notwendig, die entscheidenden Begrifflichkeiten zu definieren. Die entscheidenden Begrifflichkeiten sind: Motivation, Verhalten, Energiebewusstsein und Energieverbrauchsanzeige.

### 2.2.1 Energieverbrauchsanzeige

Eine Energieverbrauchsanzeige informiert den Benutzer über den momentanen oder den zeit-räumlichen Verbrauch an Energie. Die Art der Übertragung zwischen Mensch und Maschine wird als Interaktionskanal bezeichnet. Die Interaktionskanäle werden in der Literatur in vier Kategorien unterschieden: (i) visuelle, (ii) haptische, (iii) akustische und (iv) multimodale (Meschtscherjakov et al. 2009; Landau et al. 2014; Siewiorek et al. 2002; Pfleging et al. 2012; Barbé/Boy 2006; Staubach et al. 2012). Unter multimodalen Interaktionskanälen wird die Verwendung von mehr als einem Interaktionskanal verstanden.

Eine Energieverbrauchsanzeige ist ein ITR. Wehmeier/Hornby (2000, 1388) definieren ITR als einen Auslöser (englisch Trigger): „*something that is the cause of a particular reaction or development*“; übersetzt: *etwas, das eine bestimmte Reaktion oder Entwicklung verursacht*. In

dieser Arbeit wird die Bezeichnung ITR als Kombination von Informationen, welche dem Fahrer mittels einer Anzeige angezeigt werden, und dem Auslöser (trigger) verstanden. Eine Anzeige im engeren Sinne ist ausschließlich visuell. Hingegen ist eine Anzeige im weitesten Sinne eine Darstellungsform, die ein Signal so aufbereitet, dass der Mensch über einen oder mehrere seiner Sinneskanäle (Sehsinn, Tastsinn, Gehörsinn, Gleichgewichtssinn, Geruchssinn und Geschmackssinn) die Information empfangen kann. Der **Geruchs- und Geschmackssinn** werden beim Autofahren bisher nicht adressiert. Der **Gleichgewichtssinn** gibt dem Fahrer Rückmeldung über die Beschleunigung des Fahrzeugs. Der **Sehsinn** wird beim Autofahren für die primäre Fahraufgabe benötigt. Hingegen sind Energieverbrauchsanzeigen als ITRs der sekundären Fahraufgabe zugeordnet (Gottlieb 2015) und beispielsweise zu vergleichen mit der Tachoanzeige oder dem Multimediasystem. Der **Tastsinn** ist beim Autofahren für die Lenkung des Fahrzeugs von Bedeutung. Der Tastsinn wird auch mit dem Spurhalteassistenten, beispielsweise beim Vibrieren des Lenkrades, in Verbindung gebracht. Der **Gehörsinn** wird im Fahrzeug durch akustische Signale wie Warntöne beim nicht-angeschnallten Autofahren in Anspruch genommen. Seh-, Tast- und Gehörsinn kommen für die Anwendung von ITRs in Frage. Es werden nicht nur die einzelnen Kanäle – visuell, haptisch und akustisch – sondern auch Kombinationen aus diesen betrachtet.

Energieverbrauchsanzeigen sind ITRs, welche dem Fahrer eine Rückmeldung über sein Fahrverhalten geben und damit eine Veränderung desselbigen auslösen können. Die Form der Rückmeldung wird auch als Feedback bezeichnet. Der Begriff Feedback ist allgemein verständlicher und umfasst neben dem visuellen Kanal auch die haptischen und akustischen Kanäle sowie deren Kombinationen. Insofern ist eine Energieverbrauchsanzeige als Energieverbrauchsfeedback zu verstehen.

## 2.2.2 Energiebewusstsein

Der Begriff Energiebewusstsein wird in den Unterabschnitten 2.2.2.1 und 2.1.2.2 für ein besseres Verständnis genauer betrachtet.

### 2.2.2.1 Allgemein

Der Begriff des Energiebewusstseins setzt sich aus den Wörtern „Energie“ und „Bewusstsein“ zusammen. Die Definitionen der Begriffe werden im Folgenden genauer betrachtet.

*Energie ist die „Fähigkeit, physikalische Arbeit zu leisten und damit Veränderungen im oder am Stoff zu bewirken; für Produktion notwendig. Energie ist an das Vorhandensein eines Energieträgers gebunden; in der Natur isoliert in gespeicherter Form nicht möglich.“ (Günther o. J.)*

*„Bewusstsein (lat. conscientia: Mitwissen, bei Sinnen sein, denken) ist i. w. S. die erfahrbare Existenz geistiger Zustände und Prozesse. Der Begriff ‚Bewusstsein‘ hat im Sprachgebrauch sehr unterschiedliche Bedeutungen, die sich teilweise mit den Bedeutungen von Psyche, Seele und Geist“ (Siller o. J.-a) decken.*

Mithilfe der Sinne werden Objekte wahrgenommen. Die Wahrnehmung der Objekte findet bewusst oder unbewusst statt. Zusätzlich gibt es die Form der unterbewussten Wahrnehmung. „Wahrnehmung umfasst den Prozess der Aufnahme und Selektion von Informationen sowie deren Organisation und Interpretation durch den Käufer.“ (Pepels 2012, 152) Der Käufer ist hier der Nutzer, der Informationen wahrnimmt – im Experiment ist es die fahrzeugführende Person.

### **2.2.2.2 Energiebewusstsein beim Steuern eines Fahrzeuges**

Das Energiebewusstsein im Speziellen fokussiert sich hier auf den Kontext Automotive Services. Unter energiebewusstem Autofahren finden sich in der Literatur die Begriffe „Eco Driving“, „Energieeffizienz“, „sparsames Fahren“, welche als Synonyme verwendet werden (Kaufmann-Hayoz et al. 2012; Kim/Kim 2012).

Fogg (2009b) stellt fest, dass der Mensch sein Verhalten ändert, wenn die Fähigkeit dazu vorhanden und gleichzeitig die Motivation hoch ist. Das Verhalten eines Menschen beim Autofahren entspricht einem Prozess. Bei diesem Prozess werden Informationen aufgenommen und selektiert sowie durch den Fahrer interpretiert oder ignoriert. Die Information zu verstehen und somit durch einen energieeffizienteren Fahrstil den Prozess bewusst zu beeinflussen ist an die Fähigkeit des Fahrers gebunden. Abhängig von Fähigkeit und Motivation ist der Fahrstil so zu verändern, dass der Energieverbrauch steigt oder sinkt

Bevor der Effekt von Energieverbrauchsanzeigen nähergehend untersucht werden kann, ist es notwendig, die Begrifflichkeiten Motivation und Verhalten in den Abschnitten 2.2.3 und 2.2.4 zu verstehen, um den Überlegungen von Fogg (2009b) besser folgen zu können.

### **2.2.3 Motivation**

Der Begriff der Motivation ist im Gabler Wirtschaftslexikon wie folgt definiert (Maier/Kirchgeorg o. J.):

*„Zustand einer Person, der sie dazu veranlasst, eine bestimmte Handlungsalternative auszuwählen, um ein bestimmtes Ergebnis zu erreichen und der dafür sorgt, dass diese Person ihr Verhalten hinsichtlich Richtung und Intensität beibehält. Im Gegensatz zu den beim Menschen begrenzten biologischen Antrieben sind Motivation und einzelne Motive gelernt bzw. in Sozialisationsprozessen vermittelt. Der Begriff der Motivation wird oft auch im Sinn von Handlungsantrieben oder Bedürfnissen verwendet.“*

Die Begrifflichkeit ist auf die Theorie von Maslow (1943) über die Motivation des Menschen zurückzuführen. Er führte die Motivation eines Menschen auf fünf grundlegende Ziele zurück: Physiologie, Sicherheit, Liebe, Wertschätzung und Selbstverwirklichung. Maslow (1943) beobachtete, dass die grundlegenden Ziele, auch Grundbedürfnisse genannt, untereinander in Beziehung stehen und einer hierarchischen Ordnung unterliegen, sie wird in der Bedürfnispyramide dargestellt (Maslow 1954). Zusätzlich gibt er als höherrangige Bedingungen Zufriedenheit und intellektuelle Wünsche an, die erfüllt werden oder erhalten bleiben sollten (Maslow 1943). Die Überlegungen erweiterte Maslow (1970). Darüber hinaus stellt Maslow (1943) klar, dass Motivation und Verhalten nicht synonym zu verwenden sind.

Ryan/Deci (2000a) definieren Motivation in der Selbstbestimmungstheorie als bewegt zu sein, etwas zu tun: „*To be motivated means to be moved to do something*“. Die Selbstbestimmungstheorie unterscheidet extrinsische und intrinsische Motivation. Während die intrinsische Motivation getrieben wird von Interessen, Eigenschaften und dem Bedürfnis nach Kompetenz, basiert die extrinsische Motivation auf äußeren Einflussfaktoren wie Umgebung, einflussreiche Persönlichkeiten und Rückmeldungen (Deci/Ryan 1985b). Von einer extrinsischen zur intrinsischen Motivation nimmt die Verhaltensqualität des Menschen zu.

Rheinberg (2008, 15) fasst den Motivationsbegriff wie folgt zusammen:

*„Motivation bezieht sich nicht auf eine fest umrissene und naturalistische gegebene Erlebens- oder Verhaltenseinheit, sondern ist in gewisser Weise eine Abstraktion. [...] Motivation ist die aktivierende Ausrichtung des momentanen Lebensvollzuges auf einen positiv bewerteten Zielzustand.“*

Vollmeyer/Brunstein (2005, 9-10) führen genauer aus, dass sich Motivation in viele Komponenten aufgliedert. Es handelt sich folglich um ein heterogenes Konstrukt mit zwei entscheidende Komponenten: Werte und Erwartungen (Vollmeyer/Brunstein 2005, 10). Weitere Komponenten sind: Selbstbilder, Willensprozesse, Affekte/Emotionen und neurohormonelle Prozesse (Vollmeyer/Brunstein 2005, 10). In Abbildung 2 ist das Grundmodell der klassischen Motivationspsychologie dargestellt.

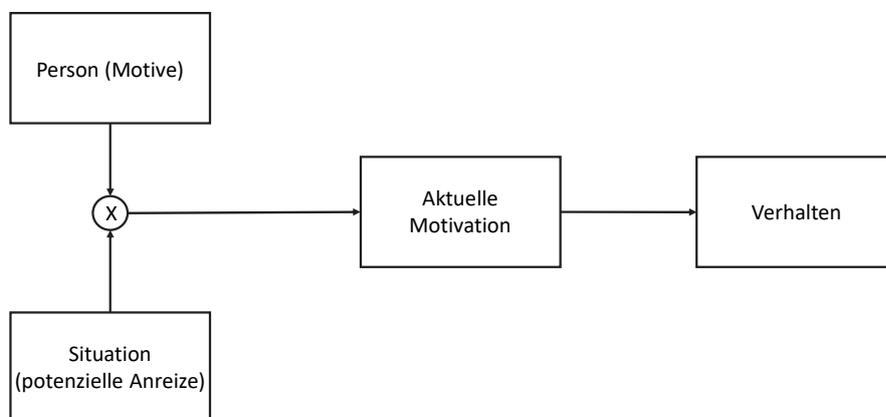


Abbildung 2: Grundmodell der klassischen Motivationspsychologie  
Quelle: Vollmeyer/Brunstein (2005, 11)

Das Modell der Motivationspsychologie ist im Jahr 1980 um die Auswirkungen der Erwartungen erweitert worden (Rheinberg/Krug 2005, 27). Die Erwartungen wirken sich auf die Folgen des Handelns in einer bestimmten Situation aus. In der **Situation** schätzt jede Person bewusst oder unbewusst das Ergebnis seiner Handlung ein (Vollmeyer/Brunstein 2005, 12-13; Heckhausen/Heckhausen 2010, 5-6). Dies wird als S-E-Erwartung bezeichnet. Von seiner **Handlung** erwartet die Person ein bestimmtes Ergebnis, als H-E-Erwartung bezeichnet. Mögliche **Folgen** schließt die Person aus dem Erwarteten, als E-F-Erwartung bezeichnet (Vollmeyer/Brunstein 2005, 12-13; Heckhausen/Heckhausen 2010, 5-6).

Die Folgen können durch Anreize beeinflusst werden (Fogg 2009b). Zu beachten ist, dass Anreize zum Handeln dann sinnvoll sind, wenn eine Kombination von geringer S-E-Erwartung und hoher H-E-Erwartung vorliegt (Heckhausen/Heckhausen 2010, 6). Der Handlungsanreiz verstärkt sich, wenn die erwarteten Folgen hoch sind (Heckhausen/Heckhausen 2010, 6). Beispielhaft bedeutet dies, dass der Fahrer entscheidet Energie sparen oder nicht sparen zu wollen. Eine Entscheidung zum Energiesparen erfolgt, wenn das Ergebnis der Handlung hoch ist und somit „viel“ eingespart werden kann. Viel Energie ist sehr relativ und mit Vorsicht zu betrachten, da weitere Faktoren wie der Gesamtverbrauch des Fahrzeugs, der Verdienst, die persönliche Situation und die Benzinkosten auf diesen Faktor einen Einfluss haben. Der Effekt der Folge würde sich durch höhere Kosten beim Tanken verstärken, da das erwartete Handlungsergebnis höher ist. Zur Verdeutlichung: Ein Benzinpreis von aktuell<sup>1</sup> 1,269 Euro je Liter Benzin gibt weniger Verstärkung als ein Benzinpreis von 5 Euro je Liter. Die Folge ist ebenso ein Entscheidungstreiber für die eingesparte Menge Energie, so kann die Einsparung von kleinen Mengen an Energie eine große Wirkung haben. Das erweiterte kognitive Motivationsmodell von Vollmeyer/Brunstein (2005) ist in Abbildung 3 dargestellt.

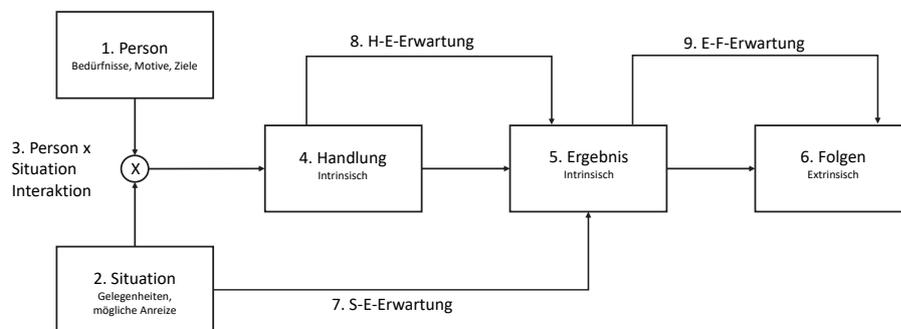


Abbildung 3: Erweitertes kognitives Modell der Motivationspsychologie  
Quelle: Heckhausen/Heckhausen (2010, 5)

Motivation wird von verschiedenen Prozessen getrieben, deren Effekte wissenschaftlich bisher nicht vollumfassend verstanden wurden und näherer Untersuchung bedürfen (Rheinberg 2008, 15-16; Rheinberg/Vollmeyer 2012, 15-16).

In der Wirtschaftsinformatik stellt das Modell der *Theory of Planned Behavior* (TPB) von Ajzen (1991) die Grundlage insbesondere der Akzeptanzforschung dar. Die TPB erweitert die von Ajzen/Fishbein (1975) aufgestellte *Theory of Reasoned Action* (TRA), auch als Theorie des überlegten Handelns bekannt. Die Erweiterung bezieht sich auf Situationen, bei denen Individuen in der Entscheidungsfreiheit eingeschränkt sind (Taylor/Todd 1995). Die TPB geht davon aus, dass die Intention das Verhalten beeinflusst und so ein bestimmtes Verhalten vorhergesagt werden kann (Ajzen/Fishbein 1975). Die Vorhersage der TPB gibt keine Erklärung warum ein Mensch eine bestimmte Intention besitzt. Die Intention wird beeinflusst von Einstellungen gegenüber dem Verhalten, subjektiven Normen und wahrgenommener Verhaltenskontrolle (Ajzen 1991). Unter der **wahrgenommenen Verhaltenskontrolle** ist die eigene Verhaltenskontrolle des Individuums zu verstehen (Högg 2010; Ajzen 1991). Die **subjektive Norm** be-

<sup>1</sup> Stand 28.10.2016, Benzin mit einer Oktanzahl 95 der Sorte E5 in München, an der JET-Tankstelle Frankfurter Ring

zieht sich auf die vermeintliche Erwartungshaltung von wichtigen Bezugspersonen des Individuums (Ajzen 2005, 1991; Högg 2010). Die **Einstellungen** beinhalten die positiven und/oder negativen Gefühle (Högg 2010).

Ajzen (1991) setzt die Bedeutung von Motivation gleich mit der Intention. So erklärt sich die ähnliche Verwendung in den daraus hervorgehenden Akzeptanzmodellen (Venkatesh/Bala 2008; Venkatesh/Davis 2000; Venkatesh et al. 2003; Venkatesh et al. 2012b; Williams et al. 2015). In Abbildung 4 ist das ursprüngliche Modell der TPB dargestellt.

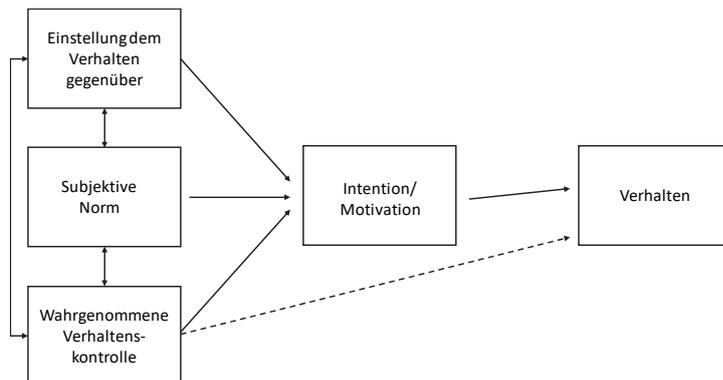


Abbildung 4: Theory of Planned Behavior  
Quelle: In Anlehnung an Ajzen (1991)

Neben der Akzeptanzforschung dient die TPB der zielorientierten Verhaltensforschung als Basis (Perugini/Bagozzi 2001). Daraus ergibt sich, dass das Verhalten von der Motivation abhängt, etwas zu tun oder nicht zu tun. Der Wunsch wird von einem gewünschten Ziel beeinflusst. Das gewünschte Ziel wiederum wird durch die zur Verfügung gestellten Informationen des Energieverbrauchsfeedbacksystems bestimmt. Die Information ermöglicht es dem Menschen, Entscheidungen zu treffen und ist als Einflussgröße zu verstehen.

Loock et al. (2013) betonen den Zusammenhang mit der Erweiterung des Extended Model of Goal-Directed Behavior (EMGB) um eine Feedback-Komponente. Das EMGB, welches auch als erweitertes Modell des zielgerichteten Verhaltens bekannt ist, ist in Abbildung 5 dargestellt.

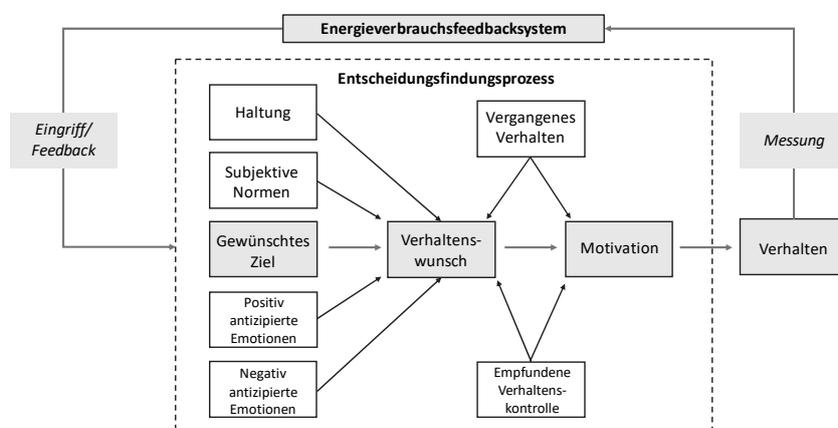


Abbildung 5: Extension of the Extended Model of Goal-Directed Behavior (EMGB)  
Quelle: In Anlehnung an Loock et al. (2013)

Das EMGB von Loock et al. (2013) ist im Kontext der Energieverbrauchsanzeige während des Autofahrens von besonderer Bedeutung, da das Fahren eine zusätzliche Aufgabenschwierigkeit besitzt. Die objektive Aufgabenschwierigkeit findet sich wieder im Risiko-Wahl-Modells von Atkinson (1957). Das Modell zeigt den Zusammenhang zwischen dem Selbstbewertungsanreiz eines Erfolges und der subjektiven Aufgabenschwierigkeit (Atkinson 1957). Die Aufgabenschwierigkeit ist nach den Erkenntnissen von Maslow (1943) das Grundbedürfnis nach dem menschlichen Überleben, welches vor dem Bedürfnis nach einem geringen Energieverbrauch während der Autofahrt steht. Folglich darf die Gestaltung von Energieverbrauchsfeedback nicht das Grundbedürfnis des Überlebens beeinträchtigen und es muss ein hinreichend hoher Anreiz gegeben werden (Fogg 2009b), der zum energiebewussten Fahren verhilft.

Das EMGB nach Stillwater/Kurani (2013) ist ähnlich dem von Loock et al. (2013), so wird das Feedback außerhalb des Verhaltensprozesses eingeordnet. Das Feedback ist jedoch auf den Kontext des Autofahrens bezogen. In Abbildung 6 ist dieses Modell nach Stillwater/Kurani (2013) dargestellt.

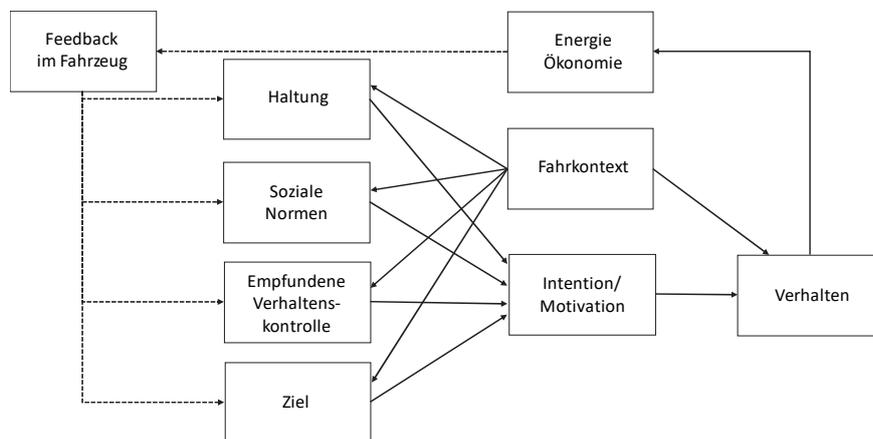


Abbildung 6: EMGB im Kontext von Autofahren  
Quelle: In Anlehnung an Stillwater/Kurani (2013)

Sowohl das Modell von Loock et al. (2013), als auch von Stillwater/Kurani (2013) können angewendet werden. Die Anwendung kann durch Kombination der Modelle vorgenommen werden, da ein Energiefedbacksystem zunächst als unabhängig vom Fahrkontext angesehen werden kann. Der Fahrkontext wirkt somit ebenso wie das Energiefedbacksystem auf das Verhalten des Individuums ein. Der Zusammenhang ist bei Loock et al. (2013) und Stillwater/Kurani (2013) gezeigt, sodass in dieser Arbeit keine weitere Untersuchung der Modelle unternommen werden muss. In Abbildung 7 ist die Kombination der beiden Modelle dargestellt.

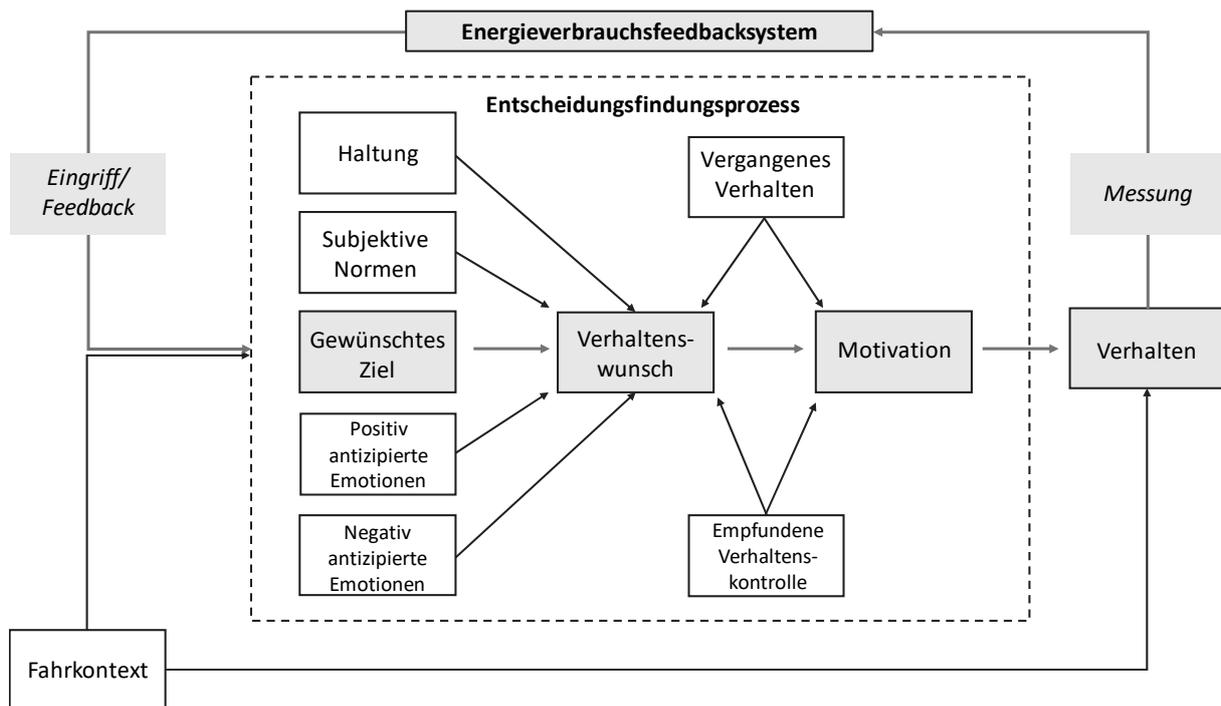


Abbildung 7: Kombination Erweiterung EMGB und EMGB mit Kontext Autofahren  
 Quelle: In Anlehnung an Loock et al. (2013) und Stillwater/Kurani (2013)

Zusammenfassend lässt sich festhalten: Motivation *beeinflusst* das Verhalten (Levesque et al. 2010). Motivation ist die *Energie*, um ein Verhalten durchzuführen (Elliot/Covington 2001) und somit einen Menschen zum Handeln die Motivation *treibt* (*energize*). Falls jemand die Motivation eines Menschen kennt, ist eine *Vorhersage des Verhaltens* möglich (Ajzen 1991, 181). Das Verhalten wird durch ein Feedbacksystem, das dem Benutzer Informationen in einer bestimmten Situation gibt, beeinflusst. Mithilfe von Informationen wird dem Benutzer während der Fahrt von außen ein Feedback gegeben, das Auswirkungen auf sein Verhalten haben kann.

## 2.2.4 Verhalten

Verhalten ist im britischen Englisch als „behaviour“ und als „*the way a person [...] behaves or functions in a particular situation*“ (Wehmeier/Hornby 2000, 100) definiert. Die Definition im amerikanischen Sprachgebrauch unterscheidet sich geringfügig, so ist das Wort „behavior“ hier definiert als „*the way that a person [...] does or say things*“ (Urbom 2000). Im Gabler Wirtschaftslexikon ist Verhalten wie folgt definiert:

*„Verhalten umfasst i. d. R. drei Dimensionen: Handeln, Dulden (Stillhalten, Zulassen) und Unterlassen als Nichthandeln. In einer weitergehenden Differenzierung kann man drei Ebenen von Verhalten unterscheiden:*

- a) Unbewusste, physiologische Reaktionen des Organismus;*
- b) gelernte, routinierte, aber nicht bewusst oder nur unterbewusst gesteuerte Verhaltensweisen;*
- c) bewusstes, gesteuertes Handeln.“ (Siller o. J.-b).*

Der Fokus liegt hier auf der Dimension des Handelns, auf der Ebene des bewussten und durch Informationen gesteuerten Handelns eines Individuums. Informationen beeinflussen das

menschliche Verhalten, wenn der Mensch zum einen motiviert und zum anderen die Anwendung für den Menschen selbst möglich ist (Fogg 2009b). Der Mensch sucht nach Informationen, insbesondere wenn ein Mangel an Informationen vorliegt (Shah/Gardner 2008). Der Mangel kann mit Informationssystemen durch die Bereitstellung an Informationen befriedigt werden. Informationen fungieren somit als Auslöser (Fogg 2009b), welcher einen Einfluss auf das Verhalten und Handeln des Menschen hat.

Fahrverhalten ist das Handeln einer Person beim Autofahren. Unter Autofahren wird verstanden „*the way that sb drives a vehicle*“ (Wehmeier/Hornby 2000, 386).

### 2.3 Das Forschungsdesign

Die Grundlage für das Forschungsdesign ist das methodische Vorgehen, welches in Abschnitt 2.1 eingehender untersucht wurde. Nach dem methodischen Vorgehen leitet sich das Forschungsdesign aus dem Ergebnis der Forschungsfrage 1 ab. Es stellt eine Liste von ITRs dar, bei denen weiterer Forschungsbedarf besteht. Der Forschungsbedarf wird auf zwei ITRs als Untersuchungsobjekte eingegrenzt. Die Untersuchungsobjekte werden experimentell auf einen möglichen Effekt hinsichtlich des Energieverbrauchs ausgewertet.

Zusätzlich soll zwischen motivierten und nicht-motivierten Nutzern von Energieverbrauchsfeedbacksystemen unterschieden werden und deren Effekt auf das Feedback beurteilt werden. Aus diesen Erkenntnissen und den Erläuterungen der Abschnitte 2.1 und 2.2 erschließt sich das Forschungsdesign, welches in Abbildung 8 dargestellt ist.

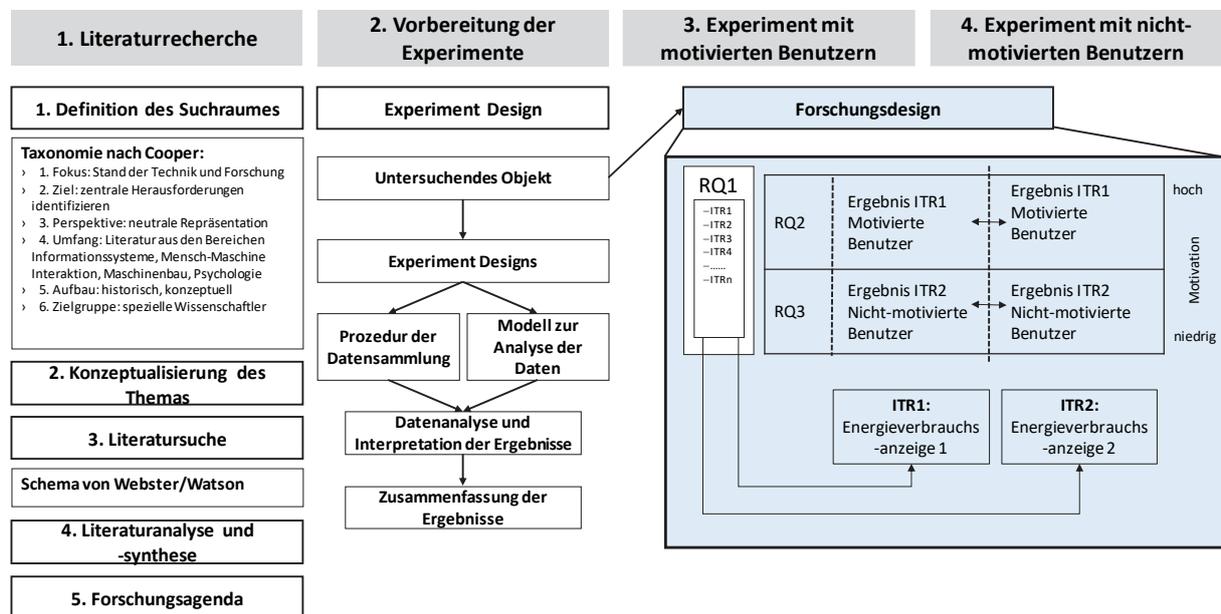


Abbildung 8: Überblick methodisches Vorgehen: Forschungsdesign  
Quelle: Eigene Darstellung

Nachdem das Forschungsdesign in einer ersten Idee dargelegt worden ist, kann zur Beantwortung der Forschungsfrage 1 im nächsten Schritt ein Domänenverständnis entwickelt werden. Das Domänenverständnis verursacht möglicherweise eine Anpassung des Forschungsdesigns, da sich die Anzahl der ITRs erhöhen könnte.

### 3 Domänenverständnis

Zur Erlangung eines Domänenverständnisses von ITRs in der Wirtschaftsinformatik wird basierend auf vom Brocke et al. (2009) eine Literaturrecherche und in Anlehnung an Webster/Watson (2002) eine Vorwärts- und Rückwärtssuche mit *EBSCOHost* und *Google Scholar* durchgeführt.

Im Fokus der Auswertung steht das Energieverbrauchsfeedback, welches dem Benutzer während der Fahrt angezeigt wird. Die Anzeige des Feedbacks wird dem Bereich Automotive Services (Birrell/Fowkes 2014; Pitts et al. 2012; Truschin et al. 2011) und der Mensch-Maschine-Interaktion zugeordnet (Inbar et al. 2011; Meschtscherjakov et al. 2009). Zusätzlich gibt es Berührungspunkte zur Psychologie, die den Einfluss von Computersystemen auf das menschliche Verhalten betrachtet (Fogg 2009c, 2009b, 2002; Jamson/Merat 2005) und der Wirtschaftsinformatik, die den Energieverbrauch behandelt (Dahlinger/Wortmann 2016).

Die aufgeführten Forschungsbereiche sind in den Datenbanken: *EBSCOHost*, *ACM Digital Library*, *IEEE Xplore* und *Google Scholar* erfasst, welche für die Suche herangezogen werden. Zusätzlich zu den von der *Association for Information Systems* (AIS) herausgegebenen Senior's Basket of Journals (AIS 2011) werden in einem weiteren Schritt die Journale *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* (TR-C), *Transportation Research Part D: Transport and Environment* (TR-D), *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation* (TR-E), *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* (TR-F) und *Transactions on Computer Human Interaction* (TCHI) herangezogen. Darüber hinaus werden die Bände der Konferenzen *Computer Human Interaction* (CHI) und *AutomotiveUI* der letzten fünf Jahre betrachtet.

Eine explorative Internetrecherche mit Google ergab, dass eine der ersten Energieverbrauchsanzeigen, welche in einem Katalog verzeichnet ist, aus dem Jahre 1963 oder 1973 stammt und den VW Käfer mit der Bezeichnung 1200/1200 L betrifft (Volkswagen AG 1973, 1963).

Die Suchergebnisse werden nach Relevanz in folgender Reihenfolge untersucht (1) *Titel*, (2) *Abstrakt* und (3) *Schlüsselwörter*. Die Suchwörter sind wegen des Sprachraumes der Journale zusätzlich ins Englische übersetzt.

Die Schlüsselwörter leiten sich aus den bisher genannten Quellen aus den Titeln ab: *Interaction*, *Feedback*, *Eco-Driving*, *Economical*, *Behavior*, *Information*. Zusätzlich ergeben sich aus der Bezeichnung Energieverbrauchsfeedback die Begriffe *Energy* und *Consumption*. Zusätzlich leiten sich aus dem Unterkapitel 2.2 die Suchwörter *Motivation*, *Trigger*, *Display*, *Design*, *Conscious* und *Influence*. Aus den Schlüsselwörtern ergibt sich die in Abbildung 9 veranschaulichte Mindmap zur Literatursuche.

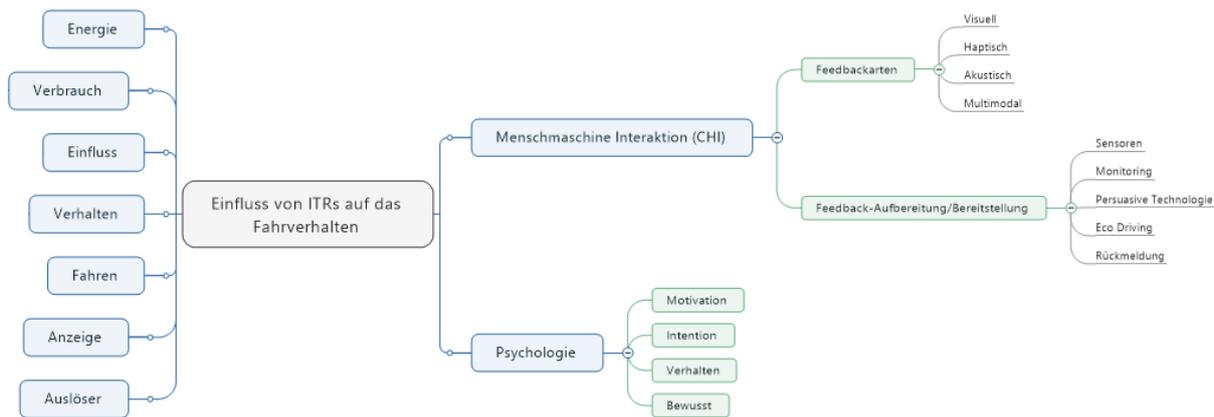


Abbildung 9: Mindmap zur Literatursuche  
Quelle: In Anlehnung an Cooper (1988)

Mit den Begriffen aus Abbildung 9 wird nach Synonymen gesucht, welche in der Literatursuche mit „OR“ verknüpft werden, während die Domäne mit „AND“ verknüpft wird. Die Zusammensetzung der Begrifflichkeiten wurde nach eigenem Ermessen durchgeführt, um eine möglichst hohe Trefferzahl zu erhalten. In Tabelle 3 sind die verwendeten Schlüsselwörter *Energy*, *Feedback*, *Driving* und deren Synonyme dargestellt.

Domäne	Energy	Feedback	Driving
Als Synonym verwendete Begriffe	Energie, Verbrauch bewusst, ökologisch, ökonomisch, wirtschaftlich	Rückmeldung, Einfluss, Motivation, Motivierung, Verhalten, Design, Entwurf, Anzeige, Auslöser, Information, Interaktion	Eco-Driving, energiesparendes Fahren, Fahren, Automotive, Automotive Service, Auto*, Fahrzeug, Verkehrsmittel

Tabelle 3: Übersicht der verwendeten Schlüsselwörter  
Quelle: Eigene Darstellung

Unter Zuhilfenahme der Suchwörter ergibt sich die Suchanfrage. Die Suchanfrage wurde in sieben Schritte unterteilt. Die ersten vier Schritte konzentrieren sich auf die Abdeckung in der Wirtschaftsinformatik und die restlichen drei Schritte ergänzen die Suche um den nicht die Wirtschaftsinformatik betreffenden Anteil.

- 1) Im **ersten Schritt** wurde im Senior’s Basket of Journals (AIS 2011) in der Datenbank ScienceDirect gesucht. Es wurden 33 Treffer ermittelt und nur zwei Artikel (Marett et al. 2013; Dao et al. 2011) gefunden, welche in Betracht kommen.
- 2) Im **zweiten Schritt** wurde der Suchraum erweitert, indem das Schlüsselwort *Feedback* entfernt wurde. Es fanden sich 37 Quellen, wobei auch hier die zwei Artikel aus dem ersten Schritt gefunden wurden. Die Anzahl der Suchergebnisse erscheint im Vergleich zur unsystematischen ersten Suche mit Google als sehr gering.
- 3) Im **dritten Schritt** ist daher der Suchraum von *Energy* auf *Feedback* und *Driving* verschoben worden, sodass sich die Anzahl auf 284 Treffer erhöhte. Trotzdem fanden sich im Senior’s Basket of Journals nicht mehr als die genannten zwei Artikel.
- 4) Im **vierten Schritt** wurde die Anfrage auf die Datenbank EBSCOhost erweitert. Mit der Suche nach *Energy*, *Feedback* und *Driving* gab es 162 Treffer. Jedoch fand sich neben den bekannten Quellen nur ein weiterer Artikel von Malhotra et al. (2013).
- 5) Im **fünften Schritt** wurde der Suchraum ohne Einschränkung auf die Journale durchgeführt, da die Domäne, in den für die Wirtschaftsinformatik signifikanten Journalen,

nicht ausreichend wahrgenommen worden ist. Die Datenbank IEEE Xplore Digital Library erfordert jedoch eine Reduzierung der Komplexität, da nur maximal 15 Suchbegriffe gleichzeitig unterstützt werden. Die Suche wurde mit den Suchbegriffen (*Energy OR ecological OR Consumption*) AND (*Feedback OR Behavior OR Display OR Influence*) AND (*Eco Driving OR Car*) eingegrenzt und ergab 383 Treffer. Es fanden sich 24 eingehender zu betrachtende Artikel.

- 6) Im **sechsten Schritt** wurden zwei zielgerichtete Suchen in der IEEE Xplore Datenbank durchgeführt: (a) (*Energy Consumption Feedback Driv\**) und (b) (*Energy Behavior Design Driving Car*). Es ergeben sich 223 Treffer für die Suchanfrage (a), wobei sechs Artikel: Le/Wang (2010), Liimatainen (2011), Xu et al. (2016), Li et al. (2016), McIlroy et al. (2014) und Li et al. (2014) näher betrachtet wurden. Die zweite Suchanfrage (b) lieferte 18 Treffer, von diesen sind vier Artikel in die engere Auswahl kommen.
- 7) Im **siebten Schritt** wurde die Suche mit der Datenbank ACM Digital Library nach den Konferenzen AutomotiveUI und CHI vervollständigt. Zu der AutomotiveUI Konferenz fanden sich 291 Treffer. 49 wurden für die weitere Untersuchung herangezogen. Die Suchanfrage nach CHI ergab 3201 Treffer. Nach der Sichtung der Titel der ersten 20 Treffer, sortiert nach Relevanz der ACM Digital Library, zeigte sich, dass kein einziger Beitrag zutreffend sei. Deshalb wurde der Suchraum eingeschränkt, sodass zusätzlich das Feld Volltext zwingend die Wörter „Eco“ und „Driving“ enthalten musste. Dies führte zu insgesamt 54 Treffern, von denen 17 Artikel als relevant erschienen.

Insgesamt fanden sich 76 relevant erscheinende Artikel, die eingehender auf Feedbacksysteme zum energieeffizienten Fahren untersucht wurden. Zum energieeffizienten Fahren fanden sich 45 relevante Beiträge, welche in Tabelle 4 aufgeführt sind.

Quelle	Jahr	DB	Feedbackkategorien			
			V	H	A	M
Barbé et al. (2007)	2007	R	1	0	0	0
Birrell/Fowkes (2014)	2014	R	2	0	0	0
Birrell et al. (2014)	2014	R	1	0	0	0
Birrell/Young (2009)	2009	R	2	0	0	0
Birrell/Young (2013)	2013	R	2	0	0	0
Birrell et al. (2010)	2010	R	0	1	0	0
Birrell et al. (2013)	2013	R	0	1	0	0
Boriboonsomsin et al. (2010)	2010	R	1	0	0	0
Burns et al. (2015)	2015	ACM	3	0	0	0
Chau et al. (2016)	2016	ACM	1	0	0	0
Corcoba Magaña/Muñoz Organero (2015)	2015	R	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
Corti et al. (2013)	2013	IEEEEX	3	0	0	0
Dahlinger/Wortmann (2016)	2016	R	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
Frank et al. (2015)	2015	ACM	5	0	0	0
Inbar et al. (2011)	2011	R	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
Jamson et al. (2015a)	2015	R	3	0	0	3
Jamson et al. (2015b)	2015	R	1	0	0	0
Jung et al. (2015)	2015	ACM	2	0	0	0
Kircher et al. (2014)	2014	R	2	0	0	0
Landau et al. (2014)	2014	ACM	0	0	0	1
Lee et al. (2010)	2010	ACM	1	0	0	0
Lee et al. (2011)	2011	ACM	1	0	0	0
Liimatainen (2011)	2011	IEEEEX	1	0	0	0
Loehmann et al. (2014)	2014	ACM	0	0	0	1
Loumidi et al. (2011)	2011	ACM	11	0	0	0
Lundström (2014)	2014	ACM	1	0	0	0
Lundström/Bogdan (2012)	2012	R	1	0	0	0
Lundström/Bogdan (2014)	2014	ACM	1	0	0	0
Lundström et al. (2012b)	2012	ACM	1	0	0	0
Lundström et al. (2012a)	2012	R	1	0	0	0

Quelle	Jahr	DB	Feedbackkategorien			
			V	H	A	M
Madruza Filho et al. (2012)	2012	ACM	2	0	0	0
Magaña/Muñoz-Organero (2011b)	2011	R	0	0	0	0
Magaña et al. (2012)	2012	R	0	0	0	1
Meschtscherjakov et al. (2009)	2009	ACM	3	1	1	0
Meurer et al. (2016)	2016	ACM	4	0	0	0
Pace et al. (2007)	2007	ACM	1	0	0	0
Petkov et al. (2012)	2012	R	0	0	0	0
Riener et al. (2010)	2010	ACM	0	4	0	0
Riener/Reder (2014)	2014	ACM	0	0	0	1
Shahab et al. (2010)	2010	ACM	0	0	2	0
Sohn et al. (2009)	2009	ACM	1	0	0	0
Strömberg et al. (2011)	2011	ACM	2	0	0	0
Tractinsky et al. (2011)	2011	ACM	6		0	0
Wada et al. (2011)	2011	R	0	0	0	0
Wilfinger et al. (2010)	2010	ACM	3	1	1	0
<b>Summe</b>		<b>45</b>	<b>70</b>	<b>8</b>	<b>4</b>	<b>7</b>

Tabelle 4: Domänenverständnis: Ergebnis der Literatursuche

Quelle: Eigene Darstellung, DB = Datenbank/Suchart, ACM = ACM Digital Library, IEEEEX = IEEEExplore, R = Rückwärts-suche, V = Vorwärtssuche, V = visual, H = haptisch, A = akustisch, M = multimodal, k. A. = keine Angaben

In den untersuchten Beiträgen fanden sich 70 visuelle, acht haptische, vier akustische und sieben multimodale ITRs. In der ACM Digital Library fanden sich 23 der 45 Beiträge, zwei in der IEEEExplore und die verbleibenden 20 Beiträge stammen aus der Rückwärtssuche. Die Autorenkollektive um Barbé, Birell, Boriboonsomsin, Jamson und Kricher wurden mehrfach identifiziert und werden somit als Top-5-Autoren betrachtet. Bevor die Beiträge und die damit verbundenen vier Kategorien von Energieverbrauchsanzeigen eingehender untersucht werden können, wird ein einheitliches Verständnis für diese Kategorien geben.

### 3.1 Kategorien von Energieverbrauchsanzeigen

Energieverbrauchsanzeigen geben dem Fahrer ein Signal, das er über einen Sinneskanal empfängt und der als Interaktionskanal bezeichnet wird. Die Interaktionskanäle teilen sich in die bekannten vier Kategorien (1) visuell, (2) haptisch, (3) akustisch und (4) multimodal.

#### 3.1.1 Visuell

Nicht-fahrkontextabhängige Informationen des visuellen Interaktionskanals können, wenn notwendig ignoriert werden (Kircher et al. 2014). Jedoch ist der visuelle Interaktionskanal bereits durch das Fahren ausgelastet. Deshalb kann es schwierig sein, einen effizienten Warnhinweis zu geben, wenn dieser visuell nicht ausreichend ausgeprägt ist. Andererseits kann bei einem zu aufdringlichen Hinweis eine visuelle Ablenkung des Fahrers erfolgen (Feng/Donmez 2013), sodass der Fahrer seinen Blick von der Straße abwenden und sich auf den Hinweis konzentrieren muss. Bei der Konzentration auf die Information rückt die Verkehrsumgebung in den Hintergrund, sodass auch Head-up-Displays das Problem nicht effektiv lösen (Kircher et al. 2014).

Die Begrifflichkeiten *Hinweis* (Sumikawa 1985) und *Feedback* (Dahlinger/Wortmann 2016; Birrell et al. 2010; Froehlich et al. 2010) sind in der Literatur nicht eindeutig benutzt (Bång et al. 2009), werden jedoch in dieser Arbeit synonym verstanden.

Eine *zu hohe Informationsdichte* im visuellen Sichtfeld des Fahrers, welche durch visuelle Feedbacksysteme erhöht wird, führt zu einer erhöhten kognitiven Beanspruchung des Fahrers

(Blanco et al. 2006). Zur Reduzierung der kognitiven Last sollte nur die Darstellung notwendiger Informationen erfolgen.

Die Darstellungsmöglichkeiten von visuellem Feedback können sehr komplex sein<sup>2</sup>. Durch *Farben* kann die Lesbarkeit visueller Information verbessert werden (Thalen 2006), dafür sollten bekannte Farbkodierungen verwendet und konsistent eingesetzt werden (Thalen 2006). Zu viele Farben können die Lesbarkeit verschlechtern, da die Informationsdichte erhöht wird (Thalen 2006). Denn je höher die Informationsdichte ist, desto höher wird die Suchzeit nach einer bestimmten Information (Thalen 2006). Außerdem werden Symbole oder Texthinweise verwendet. Die textuellen Informationen sollte kurz und innerhalb eines bestimmten Zeitrahmens erfassbar sein (Thalen 2006). *Texthinweise* können *Symbole* ersetzen oder unterstützen (Thalen 2006). Symbole können grundsätzlich schneller verarbeitet werden als Texte (Benbasat/Todd 1993).

Im Fahrzeug kann visuelles Feedback an verschiedenen *Orten* erfolgen, wie am Armaturenbrett oder als Head-up-Display an der Windschutzscheibe (Feng/Donmez 2013; Ablaßmeier et al. 2007). Die Orte werden in drei Bereiche unterteilt. Die Bereiche werden nach Priorität der primären, sekundären oder tertiären Fahraufgabe zugeordnet. Eine primäre Aufgabe liegt im Bereich der Windschutzscheibe (Ablaßmeier et al. 2007). Sekundäre Aufgaben finden sich im Bereich des Lenkrads und des Armaturenbretts (Ablaßmeier et al. 2007). Tertiäre Aufgaben, die nicht zum eigentlichen Fahren gehören, finden am Armaturenbrett rechts vom Lenkrad statt (Ablaßmeier et al. 2007).

### 3.1.2 Haptisch

Haptische Schnittstellen werden in zwei verschiedenen Typen klassifiziert: taktile und kinästhetische (El Saddik et al. 2011, 82-83).

Im Vergleich zu akustischer und visueller Kommunikation ermöglicht die Haptik das Senden von Informationen, zum Beispiel durch das Tippen auf einer Tastatur. (El Saddik et al. 2011, 4). Haptische Informationen können bidirektional übertragen werden. Die Übertragung kann im Vergleich zu visuellen oder akustischen Reizen, welche an einer bestimmten Stelle (Sehnerv oder Innenohr) empfangen werden, am ganzen Körper in verschiedenen Formen wahrgenommen werden. Die Empfangsform kann *thermisch* über Temperaturrezeptoren, *schmerzhaft* über Schmerzrezeptoren oder *tastend* über Tasterezeptoren sein. In der Arbeit liegt der Fokus auf dem Tastsinn aus einer Kombination von kinästhetischer und taktiler Wahrnehmung. Ein Tastsinn, welcher durch einen „Druck“ ausgeübt wird, ist eine mechanische Produktion von Informationen (El Saddik et al. 2011, 5) und kann sowohl die kinästhetische Wahrnehmung adressieren (Englisch: force feedback) als auch durch Vibrationen die tastbare/fühlbare Wahrnehmung (Englisch: vibrotactile feedback) (Oxford-Online-Dictionary 2017). Die Wahrnehmung ist je nach Körperregion und -teil unterschiedlich.

---

<sup>2</sup> Weiterführende Handlungsempfehlungen zu Farben und Texthinweisen finden sich bei Thalen (2006).

Im Kontext von Mensch-Maschine Interaktion kann haptisches Feedback sowohl kinästhetisch oder taktil als auch beides sein (El Saddik et al. 2011, 5). Unter der **Kinästhetik** wird das Erfühlen und Manipulieren von Objekten verstanden (El Saddik et al. 2011). Beim Manipulieren wird ein Gegenstand von einem Platz A an einen Platz B verrückt. Das Erfühlen von Objekten ist die Wahrnehmung ihrer Gestalt mittels Betasten. **Taktil** teilt sich in drei weitere Untergruppen auf: taktile Wahrnehmung, reibungsinduzierte Phänomene und lokale Funktionen von Objekten (El Saddik et al. 2011, 83). Unter lokalen Funktionen von Objekten sind Eigenschaften wie Form, Ecken, Prägung zu verstehen (El Saddik et al. 2011, 83). Reibungsinduzierte Phänomene sind die Wahrnehmung von Gleiten, Adhäsion und von Mikrofehlern (El Saddik et al. 2011, 83). Die taktile Wahrnehmung umfasst Druck, Puktion, Textur, thermale Eigenschaften, Sanftheit und Feuchtigkeit (El Saddik et al. 2011, 83).

Der haptische Begriff ist somit als Oberkategorie zu verstehen, welcher mehrere Untergruppen umfasst. In Abbildung 10 ist die Untergliederung der Haptik dargestellt.

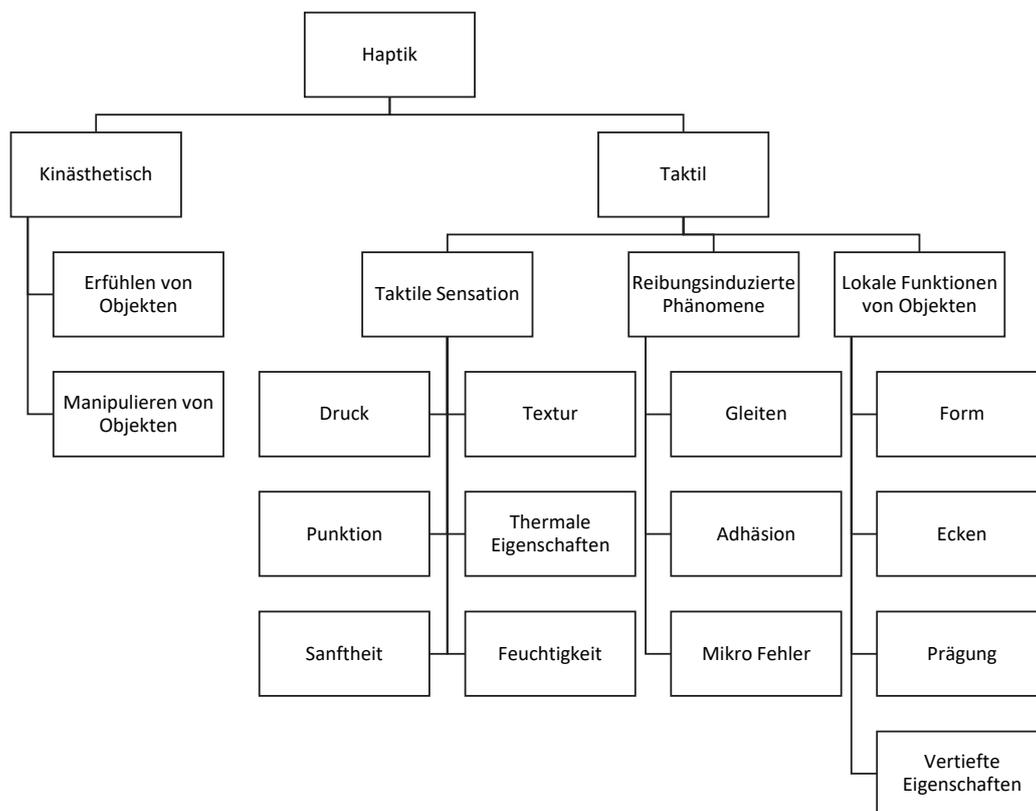


Abbildung 10: Nachbildbare gerätaefähige kinästhetische und taktile Schnittstellen  
 Quelle: In Anlehnung an El Saddik et al. (2011, 5-6, 82 ff.)

### 3.1.3 Akustisch

Beim akustischen Feedback wird zwischen *non-verbalem* und *verbalem Feedback* unterschieden (Argyle et al. 1970; Nees et al. 2014). **Verbale** Hinweise sind gesprochene Informationen. Die Informationen benötigen keine Erklärung und somit keine Lernphase (Nees et al. 2014). Jedoch haben sie den Nachteil, möglicherweise störend zu wirken oder eine momentan stattfindende Konversation zu beeinträchtigen (Nees et al. 2014). Zur Reduzierung der Beeinträchtigung sollten verbale Hinweise möglichst kurz gehalten werden (Thalen 2006). **Non-verbale** Hinweise sind Geräusche, die aus dem Alltag bekannt sind, welche im Gegensatz zu verbalen

Hinweisen eine Lernphase benötigen, um die verschiedenen Hinweise oder Feedbacks interpretieren und verstehen zu können.

Als Feedbackgeber werden „Auditory Icons“ und „Earcons“ genannt. Sumikawa (1985) definiert **Earcons** als „[...] audio cues used in the computer-user interface to provide information and feedback to the user about some computer object, operation, or interaction.“ Eine weitere Definition stammt von Amann (2012, Anmerkung des Verfassers im Original hervorgehoben): „Ein Earcon ist ein kurzes Ton-Stück, das Bedeutung trägt oder tragen kann. In der Regel ist es ein Indikator für komplexere Ereignisse. Earcons werden z. B. als akustische Warnsignale für Piloten eingesetzt – dann steht etwa ein blubberndes Geräusch für ein Leck im Ölsystem. [...]“. Hier werden unter einem Earcon kurze, abstrakte, melodische Töne verstanden. **Auditory Icons** basieren auf bereits vorhandenen Tönen wie Motorgeräuschen und übertreiben diese, um einen erhöhten Benzinverbrauch durch einen akustischen Hinweis anzuzeigen (Nees et al. 2014). Für Auditory Icons ist im Allgemeinen ein geringerer Lernaufwand als für Earcons notwendig (Nees et al. 2014). Bei mehreren Signalen sollten sich die Töne im Klang von den fahrzeugeigenen Geräuschen unterscheiden, um eine Verwechslung ausschließen zu können (Nees et al. 2014).

### 3.1.4 Multimodal

Ein Interaktionskanal wird als multimodal bezeichnet, wenn mehrere Sinne an der Verarbeitung des Feedbacks beteiligt sind. Der multimodale Interaktionskanal ist hier eine Kombination aus visuellem, haptischem und/oder akustischem Feedback.

## 3.2 Feedbackarten

Es werden drei Arten von Feedback unterschieden: Post-Trip-Feedback, In-Trip-Feedback und Pre-Trip-Feedback (Seewald et al. 2013).

**Pre-Trip-Feedback** gibt Rückmeldung über Zustände, die vor der Fahrt berücksichtigt werden können, um energieeffizienter zu fahren (Seewald et al. 2013). Ein Beispiel ist die Auswahl der energieeffizientesten Route vor dem Fahrtantritt (Seewald et al. 2013). Im Vorfeld sind jedoch die auftretenden Ereignisse während der Fahrt nicht vollständig bekannt. So kann sich beispielsweise ein Stau bilden, der zu einer Stop-und-Go-Fahrweise auf einem Streckenabschnitt führt. Strecken, die vor der Fahrt als weniger energieeffizient identifiziert wurden, könnten im tatsächlichen Fahrablauf energieeffizienter sein. Mögliche Staus auf der Strecke kann Pre-Trip-Feedback berücksichtigen und Ausweichrouten empfehlen oder geografische Aspekte einkalkulieren (Trommer/Hörtl 2011).

**In-Trip-Feedback** gibt Rückmeldung zur aktuellen Performance hinsichtlich des Energieverbrauchs sowie vorausberechnete Hinweise wie Abbiegen oder eine veränderte zulässige Geschwindigkeit (Seewald et al. 2013). In der Literatur findet sich auch die Begrifflichkeit des On-Trip-Feedbacks, welche als Synonym betrachtet werden kann (Trommer/Hörtl 2011). In-Trip-Feedbacksysteme sind in den meisten Fällen visueller Art (Dahlinger/Wortmann 2016). Visuelles Feedback während der Fahrt kann *kontinuierlich* oder *nicht kontinuierlich*, auch als

*intermittierend* bezeichnet, sein. Ein **intermittierendes** Signal ist in der zeitlichen Abfolge unterbrochen (Kircher et al. 2014). Nicht-kontinuierliche Informationen sollten nur gegeben werden, wenn der Hinweis benötigt wird (Kircher et al. 2014), um die Informationen auf notwendige Störungen zu reduzieren (Kircher et al. 2014). Die Reduktion durch intermittierende Informationen führt zu einer geringeren Fahrablenkung sowie einer signifikant kürzeren Verweilzeit des Blickes auf der Anzeige (Kircher et al. 2014). Die **kontinuierliche** Informationswiedergabe hingegen ermöglicht es Informationen an den Fahrer nach seinen eigenen Bedürfnissen weiterzugeben (Kircher et al. 2014).

**Post-Trip-Feedback** gibt detaillierte und verständlichere Informationen als Rückmeldung, welche als Analyse nach der Fahrt erfolgt (Feng/Donmez 2013, 26). Bei der Analyse werden die Fahrdaten, welche während der Fahrt gesammelt wurden, aufbereitet und anschließend beispielsweise als Statistik angezeigt (Seewald et al. 2013). Somit wird dem Fahrer vermittelt, wann er energieeffizienter hätte fahren können (Feng/Donmez 2013, 26), sodass eine Spezifizierung des Verhaltens ausgemacht werden kann, wie ineffiziente Fahrweisen in bestimmten Fahrabschnitten durch eine zu hohe oder zu niedrige Auswahl der Gänge (Trommer/Hörtl 2011). Es kann detailliertes Feedback erfolgen, da eine Ablenkung von der primären Fahraufgabe offensichtlich nicht möglich ist.

Post-Trip-Systeme sollen den Fahrer nicht nur zum energiesparenden Fahren motivieren, indem positive Ergebnisse dem Nutzer vermittelt sowie Zusammenfassungen oder Statistiken von der Fahrweise generiert werden (Seewald et al. 2013), sondern auch das sichere Fahren fördern. Beispielsweise sei das Geschäftsmodell der Allianz AG mit der Bezeichnung „BonusDrive“ genannt (Allianz Deutschland 2016; Allianz 2016). BonusDrive ist ein Telematik Tarif, welcher die einzelnen Fahrmanöver auswertet und anhand der Sicherheit des Fahrverhaltens den Tarif anpasst. So hat das nächtliche Fahren auf einer Landstraße eine höhere Risikoeinstufung als das Fahren am Tage auf einer Autobahn.

### 3.3 Das Feedback beeinflussende Komponenten

Feng/Donmez (2013) unterscheiden vier Komponenten von Feedback: Verhalten, Wahrnehmung, Persönlichkeit und Sozial.

- 1) Die Komponente *Sozial* beinhaltet gesellschaftliche Einflüsse auf das Fahrverhalten (Feng/Donmez 2013). So werden Auswirkungen von Informationen auf die Interaktion des Fahrers durch soziale Normen erklärt (Feng/Donmez 2013).
- 2) Die Komponente *Persönlichkeit* enthält persönliche Eigenschaften wie Selbstwirksamkeit und Kontrollüberzeugung, von Rotter (1966) bezeichnet als „locus of control“ (Feng/Donmez 2013).
- 3) Die Komponente (kognitive) *Wahrnehmung* beinhaltet Aufmerksamkeits- und Erinnerungsprozesse (Feng/Donmez 2013).
- 4) Die Komponente *Verhalten* kennzeichnet Mechanismen, welche durch Informationen (Feedback) zu einer Verhaltensveränderung führen können (Feng/Donmez 2013). Die Arbeit fokussiert sich auf die Komponente *Verhalten*.

### 3.4 Ergebnisse der Literatursuche

Die in der untersuchten Literatur gefundenen ITRs werden anhand der vier Kategorien visuell, haptisch, akustisch und multimodal eingehender betrachtet.

#### 3.4.1 Visuell

Es wurden 70 Quellen mit visuellen Feedbacksysteme identifiziert. Die Feedbacksysteme werden analysiert auf das verwendete Messverfahren, die Einheit und Feedbackart. Es wird ein zwei-stufiger Ansatz angewendet. Im ersten Schritt werden die Feedbacksysteme nach Beitrag wegen der einheitlichen Verwendung von Messverfahren und Einheiten betrachtet. Im zweiten Schritt werden die Gemeinsamkeiten und die Unterschiede herausgearbeitet.

Azzi et al. (2011) verwenden basierend auf der Darstellung von American Honda Motor Company (2008), eine sieben Zoll große Anzeige in der Mittelkonsole des Fahrzeugs. Die Anzeige gibt ein In-Trip-Feedback zum Energieverbrauch. Dazu werden der Gaspedalwinkel und die Beschleunigung gemessen (Azzi et al. 2011). Für die Berechnung eines Optimums an Energieverbrauch wird die optimale Beschleunigung ( $Acc_{opt}$ ) im Vergleich zur aktuellen Beschleunigung ( $Acc_{veh}$ ) des Fahrzeugs in Relation zum Winkel des Gaspedals ( $X_{pedal}$ ) mit der Steifigkeit des Gaspedals ( $K$ ) in Verbindung gesetzt, um einen normalisierten Gegenhaltedruck ( $F_{additional}$ ) zu berechnen (Azzi et al. 2011). Daraus ergibt sich die folgende Formel:

$$F_{additional} = K X_{pedal} \left( \frac{\Delta Acc}{Acc_{opt}} \right) \quad 3.1$$

wobei

$$\Delta Acc = Acc_{veh} - Acc_{opt} \quad 3.2$$

ist (Azzi et al. 2011).

Corti et al. (2013) geben dem Fahrer In-Trip-Feedback mit einer Smartphone-Applikation. Mit dem Programm untersuchen sie drei Feedbacksysteme in Bezug auf die Menge der anzuzeigenden Eco-Driving-Informationen. Anzeige (a) hat einen Energie Index, (b) einen Crusing Index und (c) einen Aggressivitätsindex. Anzeige (b) und Anzeige (a) gleichen sich bis auf den Aspekt, dass der Energieindex fehlt; Anzeige (c) besteht ausschließlich aus dem Aggressivitätsindex (Corti et al. 2013). Die drei Indexes werden gemessen über (1) Querbeschleunigungen, (2) Reibungsverluste und (3) Beschleunigung/Verzögerung (Corti et al. 2013). Das Feedback führt zu einem geringeren Verbrauch von 20 bis 30 % (Corti et al. 2013).

Hiraoka et al. (2009) zeigen den aktuellen Verbrauch und den Durchschnittsverbrauch als In-Trip-Feedback in km/l auf dem **FC-meter** an. Zusätzlich werden eine Geschwindigkeitsanzeige, eine Ganganzeige sowie eine Warnlampe zum Einhalten des optimalen Abstands zum vorausfahrenden Fahrzeug bereitgestellt. Die Variablen zur Berechnung des optimalen Abstands sind in der Studie nicht belegt. Offen bleibt, was unter dem optimalen Abstand zu verstehen ist und welche externen Einflüsse wie Straßenbelag, Oberflächenbeschaffenheit, Reifengröße, Reifenart oder Temperatur diesen beeinflussen. Der Gebrauch des FC-meters führt zu einen um 7,1 % geringeren Energieverbrauch (Hiraoka et al. 2009).

Der **Eco-Navigator** zeichnet verschiedene Parameter auf, welche kumuliert nach der Fahrt und teilweise während der Fahrt angezeigt werden (Boriboonsomsin et al. 2010). *In-Trip* werden der Energieverbrauch in mpg oder die Motorleistung visualisiert, um das Fahrverhalten zu beeinflussen (Boriboonsomsin et al. 2010). Als Einflussgrößen, aus welchen ein geringer Energieverbrauch resultiert, geben Boriboonsomsin et al. (2010) das Schaltverhalten, eine gleichbleibende Geschwindigkeit, sanfte Beschleunigung und weiches Bremsen sowie das Ausschalten des Motors an. *Post-Trip* werden die genannten Fahrdaten zusammengefasst und ergänzt um den Gesamtverbrauch, die CO<sub>2</sub>-Emissionen, die Durchschnittsgeschwindigkeit, den Durchschnittsverbrauch in mpg, die maximale Geschwindigkeit, den maximalen Energieverbrauch in Galonen/Stunde, die Fahrzeit, den Fahrtbeginn und das Fahrtende (Boriboonsomsin et al. 2010).

Jamson et al. (2015a) betrachten drei verschiedene visuelle Darstellungsmöglichkeiten: **Dot Eco-Driving**, **Gauge Eco-Driving** und **Foot Eco-Driving**. Die drei Feedbacksysteme werten anhand des Gaspedalwinkels aus, ob der Fahrer einen zu geringen, einen optimalen oder einen zu starken Gaspedaldruck gegenüber einem kalkulierten Pedalerror ausübt. Für die Berechnung des Pedalerrors werden zwei Fahrsituationen unterschieden: die gleichbleibende Geschwindigkeit und die beschleunigende Geschwindigkeit. Für die **gleichbleibende Geschwindigkeit** beträgt der Pedalerror 7 % (Jamson et al. 2015a). Der Pedalerror besitzt eine Toleranz von  $\pm 1$  %, in welcher ein optimaler Fahrstil vorliegt. Bei einem optimalen Fahrstil wird die Anzeige grün dargestellt (Jamson et al. 2015a). Bei einer Abweichung ab +5 % ändert sich die Farbe zu rot (zu starke Beschleunigung) und ab -5 % zu blau (zu geringe Beschleunigung) (Jamson et al. 2015a). Zur Berechnung wird angenommen, dass ein Pedal mit einem Winkel von 100 % nicht gedrückt ist (Jamson et al. 2015a). Beispielhaft ergeben sich folgende Intervalle: Bis 99 % einschließlich wird die Farbe blau angezeigt, zwischen (99 %; 94 %) ändert sich die Farbe von blau auf grün, von [94 %; 92 %] ist die Anzeige grün, von (92 %; 87 %) ändert sich die Farbe zu rot und von [87 %; 0 %] bleibt die Farbe rot. Bei **beschleunigender Geschwindigkeit** wird der Pedalerror mit 23 % und gleichen Toleranzwerten angegeben (Jamson et al. 2015a).

Nach Klarstellung der Berechnung kann auf die Darstellung der drei Feedbacksysteme genauer eingegangen werden. Das *Dot Eco-Driving* zeigt einen Punkt, welcher sich entsprechend des Pedaldrucks intermittierend in der Farbe ändert. Das *Gauge Eco-Driving* stellt einen Farbverlauf dar, welcher sich kontinuierlich ändert. Das *Foot Eco-Driving* symbolisiert mit einem Schuh die Fußstellung des Fahrers sowie eine gestrichelte optimale Linie (kalkulierter Pedalerror). Die Fußstellung ändert sich kontinuierlich, während die farbliche Änderung intermittierend erfolgt. In Abbildung 11 sind die drei genannten Eco-Driving-Anzeigen dargestellt.



Abbildung 11: Eco-Driving Anzeigen: a) Dot, b) Gauge und c) Foot  
 Quelle: Jamson et al. (2015a)

Kircher et al. (2014) betrachten zwei unterschiedliche Arten von In-Trip-Feedback: kontinuierlich und intermittierend am Beispiel von Lastkraftwagen. Die Lastkraftwagenfahrer sollen auf optimales Beschleunigen und Verzögern auf Strecken mit unterschiedlichen Höhenprofilen mit Informationen hingewiesen werden (Kircher et al. 2014). Die Grundinformationen sind: Geschwindigkeit, Beschleunigung, Verzögerung und Fahrprofil der Strecke. Die Nebeninformationen stehen auf einer Skala mit maximal fünf Sternen. Kein Stern steht für maximal ineffizientes Fahren am Berg, während fünf Sterne bedeuten, dass das Fahren maximal effizient (optimal) ist. Zusätzlich werden das Gewicht des Fahrzeugs, die Fahrzeit, die aktuelle Zeit, die Tankanzeige und die Motoröltemperatur angezeigt. Die Anzeige weist keine signifikanten Unterschiede im Energieverbrauch auf. Die Ergebnisse werden mit einem nicht-signifikanten Unterschied des Energieverbrauchs ( $p = 0,12$ ) zwischen kontinuierlichen und intermittierenden Anzeigen von Madruga Filho et al. (2012) untermauert. Somit können beide Anzeigen äquivalent für eine Untersuchung verwendet werden. Zur Messung der Unterschiede wird als abhängige Variable die gefahrene Strecke in km herangezogen. Ähnlich zu Kircher et al. (2014) verwenden sie kontinuierliches und intermittierendes Feedback während der Fahrt, jedoch in einem spielerischen Ansatz, um Eco-Driving als Lernmethode zu verwenden (Madruga Filho et al. 2012).

Lee et al. (2010) stellen basierend auf der Anzeige von KIA in der Geschwindigkeitsanzeige einen von drei „ECO“-Status dar. So wird je nach Fahrweise ein ECO-Symbol angezeigt: grün für energieeffizient, weiß für normal und rot für ineffizient (Lee et al. 2010). Die Visualisierungen führten zu einem signifikant höheren Energieverbrauch, der Effekt war somit negativ (Lee

et al. 2010). Die Auswertung war in ein Experiment ( $N = 14$ ) und eine Umfrage ( $N = 60$ ) unterteilt (Lee et al. 2010). Das Durchschnittsalter der Befragten betrug ca. 30 Jahre, was die Autoren zu der Schlussfolgerung brachte, dass das Alter einen Einfluss auf den Energieverbrauch ausüben könnte (Lee et al. 2010). Die Untersuchungen führten zu weiteren Fragen, zum Beispiel wie die Berechnung der verschiedenen Status erfolgen kann und was unter einer normalen Fahrweise zu verstehen ist. Die Studie selbst sieht zukünftigen Forschungsbedarf bei der Nutzung von Persuasive Technology, um energieeffizientere Anzeigen zu gestalten (Lee et al. 2010), was durch eine Langzeitstudie bestätigt wird (Lee et al. 2011).

Liimatainen (2011) verwendet ein Post-Trip-Feedback, welches Busfahrern nach der Fahrt einen Bericht anfertigt. Der Bericht enthält u. a. Informationen zum Energieverbrauch in l/100 km bzw. mpg<sup>3</sup> (Liimatainen 2011). Für die Auswertung sind Daten vom CAN-Bus (Controller Area Network) verwendet worden: Identifikationsnummer des Fahrzeugs, Energieverbrauch insgesamt, Anzahl an Bremsvorgängen mit Unfall, Zeitspannen für bestimmte Motordrehzahlen, Durchschnittsgeschwindigkeit und Betriebszeit insgesamt (Liimatainen 2011). Der CAN-Bus ist in der ISO 11898-1:2015 spezifiziert und ist ein spezielles System zur Datenübertragung auf physischer Ebene (ISO 2015). Mit den Daten konnte gezeigt werden, dass Eco-Driving-Feedback einen positiven Einfluss auf die Reduzierung des Energieverbrauchs hat (Liimatainen 2011). Des Weiteren können anhand der Berichte Fahrer identifiziert werden, die einen geringeren oder einen höheren Energieverbrauch als der Durchschnitt aufweisen und deren Fahrstile somit besonders effizient oder ineffizient sind (Liimatainen 2011). Außerdem gingen die Anzahl der Unfälle und deren Kosten um 14 bis 40 % zurück (Liimatainen 2011), sodass Eco-Driving Feedback somit zu einer sicheren Fahrweise führt und u. a. Versicherungskosten reduziert.

Das **SMobil** Feedback vergleicht vier persuasive Energieverbrauchsfeedbacks: Bewusstsein, Emotion, Gamification und soziale Norm, welche Pre-Trip oder Post-Trip verwendet werden (Meurer et al. 2016). Die Studie zeigt, dass nicht-motivierte Nutzer konkrete Anreize in Form einer Belohnung benötigen, um ihr Verhalten zu ändern (Meurer et al. 2016). Die Verhaltensänderung, welche durch Eco-Driving beeinflusst wird, wird Eco-Feedback genannt (Froehlich et al. 2010). Für die Gestaltung von Eco-Feedback ergeben sich zwei Erkenntnisse, welche ein Einsparungspotenzial ausweisen: (1) Der Energieverbrauch sollte im Fokus stehen und erst dann das Eco-Feedback als solches und (2) den Benutzern sollte das Feedback Informationen geben, damit sie energieeffizienter fahren können (Meurer et al. 2016). Diese Ergebnisse sind jedoch bisher nicht validiert worden.

Das **Automatic Eco System** (Meschtscherjakov et al. 2009; Wilfinger et al. 2010) basierend auf dem „Honda ECON Mode“ (Meschtscherjakov et al. 2009) und kann durch Drücken des „EcoButton“ deaktiviert und aktiviert werden. Ist das System aktiv, reduziert es automatisch den Benzinverbrauch, indem es verschiedene Parameter im Fahrzeug anpasst. So werden die automatische Klimaanlage in einen Sparmodus und der Motor an roten Ampeln in den Leerlaufmodus geschaltet. Am Ende jeder Fahrt wird der durch den Eco-Modus eingesparte Benzinverbrauch in Litern angezeigt. Die Information zielt darauf ab, den Fahrer zum Nutzen

---

<sup>3</sup> US-Meilen pro Gallon

des Automatic Eco Systems zu bewegen (Meschtscherjakov et al. 2009). Wie jedoch erhoben wird, welche Menge an Benzin eingespart wurde, bleibt offen.

Systeme mit Echtzeitfeedback werden von mehreren Autoherstellern vorgeschlagen. Hondas „Ambient Meter“ ist ein Tachometerhintergrund, der den Fahrer mithilfe von Farben über die aktuelle Fahrsituation informiert: von grün für effizientes, über blaugrün für weniger effizientes bis hin zu blau für verschwenderisches Fahren. Hondas „Ecological Drive Assist System“ ist ein ähnliches System (Meschtscherjakov et al. 2009; American Honda Motor Company 2008). Das Feedbacksystem benutzt die Hintergrundbeleuchtung des Tachometers, um Unterschiede in der energieeffizienten Fahrweise dem Fahrer in Echtzeit zu verdeutlichen. Energieeinsparende Fahrweisen wie sanftes Beschleunigen oder Bremsen lassen die Anzeige grün leuchten (American Honda Motor Company 2008), während eine weniger effiziente Fahrweise den Tacho blaugrün und aggressives Beschleunigen sowie Bremsen zu einem blauen Leuchten führt (American Honda Motor Company 2008). Ähnliche Systeme finden sich bei Nissan und Toyota (Meschtscherjakov et al. 2009).

Der **Eco Speedometer** umrandet das traditionelle Tachometer und basiert auf den im vorherigen Absatz vorgestellten Systemen der Praxis zum Geben von Echtzeitfeedback für einen energieeffizienten Fahrstil (Meschtscherjakov et al. 2009). Bei einer energieeffizienten Fahrweise leuchtet die Anzeige grün, ansonsten gelb (Meschtscherjakov et al. 2009). Für die Darstellung wird die Anzahl an Motorumdrehungen pro Minute herangezogen (derStandard.at 2009). Allerdings ist das Feedback abstrakt und gibt keinen Hinweis auf Maßnahmen für den Fahrer, um einen energieeffizienten Fahrstil zu ermöglichen (Meschtscherjakov et al. 2009).

Das **Eco Display** visualisiert die Energieeffizienz gemessen am Kraftstoffverbrauch für die aktuelle Fahrt (Meschtscherjakov et al. 2009). Je energieeffizienter gefahren wird, desto mehr grüne Blätter werden angezeigt. Zur Ermittlung der Anzahl der Blätter wird für jede Fahrt ein „EcoScore“ berechnet, der am Ende der Fahrt zusammen mit Informationen zu gefahrenen Kilometern und durchschnittlichem Verbrauch angezeigt wird. Der EcoScore gibt dem Fahrer die Möglichkeit des Vergleichs von verschiedenen eigenen Fahrten oder mit Fahrten anderer Fahrer. Wird mit anderen Fahrern verglichen, so wird ein Rang ermittelt. Der erreichte Rang wird ebenfalls im Eco Display angezeigt (Meschtscherjakov et al. 2009). Das Eco Display ist ein spielerischer Ansatz, welcher als „Gamification“ einzuordnen ist (Meschtscherjakov et al. 2009). Ziel ist es, spielerisch das langfristige Nutzerverhalten zu ändern, indem die Anzeige Informationen über einen längeren Fahrzeitraum liefert (Meschtscherjakov et al. 2009).

Ein ähnliches System wurde von Ford vorgestellt, in dem die langfristige Kraftstoffeffizienz durch eine steigende Anzahl an Blättern und Weinreben visualisiert wird (Ford Motor Company 2016).

Burns et al. (2015) testeten drei Feedbackanzeigen: (1) Beschleunigung und Verzögerung, (2) Emissionen sowie (3) Reisekosten. Sie konnten zeigen, dass die Anzeige (1) zum geringsten Energieverbrauch geführt hat (Burns et al. 2015). Ähnlich verhielt sich das Feedback der Emissionen (Burns et al. 2015). Die geringste Energieeffizienz lag bei der Feedbackanzeige (3) Reisekosten vor (Burns et al. 2015).

Das **Celerometer** ermöglicht es dem Fahrer seine Beschleunigungs- und Verzögerungs-Verhaltensweisen sowie den Verbrauch im Leerlauf während der Fahrt zu analysieren, um darauf mit einer energieeffizienteren Fahrweise zu reagieren (Pace et al. 2007). Zum Ermöglichen des Reagierens werden in einem Head-up-Display die Beschleunigung, die Verzögerung und der Verbrauch in US mpg dargestellt (Pace et al. 2007). Mit der Darstellung war die durchschnittliche Beschleunigung geringer als ohne Eco-Driving (Pace et al. 2007). Allerdings beträgt die Stichprobengröße  $N = 5$ . Somit stellt sich die Frage, ob die Daten valide auf eine größere Grundgesamtheit übertragen werden können. Außerdem geht aus der Studie nicht hervor, wie starkes oder schwaches Beschleunigen oder Verzögern gemessen wurde.

Das **Curvy-Speedometer** ist eine Geschwindigkeitsanzeige in km/h, welches mit einer gebogenen Nadel darauf hindeutet, inwieweit die gefahrene Geschwindigkeit von einer energieeffizienten Fahrweise entfernt ist (Sohn et al. 2009). Der optimale Bereich wird mit einem blauen Bereich im Tachometer angezeigt, in dem die Nadel nicht geneigt ist. Es bestehen Fragen hinsichtlich der Auswirkungen auf energieeffizientes Fahren und eine präzise Definition einer energieeffizienten Fahrweise (Sohn et al. 2009).

Staubach et al. (2012) beschäftigen sich mit zwei Einflussfaktoren, der Gangempfehlung und der Beschleunigungsempfehlung.

- a) Die *Beschleunigungsanzeige* gibt kontinuierliches Feedback über die Abweichung von der optimalen Beschleunigungsspanne (grün) und der aktuellen Beschleunigung (graue Linie). Zusätzlich werden an der rechten Seite des Displays zwei Pfeile dargestellt, welche eine graue Kontur haben. Sie geben Hinweise, ob die Beschleunigung verringert, erhöht oder konstant gelassen werden soll. Soll die Beschleunigung erhöht werden, so wird der obere Pfeil vollständig grau und bei einer Verringerung entsprechend der untere Pfeil. Bei einer optimalen Beschleunigung sind nur die grauen Konturen sichtbar und die Pfeile schwarz. Die Beschleunigung ist optimal, wenn der grüne Bereich und die graue Linie auf einer Höhe sind (Staubach et al. 2012). Befindet sich die graue Linie über dem grünen Bereich, wird zu stark beschleunigt und umgekehrt zu wenig (Staubach et al. 2012). Staubach et al. (2012) unterscheiden zwei Dimensionen der Beschleunigung: Art und Ziel. Das *Ziel* wird in zu niedrige und zu hohe Beschleunigung unterschieden. Die *Art* wird in zu starke, zu niedrige und optimale Beschleunigung untergliedert. Die Beschleunigungsempfehlung ist in Abbildung 12 a) dargestellt.
- b) Die *Gangempfehlung* informiert den Fahrer über den optimalen Schaltzeitpunkt sowie den empfohlenen Gang mit einem grünen Pfeil und einer grünen Zahl (Staubach et al. 2012). In Abbildung 12 b) ist die Gangempfehlung repräsentiert.

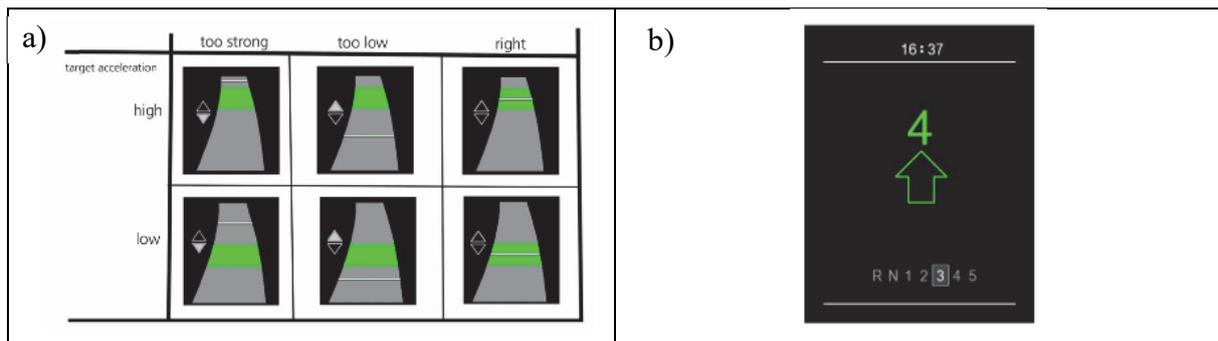


Abbildung 12: Feedbacksystem: a) Beschleunigung und b) Schaltung  
Quelle: Staubach et al. (2012)

Ziel der Studie von Birrell/Young (2013) ist es herauszufinden, ob der Benutzer ein konventionelles und einfaches Feedbacksystem mit Textwarnungen (DB) einem komplexeren System mit mehreren Informationen gleichzeitig (EID) den Vorrang gibt (Birrell/Young 2013).

- a) Das **EID Feedbacksystem** zeigt alle Sicherheitsparameter sowie relevante Parameter zum energieeffizienten Fahren gleichzeitig durch ein Fahrzeug in der Mitte des Displays an. Das Fahrzeug in der Mitte sowie die graue Fahrspur melden Abweichungen von der Fahrbahn. Der Ring um das Fahrzeug gibt links einen Hinweis zum Wechseln des Gangs und rechts einen Hinweis zur Beschleunigung. Abbildung 13 b) zeigt einige mögliche Zustände des EID-Systems. Von links nach rechts gesehen sind in der linken Abbildung 13 b) alle Parameter grün markiert (optimale Fahrweise). Die Abbildung 13 b) in der Mitte zeigt von oben links ein zu dichtes Auffahren, von oben rechts eine Abweichung von der Fahrbahn und von unten eine Auffahrwarnung an. In Abbildung 13 b) werden rechtsseitig oben links ein Bremshinweis (zu starkes Bremsen), rechts oben eine Beschleunigungswarnung (zu starkes Beschleunigen), unten links der Hinweis, einen Gang hochzuschalten, sowie unten rechts eine Warnung vor zu hoher Motordrehzahl angezeigt. Die Dringlichkeit der Meldung wird durch die Farben gelb (dringend) oder rot (sehr dringend) verdeutlicht (Birrell/Fowkes 2014). Das EID-System wurde speziell für komplexe sozio-technische Systeme entwickelt und erfolgreich in einer Vielzahl von Arbeitsumgebungen angewendet, u. a. im militärischen Bereich und der Luftfahrt (Birrell/Fowkes 2014). Als Fahrerinformationssystem wurde es bisher nicht in der Praxis eingesetzt.
- b) Das **DB-System** ist konventioneller gehalten und zeigt nur einen Parameter gleichzeitig an. Die Information wird anhand eines Textes wiedergegeben, welcher die visuelle Darstellung beschreibt. Die Darstellung ist in Abbildung 13 a) zu sehen. Der Parameter mit der höchsten Priorität wird zuerst angezeigt (Birrell/Young 2013).

Zusätzlich testeten Birrell/Young (2013) den Einfluss auf die Fahrablenkung und stellten trotz der komplexen Darstellung keinen signifikanten Einfluss fest. Birrell/Young (2013) begründen den Effekt mit der Anpassung der Informationen an die Bedürfnisse des Fahrers. Das einfache DB-System ist in Abbildung 13 a) und das komplexe EID-System in Abbildung 13 b) dargestellt.

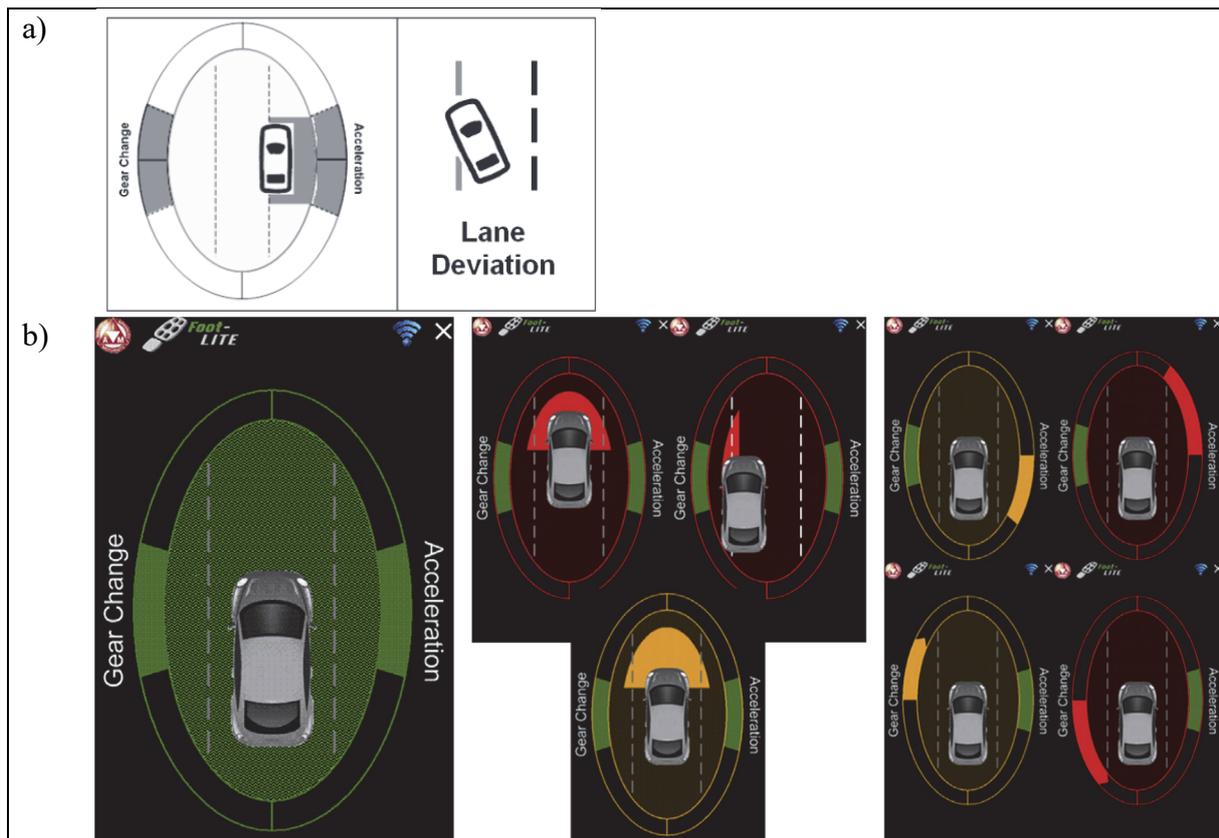


Abbildung 13: Feedbacksysteme: a) einfach (DB-System) vs. b) komplex (EID-System mit verschiedenen Darstellungen)  
 Quellen: Birrell/Young (2013) und Birrell/Fowkes (2014)

Birrell et al. (2014) testeten die unterschiedlichen Fahrmodi des Nissan Leaf und stellten fest, dass Eco-Driving-Feedback während der Fahrt einen signifikant geringeren Energieverbrauch aufweist als progressives Fahren. Die Ergebnisse zeigen ebenfalls, dass Abweichungen von bis zu 50 % nach oben existieren und die Hersteller unabhängig davon nicht in der Lage sind, die Restreichweite genau zu bestimmen (Birrell et al. 2014). Allerdings ist die Restreichweite gerade im speziellen Umfeld von batteriebetriebenen elektrischen Fahrzeugen essenziell, da die „Tankstellen“-Dichte (Ladesäulen) nicht so hoch ist wie die für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren (Birrell et al. 2014). Die Abweichung in der prognostizierten Distanz wurde größer, je länger die bereits gefahrene Strecke war (Birrell et al. 2014). Franke et al. (2015) bestätigen, dass bei diesem System Verbesserungspotenzial besteht und zeigen, dass die Vertrauenswürdigkeit in die Restreichweitensysteme hoch ist. Zulasten der Vertrauenswürdigkeit geht die zu niedrige Aktualisierungsrate, mit der die Restreichweite angepasst wird (Franke et al. 2015). Dies gilt insbesondere, wenn sich der Fahrstil beispielsweise durch eine schnellere Fahrt auf der Autobahn ändert (Franke et al. 2015).

Im **COPE1** Projekt wird der Fahrer auf die verbleibende Restreichweite für batteriebetriebene Elektrofahrzeuge mithilfe eines Index hingewiesen (Lundström/Bogdan 2012). Der Index für die benötigte Energieeffizienz  $E_{eff}$  berechnet sich aus der vorhandenen Energie  $E_V$  durch die geplante Gesamtstreckenlänge  $l_{ges}$ , und ist in Formel 3.3 dargestellt (Lundström/Bogdan 2012).

$$E_{eff} = \frac{E_V}{l_{ges}} \quad 3.3$$

Solange der Fahrer einen niedrigeren Index als der berechnete Wert  $E_{eff}$  hat, kann der Zielort erreicht werden (Lundström/Bogdan 2012). Die Feststellung der Zielerreichung wird in der Studie vor der Fahrt durchgeführt und könnte auch für In-Trip-Feedback verwendet werden.

Das **EVERT** Projekt ähnelt dem COPE1 Projekt. Es berechnet die Restreichweite vor der Fahrt, um zu prüfen, ob eine Strecke mit dem Elektrofahrzeug gefahren werden kann (Lundström et al. 2012a). Im Vergleich zum COPE1 Projekt werden zusätzlich unterschiedliche Temperaturen berücksichtigt (Lundström et al. 2012a). Zusätzlich werden In-Trip und Post-Trip-Feedback als weitere Möglichkeiten der Energieverbrauchsanzeige präsentiert. Dabei werden neben der Reichweite der Batteriestand und mögliche Routen dargestellt (Lundström et al. 2012b). Die *Routendarstellung* auf der Karte unterscheidet zwischen nicht-erreichbar und erreichbar (Lundström et al. 2012b). Eine Erreichbarkeit des Ziels ohne Laden des Fahrzeugs ist gegeben, solange es innerhalb der rot markierten Grenze liegt (Lundström et al. 2012b). Für den *Batteriestand* wird eine Farbskala bestehend aus rot (nicht erreichbar), gelb (bei defensiver Fahrweise erreichbar) und grün (ausreichend geladen, Zielort erreichbar) verwendet (Lundström et al. 2012b). Die *Restreichweite* in Kilometern wird als In-Trip-Feedback symbolisiert (Lundström et al. 2012a).

Jung et al. (2015) vergleichen genaue und nicht-genaue Restreichweiten-Anzeigen. Ist nicht klar, ob die Restreichweite ausreichend ist, um den Zielort zu erreichen, wird zu einer energieeffizienteren Fahrweise geraten (Jung et al. 2015).

Das **Guess-O-Meter** ist ein Eco-Driving-Feedback-System zur Darstellung der Restreichweite in Abhängigkeit von gefahrener Geschwindigkeit und der Klimaanlage (Lundström 2014). Die Informationen werden über eine Smartphone-Applikation während der Fahrt an den Fahrer gegeben. Eine Validierung des energieeffizienten Fahrens ist bisher wegen der prototypischen Umsetzung des Guess-O-Meters nicht möglich. Jedoch ermöglicht das Feedbackdesign auf die Besonderheiten des Energieverbrauchs bei batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen einzugehen (Lundström 2014).

Eine weitere Darstellung für Elektrofahrzeuge, hier **VEC** genannt, zeigt einen Graphen mit einem optimalen erwarteten Energieverbrauch in kWh/km während der Fahrt auf dem Smartphone an (Lundström/Bogdan 2014). Wird von dem optimalen Verbrauch abgewichen, so werden ein höherer Verbrauch rot und ein niedrigerer grün markiert (Lundström/Bogdan 2014).

Strömberg et al. (2011) vergleichen die Anzeige (a) des Elektrofahrzeugs Saab 9-3 mit (b) einer Anzeige basierend auf Nutzertests. In beiden Feedbacksystemen werden fünf Elemente dargestellt: (1) Restreichweite, (2) Tanklevel (Ladezustand), (3) Energieverbrauch, (4) Ecometer und (5) Warnhinweise. Die nutzerbasierte Anzeige (b) weist eine detailliertere Darstellung als die bisher dargestellten Anzeigen für Verbrennungsmotoren auf. Die Anzeige (a) aus dem Saab ist dem Nutzer vertrauter, während die nutzerbasierte Anzeige (b) ein Verständnis benötigt und inhaltlich schwerer zu erkennen ist (Strömberg et al. 2011). In Abbildung 14 sind die Feedbacksysteme im Elektrofahrzeug für den Saab 9-3 (a) und der nutzerbasierten Studie (b) dargestellt.

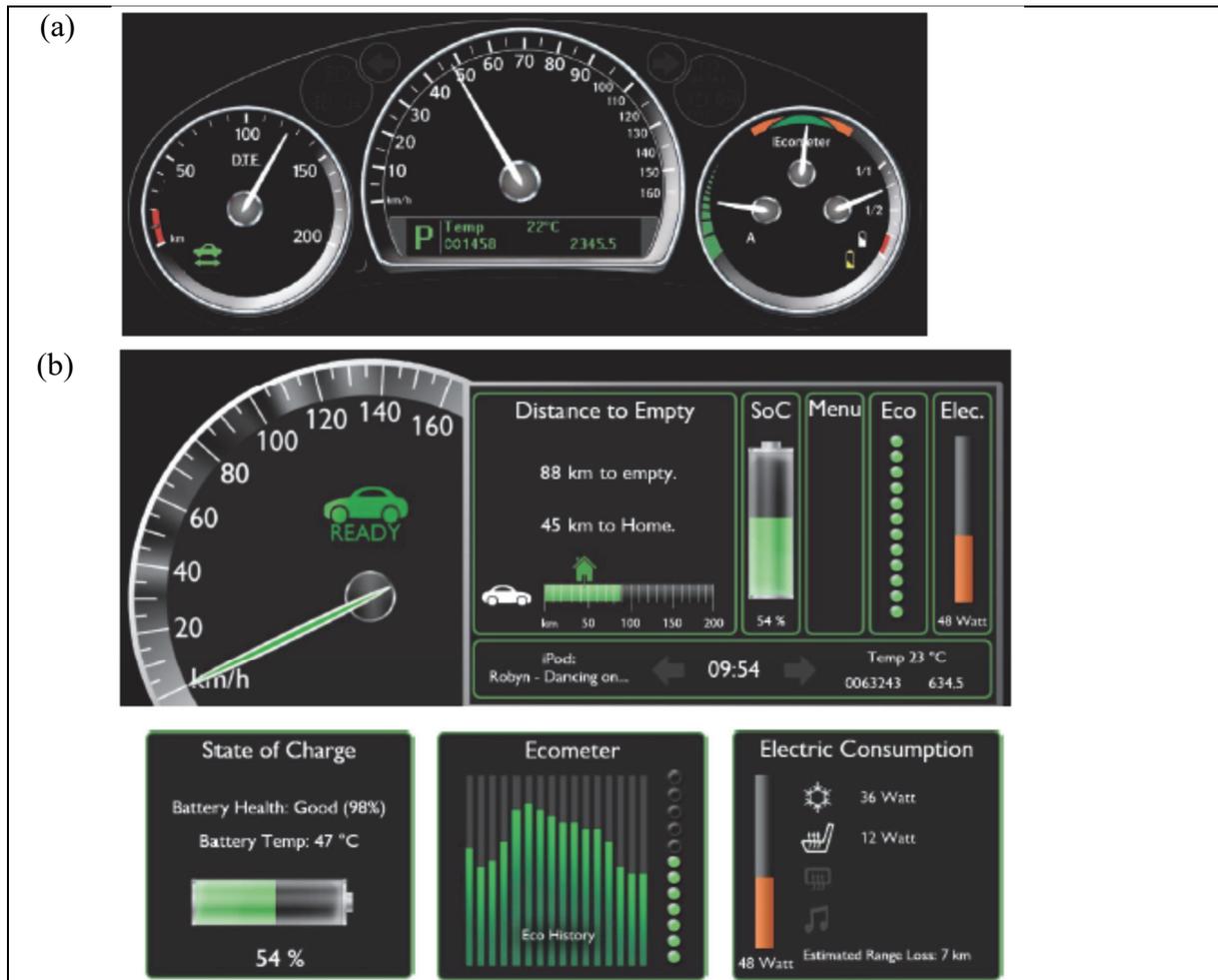


Abbildung 14: Feedbacksystem im Elektrofahrzeug: a) Saab 9-3, b) nutzerbasiert  
 Quelle: Strömberg et al. (2011)

Einen völlig anderen Ansatz verfolgen Tractinsky et al. (2011). Sie verwenden eine ästhetische Beobachtung, um Eco-Driving zu vermitteln und stellen 16 verschiedene Animationsarten zur Verfügung (Tractinsky et al. 2011). Dem Fahrer werden sowohl die Geschwindigkeit in km/h als auch der Energieverbrauch in km/l angezeigt (Tractinsky et al. 2011). Zusätzlich werden Beschleunigung und Verzögerung animiert (Tractinsky et al. 2011). Offen bleibt, welche Auswirkungen die unterschiedlichen Animationsarten auf den Energieverbrauch haben, welche Informationen gezeigt werden sollen und wie die Fahrsicherheit gewährleistet werden soll (Tractinsky et al. 2011).

Das **Eco-Driving Assist Systems** nutzt die Gaspedalstellung, um dem Nutzer Eco-Driving unterhalb des Motordrehzahlmessers und der Geschwindigkeitsanzeige im Kombiinstrument anzuzeigen (Wada et al. 2011). Bei energiesparender Fahrweise (Gaspedal wenig gedrückt) wird ein „Eco Indicator“ durch ein grünes Symbol mit dem Schriftzug „ECO“ angezeigt. Fährt der Fahrer nicht energieeffizient (durchgedrücktes Gaspedal), so erscheint ein blinkender „Non-Eco-Driving Indicator“. Zwischen den beiden Werten gibt es einen blauen Balken, welcher anhand der Gaspedalstellung und damit bei ineffizienter Fahrweise größer wird. Für die Länge des Balkens wird ein Indikator  $\theta$  berechnet, bestehend aus der Gaspedalstellung  $\theta$  durch eine nicht-lineare Funktion  $\theta_{max}(v)$ , welche die maximale Effizienz des Motors in Abhängigkeit

einer bestimmten Geschwindigkeit  $v$  berechnet und in Formel 3.4 präsentiert ist (Wada et al. 2011).

$$\Theta = \frac{\theta}{\theta_{max}(v)} \quad 3.4$$

Es werden zwei verschiedene Beschleunigungen unterschieden: energieeffiziente Beschleunigung mit  $\Theta \leq 1$  und aggressive Beschleunigung mit  $\Theta > 1$ .  $\Theta = 1$  symbolisiert die Grenzwerte für Eco-Driving (Wada et al. 2011). Die Ergebnisse zeigen, dass Eco-Driving an die Fähigkeiten eines jeden einzelnen Fahrers individuell anzupassen ist, die Fahrerablenkung sinkt und dass das Gaspedal ein geeignetes Messinstrument für die Energieeffizienz ist (Wada et al. 2011). Zugleich wurde weiterer Forschungsbedarf bei haptischem und akustischem Feedback gesehen (Wada et al. 2011).

Head-down-Anzeigen führen zu mehr Fahrablenkung als Head-up-Anzeigen (Ablaßmeier et al. 2007) und Nutzer bevorzugen Head-up-Anzeigen (Weinberg et al. 2011). Head-up- und Head-down-Anzeigen weisen zudem weniger Fahrablenkung als akustisches Feedback auf (Weinberg et al. 2011).

Langlois (2013) untersuchten die Wirkung von Leuchtsignalen auf der Windschutzscheibe im Vergleich zur gängigen Anzeige im Armaturenbrett. Die Ergebnisse weisen bei Kombination beider Anzeigen bessere Werte auf und stellen einen günstigen Ersatz für Head-up-Anzeigen dar (Langlois 2013).

Frank et al. (2015) stellen fünf verschiedene Ampelsysteme vor, die es ermöglichen, die Wartezeit an Verkehrsampeln zu verkürzen, indem dem Fahrer die verbleibende Wartezeit in der Ampel selbst angezeigt wird. Das System wirkt von außerhalb des Fahrzeugs auf den Fahrer. Die Übertragbarkeit des erweiterten Ampellichts auf ein Eco-Driving-Feedback im Fahrzeug ist bisher nicht getestet worden. Die Darstellung, ob eine Ampel rot oder grün sein wird, reicht nicht aus, um das Fahrverhalten zu ändern (Roberts et al. 2012).

Zusätzliche visuelle sogenannte On-board-Erkennungsaufgaben, welche dem Fahrer zur Verfügung gestellt werden, führen dazu, dass sich die visuelle Stimuluserkennungsleistung verschlechtert, während die Reaktionsverzögerung nicht beeinflusst wird (Recarte/Nunes 2003; Azzi et al. 2011). Trotz einer Erhöhung der Anzahl an visuellen Aufgaben wird die Reaktionszeit des Fahrers nicht herabgesetzt.

In Tabelle 5 sind für eine Übersicht die einzelnen Feedbacksysteme und deren detaillierte Auswertung dargestellt.

Quelle	Objekt(e)	Messung	Einheit(en)	Feedback Art
American Honda Motor Company (2008)	Ecological Drive Assist System	Beschleunigung und Verzögerung	k. A.	In-Trip
Azzi et al. (2011)	American Honda Motor Co. (2008)	$F_{additional}$ (Renault's eco-driving model)	Spezifischer Faktor	In-Trip
Madruza Filho et al. (2012)	Kontinuierlich (a), Diskret (b)	Gefahrenre Streckenlänge	km	In-Trip
Birrell/Fowkes (2014),	DB-System (a),	Geschwindigkeit,	mph,	In-Trip

Quelle	Objekt(e)	Messung	Einheit(en)	Feedback Art
Birrell/Young (2013), Birrell/Young (2009)	EID-System (b)	Spur, Reaktionszeit, Korrekte Reaktion, TLX, DALI	ft, s, n, Skalenwert, Skalenwert	
Birrell et al. (2014)	Nissan Leaf System	Restreichweite	km	In-Trip
Boriboonsomsin et al. (2010)	Eco-Navigator	Energieverbrauch, Ge- schwindigkeit	mpg, mph	In-Trip, Post-Trip
Burns et al. (2015)	k. A.	Beschleunigung, Verzö- gerung, Emissionen, Reisekosten	k. A.	In-Trip
Corti et al. (2013)	Quantitative Driving Style	(1) Querbeschleunigun- gen, (2) Reibungsverluste, (3) Beschleunigung/Ver- zögerung	(1) Index in %, (2) Index in %, (3) Index in %	In-Trip
Ford Motor Company (2016)	Next-Generation Smart Gauge	k. A.	k. A.	In-Trip
Frank et al. (2015)	Advanced Traffic Light System	n. a.	n. a.	In-Trip
Hiraoka et al. (2009)	FC-meter	Geschwindigkeit, Gang- wechsel, Energiever- brauch (durchschnittlich + momentan), Warn- lampe zum optimalen Abstand zum vorausfah- renden Fahrzeug	km/l	In-Trip
Jamson et al. (2015a)	Dot Eco-Driving (a), Gauge Eco-Driving (b), Foot Eco-Driving (c)	Winkel des Gaspedals	Abweichung in %	In-Trip
Jung et al. (2015)	Ambiguity	Reichweite des Autos (1) Geschwindigkeit (2) Tankstand (3)	(1) Meilen (2) mph (3) Full, 1/2, Empty	In-Trip
Kircher et al. (2014)	Intermittierendes Eco- Feedback (a), Kontinuierliches Eco- Feedback (b)	Beschleunigung (1), Verzögerung (2), Geschwindigkeit (3)	(1) km/h, (2) k. A., (3) k. A.	In-Trip
Lee et al. (2010), Lee et al. (2011)	Eco-Driving System In- dicator	Fahreffizienz	Sehr effizient: grün Effizient: weiß Ineffizient: rot	In-Trip
Liimatainen (2011)	Eco-Driving Berichte	Energieverbrauch, Durchschnittsgeschwin- digkeit	l/100 km, km	Post-Trip
Lundström et al. (2012a), Lundström et al. (2012b)	EVERT	Batterieladezustand (1) Reichweite (2) Routen (3)	(1) Farbskala: rot, gelb, grün, (2) Rot begrenzter Bereich auf der Karte, (3) Farblich markierte Route auf der Karte	Pre-Trip, In-Trip, Post-Trip
Lundström/Bogdan (2012)	COPE1	benötigte Energieeffizi- enz = Energie in Batterie pro Gesamtreichweite	kWh/km	Pre-Trip, In-Trip
Lundström (2014)	Guess-O-Meter	Reichweite des Autos in Abhängigkeit von Ge- schwindigkeit und Kli- matisierung	km	In-Trip
Lundström/Bogdan (2014)	VEC	<i>Energieverbrauch<sub>optimal</sub> - Energieverbrauch<sub>aktuell</sub></i>	km	In-Trip
Meurer et al. (2016)	SMobil: Awareness	Fahrten (1) CO <sub>2</sub> -Emission insgesamt (2) CO <sub>2</sub> -Emission pro Fahrt (3) Fahrzeugwahl (4)	(1) Anzahl (2, 3) kg (4) Diagramm	Pre-Trip, Post-Trip
Meurer et al. (2016)	SMobil: Emotionen	Fahrten (1) CO <sub>2</sub> -Emission insgesamt (2) CO <sub>2</sub> -Emission pro Fahrt (3) Fahrzeugwahl (4) Routenvorschlag (5)	(1) Anzahl (2, 3) Eisbär (4) Abbildung (5) Routenanzeige	Pre-Trip, Post-Trip
Meurer et al. (2016)	SMobil: Gamification	Fahrten (1) CO <sub>2</sub> -Emission insgesamt (2)	(1, 2, 3) Ranking mit anderen Nut- zern/Freunden (3)	Pre-Trip, Post-Trip

Quelle	Objekt(e)	Messung	Einheit(en)	Feedback Art
		CO <sub>2</sub> -Emission pro Fahrt (3)	Statistik mit Vergleich zu anderen Nutzern	
Meurer et al. (2016)	SMobil: Soziale Norm	Fahrten (1) CO <sub>2</sub> -Emission insgesamt (2) CO <sub>2</sub> -Emission pro Fahrt (3)	(1, 2, 3) Ranking mit anderen Nutzern/Freunden (3) Statistik mit Vergleich zu anderen Nutzern	Pre-Trip, Post-Trip
Meschtscherjakov et al. (2009), Wilfinger et al. (2010)	Automativ Eco System (a), Eco Display (b), Eco Speedometer (c)	Differenz: optimaler Verbrauch zu IST-Verbrauch	(a) Liter, (b, c) k. A.	(a) Post-Trip, (b, c) In-Trip
Pace et al. (2007)	Celerometer	Beschleunigung und Verzögerung (1), Verbrauch (2), Leerlaufzeit (3)	(1) k. A., (2) in mpg, (3) in s	In-Trip
Sohn et al. (2009)	Curvy-Speedometer	Geschwindigkeit, Energieeffizienz	km/h, k. A.	In-Trip
Staubach et al. (2012)	k. A.	Beschleunigung, Gangschaltung		In-Trip
Strömberg et al. (2011)	Saab 9-3	Restreichweite (1) Tankfüllung (2) Energieverbrauch (3) Ecometer (4) Warnhinweise (5)	(1) km, (2) Skala/%, (3) Watt, (4) rot, grün (5) Zeichen (Schildkröte, Netzstecker)	In-Trip
Strömberg et al. (2011)	Nutzerbasierte Studie	Restreichweite (1) Tankfüllung (2) Energieverbrauch (3) Ecometer (4) Warnhinweise (5)	(1) km, (2) Skala/%, (3) Watt, (4) Diagramm, (5) Zeichen (Schildkröte, Netzstecker)	In-Trip
Tractinsky et al. (2011)	Animiertes Eco-Driving	(1) Geschwindigkeit, (2) Beschleunigung/Verzögerung, (3) Energieverbrauch	(1) km/h (2) k. A. (3) km/l	In-Trip
Wada et al. (2011)	Eco-Driving Assist System	Indikator mithilfe des Winkels des Gaspedals	Relativer Eco-Driving Wert	In-Trip

Tabelle 5: Auswertung visuelle Feedbacksysteme

Quelle: Eigene Darstellung, k. A. = keine Angabe, n. a. = nicht anwendbar

Die Ergebnisse von Dahlinger/Wortmann (2016) zur Feedbackart werden bestätigt, so kommt die Art In-Trip am häufigsten vor. Es gibt keine einheitliche Messung und folglich auch keine einheitliche Messgröße. Allerdings ist eine Tendenz zur Messung mittels Geschwindigkeit und Beschleunigung vorhanden. Die Erstellung eines Messmodells für den Energieverbrauch wird eingehender in Kapitel 5 behandelt. Es bleibt unklar, welche Informationen in welcher Art zur Verfügung gestellt werden sollten.

### 3.4.2 Haptisch

Es konnten fünf haptische Feedbacksysteme identifiziert werden. Diese geringen Auffindungen bestätigen die Ergebnisse von haptischem Feedback von Birrell et al. (2013).

Ein **Force Feedback Gaspedal**, welches nach dem Algorithmus von Renault's Eco-Driving-Modell agiert, wird von Azzi et al. (2011) vorgestellt. Es wird der Pedalwinkel zugrunde gelegt und die Beschleunigung untersucht (Azzi et al. 2011). Für die Berechnung eines Optimums an Energieverbrauch wird die Formel 3.1 verwendet.

Das **Accelerator Force Feedback Pedal AFFP©** von Continental (2009) gibt dem Fahrer bei ineffizienter Fahrweise ein Pulsieren und einen Gegendruck am Gaspedal. Nach Angaben von

Continental (2009) ist das Pulsieren des Gaspedals wirksamer als visuelles oder akustisches Feedback.

Das Eco Accelerator Pedal (**Eco Pedal**) wurde ursprünglich von Nissan entwickelt (Nissan 2008b, 2008a) und hat zum Ziel, den Energieverbrauch zu reduzieren (Meschtscherjakov et al. 2009). Beim Betätigen des Gaspedals wird ab einem energieeffizienten Winkel ein Gegen-  
druck erzeugt. Beispielsweise, wenn versucht wird, das Gaspedal vollständig durchzudrücken. In Abbildung 15 ist die Funktionsweise des Eco Pedals schematisch dargestellt.

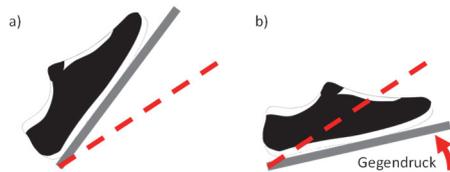


Abbildung 15: Schematische Darstellung der Funktionsweise des Eco Pedals. Gestrichelte Linie: Grenze zum energieeffizienten Fahren, a) energieeffiziente Fahrweise, b) energieineffiziente Fahrweise  
Quelle: In Anlehnung an Meschtscherjakov et al. (2009)

Birrell et al. (2010) untersuchen ein **Gaspedal**, das beim Überschreiten eines Grenzwertes für die Motordrehzahl vibrierte (Birrell et al. 2010). Das Gaspedal verringerte signifikant den Energieverbrauch (Birrell et al. 2010). Die Ergebnisse zeigen eine signifikante Reduzierung der Beschleunigung und der maximalen Motordrehzahl während der Fahrt (Birrell et al. 2010). Im Versuch wurden die Beschleunigung in  $m/s^2$ , die Motordrehzahl in %, die Geschwindigkeit in mph und die Zeitunterschiede in % gemessen (Birrell et al. 2010). Es konnte gezeigt werden, dass das Gaspedal, mehr als die reine Kenntnis der Eco-Driving-Regeln, den Energieverbrauch senkte (Birrell et al. 2013). Auch wurde die Fahrzeit nicht signifikant erhöht, während die kognitive Belastung abnahm (Birrell et al. 2013). In Abbildung 16 ist das verwendete Gaspedal zu sehen.



Abbildung 16: Gaspedal mit Widerstand: links – Prototyp, rechts – Umsetzung  
Quelle: Birrell et al. (2013)

Riener et al. (2010) verwenden während der Fahrt auf vier unterschiedliche Arten ein haptisches Feedback an **Sitz und Gurt**: ein harmonisches gleichbleibendes und ein disharmonisches Signal, welches sich jeweils in der Stärke unterscheidet. Der Energieverbrauch konnte um bis zu 8 % gesenkt werden (Riener et al. 2010).

Die haptischen Feedbacksysteme sind in Tabelle 6 aufgeführt.

Quelle	Objekt(e)	Art	Messung	Einheit	Feedback
Azzi et al. (2011)	Force Feedback Gaspedal	Haptisch	$F_{additional}$ (Renault's eco-driving model)	Spezifischer Faktor	In-Trip
Birrell et al. (2010), Birrell et al. (2013)	Gaspedal	Haptisch	Motordrehzahl, Geschwindigkeit, Beschleunigung	in %, km/h, m/s <sup>2</sup>	In-Trip
Continental (2009)	AFFP	Haptisch	Gangwechsel		In-Trip
Meschtscherjakov et al. (2009), Wilfinger et al. (2010), Nissan (2008a)	Eco Pedal	Haptisch	Winkel des Gaspedals	keine	In-Trip
Riener et al. (2010)	Sitz und Gurt System	Haptisch	Energieverbrauch	l/100km	In-Trip

Tabelle 6: Auswertung haptische Feedbacksysteme  
Quelle: Eigene Darstellung

Haptisches Feedback erfolgt In-Trip und wird in vier von fünf der Systeme über das Gaspedal gegeben. Eine einheitliche Messung ist nicht vorhanden.

### 3.4.3 Akustisch

Es wurden drei akustische Feedbacksysteme gefunden. Des Weiteren konnten sechs unterschiedliche Übertragungsarten identifiziert werden.

Shahab et al. (2010) untersuchen **Cooperative Speed Assistenz** Systeme, um Hinweise auf eine zu schnelle Fahrweise und die Geschwindigkeit mit anderen Verkehrsteilnehmern zu koordinieren. Sie unterscheiden zwei Feedbacksysteme: wiederholende und getriggerte. Das *wiederholende* Feedback tritt solange auf, wie das Ereignis dauert. Das *getriggerte* Feedback tritt zum Beginn und Ende des Ereignisses auf (Shahab et al. 2010). Zwischen den Feedbackarten konnte kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der Geschwindigkeitsanpassung festgestellt werden (Shahab et al. 2010).

Das **Eco Advisor** System analysiert das Fahrverhalten mit fahrzeugabhängigen Statusinformationen und gibt akustische Hinweise, um eine energieeffiziente Fahrweise zu ermöglichen (Meschtscherjakov et al. 2009; Wilfinger et al. 2010). Die Idee für den Eco Advisor stammt von Fiats eco:Drive System (Fiat o. J.; Meschtscherjakov et al. 2009). Bei dem von Fiat entwickelten System wird auf einer Skala von 0 bis 100 Punkten ein eco:Index kalkuliert (Fiat o. J.). Je höher die Punktzahl, desto energieeffizienter ist die Fahrweise (Fiat o. J.). Die Punkteskala wird vom Eco Advisor benutzt. Der Eco Advisor gibt Pre-Time- oder In-Time-Feedback und ermöglicht die Post-Time-Auswertung.

- a) *In-Time-Feedback* wird zur aktuellen Fahrsituation gegeben. Hinweise zur Fahrsituation sind zum Beispiel die Empfehlung, in einen höheren Gang zu schalten, oder nicht mit Vollgas zu fahren (Meschtscherjakov et al. 2009). Für die Datenermittlung werden während der Fahrt die Beschleunigungs-, Brems- und Schaltgewohnheiten des Fahrers und der Kraftstoffverbrauch gespeichert (Meschtscherjakov et al. 2009).
- b) *Pre-Time* werden Statusinformationen gegeben wie der Hinweis auf einen zu niedrigen Reifendruck oder die Aufforderung, unnötigen Ballast zu entladen (Meschtscherjakov et al. 2009).

- c) Um eine *Post-Time*-Auswertung zu erhalten, können die Daten auf einen PC übertragen und spezifische Vorschläge zur Änderung des Fahrverhaltens generiert werden (Meschtscherjakov et al. 2009).

Nees et al. (2014) zeigen weitere **sechs Arten** des akustischen Feedbacks auf. Jedoch werden diese nur als Möglichkeit zur Erreichung einer energieeffizienten Fahrweise genannt. Als Verbal Auditory Display wird das zuvor beschriebene Feedback von Meschtscherjakov et al. (2009), der Eco Advisor, genannt. Darüber hinaus gehen Nees et al. (2014) auf Earcons, Auditory Icons, Spearcons, Sonifications und Soundscapes beispielhaft ein. Es fehlt allerdings eine genaue Beschreibung der Messmethode.

Die betrachteten akustischen Feedbacksysteme sind im in Tabelle 7 aufgelistet.

Quelle	Objekt(e)	Messung	Einheit	Feedback
Shahab et al. (2010)	Cooperative Speed Assistance (wiederholend, a), (getriggert, b)	Geschwindigkeit	km/h	In-Trip
Meschtscherjakov et al. (2009), Wilfinger et al. (2010)	Eco Advisor System	Nicht genau spezifizierte Hinweise	k. A.	Pre-, In- und Post-Trip
Nees et al. (2014)	Verbal Auditory Displays	k. A.	k. A.	k. A.
Nees et al. (2014)	Earcons	k. A.	k. A.	k. A.
Nees et al. (2014)	Auditory Icons	k. A.	k. A.	k. A.
Nees et al. (2014)	Spearcons	k. A.	k. A.	k. A.
Nees et al. (2014)	Sonifications	k. A.	k. A.	k. A.
Nees et al. (2014)	Soundscapes	k. A.	k. A.	k. A.

Tabelle 7: Auswertung akustische Feedbacksysteme  
Quelle: Eigene Darstellung, k. A. = keine Angaben

Akustische Feedbacksysteme unterscheiden sich durch die Art der Wiedergabe wie ganze Sätze, kurze oder lange Töne. Es wurde eine Messung über die Geschwindigkeit identifiziert. Verallgemeinernde Aussagen über Messung und Art des Feedbacks sind aufgrund des geringen Vorkommens in der Literatur mit vorsicht zu betrachten.

### 3.4.4 Multimodal

In der Literatur sind multimodale Interaktionskanäle nicht hinreichend untersucht (Landau et al. 2014). Eine Differenzierung der einzelnen Ausprägungen ist somit nicht erforderlich. Es fanden sich acht multimodale Feedbacksysteme.

Azzi et al. (2011) kombinieren visuelles und haptisches Feedback auf einer sieben Zoll großen Anzeige (Abschnitt 3.4.1) mit einem Force Feedbacksystem am Gaspedal (Abschnitt 3.4.2).

Die in Abschnitt 3.4.1 vorgestellten, visuellen Feedbacksysteme **Dot eco-driving**, **Gauge eco-driving** und **Foot eco-driving** sind um ein haptisches und ein akustisches Feedback ergänzt worden (Jamson et al. 2015a). Das *akustische* Feedback unterscheidet die Frequenzen 512 Hz und 1770 Hz (Jamson et al. 2015a). Bei der hohen Frequenz wird das Gaspedal zu stark gedrückt und bei der niedrigen zu wenig (Jamson et al. 2015a). Das *haptische* Feedback besteht

aus drei verschiedenen Feedbackarten von Gaspedalen: *force feedback*, *stiffness feedback* und *adaptive stiffness feedback* (Jamson et al. 2015a). Die Berechnungen der Messtoleranzen sind identisch zu den aus Abschnitt 3.4.1 (Jamson et al. 2015a). Die Ergebnisse zeigen weiteren Forschungsbedarf bei multimodalen Feedbacksystemen (Jamson et al. 2015a).

Das **GERICO-System** ist ein visuell-akustisches Feedbacksystem für energieeffizientes Fahren (Barbé/Boy 2006). Das *visuelle* Feedback besteht aus fünf Komponenten: Geschwindigkeitshinweisen, visuellen Warnungen, Navigationsinformationen, Gangwechselempfehlungen und einer Energieverbrauchsschätzung.

- 1) Der Geschwindigkeitshinweis wird mit einem grünen Bereich (optimale Geschwindigkeit) unmittelbar in der Geschwindigkeitsanzeige des Tachometers gezeigt. Es werden von Barbé/Boy (2006) zwei Fahrbereiche unterschieden: städtisch und nicht-städtisch. Im nicht-städtischen Fahrbereich werden Geschwindigkeitshinweise mit einer grünen Zone im Tachometer im Umfang von 10 km/h abgebildet (Barbé/Boy 2006). Es stellt die optimale Geschwindigkeit in km/h mit einer Toleranz von  $\pm 5$  km/h dar (Barbé/Boy 2006) dar. Im städtischen Fahrbereich wird die optimale Geschwindigkeitsspanne auf 0 km/h bis 30 km/h oder 50 km/h festgelegt (Barbé/Boy 2006). Für die städtische Zone wird keine optimale Geschwindigkeit festgelegt, weil die Möglichkeit von äußeren Ereignissen besteht (Barbé/Boy 2006).
- 2) Die visuellen Warnhinweise befinden sich unterhalb der Geschwindigkeitshinweise. Eine Warnung erscheint im städtischen Bereich nur bei Überschreitung der Maximalgeschwindigkeit (Barbé/Boy 2006), während im nicht-städtischen Bereich der Fahrer beim Ignorieren der optimalen Geschwindigkeit mit einem weiß-rotem Dreieck gewarnt wird (Barbé/Boy 2006). Eine weitere Warnung in Form eines Achtungszeichens erscheint, wenn länger als vier Sekunden kein Gangwechsel durchgeführt wird, wenn der Gang zu hoch oder zu niedrig ist (Barbé/Boy 2006).
- 3) Navigationshinweise werden in der Mitte der Geschwindigkeitsanzeige durch einen gelben Pfeil und eine Zahl, die den Abstand zum nächsten Ereignis angibt, dargestellt (Barbé/Boy 2006).
- 4) Die Gangempfehlung befindet sich im unteren Teil des Tachometers. Dort wird der nächste optimale Gang mithilfe eines Plus- oder Minuszeichens dem Fahrer empfohlen. Zusätzlich wird eine optimale Gangempfehlung mit einer Zahl unter dem Tachometer angegeben (Barbé/Boy 2006). Es werden drei Gangzustände unterschieden: zu niedrig, optimal und zu hoch (Barbé/Boy 2006). Bei einem zu niedrigen Gang werden der aktuelle Gang und ein Minuszeichen, bei einem zu hohen Gang wird anstelle des Minuszeichens ein Pluszeichen angezeigt (Barbé/Boy 2006). Der Gang ist optimal, wenn nur die Zahl grün angezeigt wird.
- 5) Eine Benzinverbrauchsschätzung wird in Abhängigkeit vom Fahrstil angezeigt. Es wird errechnet, wie viel Benzin im Vergleich zum optimalen Referenzwert verbraucht wird (Barbé/Boy 2006). Die Benzinverbrauchsschätzung ist bei optimalem Verbrauch grün und wird zunehmend rot bei zu hohem Verbrauch (Barbé/Boy 2006).

Das *akustische* Feedback erfolgt auf vier verschiedenen Hinweistypen: Navigationshinweisen, beratenden Hinweisen, assistierenden Hinweisen und Warnhinweisen (Barbé/Boy 2006).

- (i) Navigationshinweise dienen der Routenführung des Fahrers.

- (ii) Beratende Hinweise werden gegeben, wenn der Fahrer von der optimalen Geschwindigkeit oder dem optimalen Schaltzeitpunkt abweicht. Das Feedback wird vier Sekunden nach der visuellen Aufforderung gegeben (Barbé/Boy 2006).
- (iii) Assistierende Hinweise wie „Be careful, city zone, drive softly“ unterstützen den Fahrer zusätzlich (Barbé/Boy 2006).
- (iv) In der Stadt werden die akustischen Warnhinweise aus Sicherheitsgründen reduziert und nur bei zu hoher Motordrehzahl von > 2500 Umdrehungen pro Minute (U/min oder RPM – Revolutions per Minute) und zu hoher Geschwindigkeit gegeben (Barbé/Boy 2006).

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass das System zu einer geringeren Durchschnittsgeschwindigkeit, optimalen Schaltzeitpunkten und einem um 16 % geringeren Benzinverbrauch führt (Barbé et al. 2007). Zusätzlich wurde mit Umfragen bestätigt, dass das grafische Feedback akzeptiert wurde, insbesondere das visuelle zur optimalen Geschwindigkeit (Barbé et al. 2007). Die Schaltempfehlungen und die Benzinverbrauchsschätzung wurden als nützlich empfunden (Barbé et al. 2007). Die akustischen Hinweise wurden klar verstanden, aber ihre Häufigkeit als zu hoch und unangenehm empfunden (Barbé et al. 2007). 85 % der Teilnehmer gaben an, das System sei einfach zu benutzen (Barbé et al. 2007). Dennoch gaben 40 % der Umfrageteilnehmer an, eine visuelle und akustische Überlastung aufgrund der kombinierten Hinweise zu Navigation und Fahrstil zu empfinden (Barbé et al. 2007). 40 % der Teilnehmer gaben an, das System nutzen zu wollen und 40 % wollten es nur unter der Bedingung nutzen, dass die auditiven Hinweise reduziert würden (Barbé et al. 2007). 20 % gaben an, das System nicht nutzen zu wollen (Barbé et al. 2007). Die Studie verdeutlicht, dass das System eine hohe kognitive Belastung mit sich bringt und dass ältere Menschen mehr Schwierigkeiten haben, mit dem System zurechtzukommen, als jüngere Probanden (Barbé et al. 2007).

Der **Energy Flow** übermittelt den Status von elektrischen Fahrzeugen unimodal oder multimodal (Landau et al. 2014). Landau et al. (2014) messen sieben Interaktionskanalvarianten, die mit dem visuellen, haptischen und/oder akustischen Interaktionskanal adressiert werden können. Die Ergebnisse der Messung mit dem AttrakDiff zeigen, dass das visuell-haptische Feedback die höchste Attraktivität unter den 21 Probanden hat. Multimodales Feedback wurde insgesamt besser bewertet als unimodales Feedback. Das visuelle Feedback stellt die einfachste Variante dar und wies den besten Wert der „Humaness“ auf (Landau et al. 2014). Folglich ist visuelles Feedback am einfachsten zu verstehen. Hingegen wurde das haptische Feedback bevorzugt (Landau et al. 2014).

Der **Eco-Driving Assistent** von Corcoba Magaña/Muñoz Organero (2015) gibt dem Fahrer visuelles und akustisches Feedback. Dem Fahrer soll ein präventives Feedback während der Fahrt durch Beobachtung der Umgebung gegeben werden (Corcoba Magaña/Muñoz Organero 2015). Hält sich der Fahrer nicht an die Hinweise, wird er benachrichtigt. Für die Benachrichtigung wird ein „Gamification“-Ansatz gewählt, um den Nutzer dauerhaft an das System zu binden und dadurch Verbesserungen in der energieeffizienten Fahrweise zu erzielen (Corcoba Magaña/Muñoz Organero 2015). Für die Umsetzung einer energieeffizienten Fahrweise wird ein Score ermittelt (Corcoba Magaña/Muñoz Organero 2015). Je niedriger der Score ist, desto energieeffizienter der Fahrstil (Corcoba Magaña/Muñoz Organero 2015).

Das **Heartbeat** Feedbacksystem gibt dem Fahrer ab Starten des Motors die Möglichkeit zu erkennen, wie der Batteriestatus in Relation zum Fahrziel und die Geschwindigkeit des Fahrzeugs sind (Loehmann et al. 2014). Der Fahrer erkennt dabei keine konkreten Werte, sondern bekommt den Eindruck durch einen „Herzschlag“ vermittelt (Loehmann et al. 2014). Der Herzschlag wird mit einer Vibration dargestellt. Beispielsweise ist bei hoher Geschwindigkeit und hohem Verbrauch die Vibration stärker zu spüren. Zusätzlich verändert sich die Farbe von Blau zu Rot je schneller gefahren wird. Bei der prototypischen Darstellung bleibt unklar, ob das System einen signifikanten Effekt auf den Energieverbrauch hat.

Im **Artemisa** Projekt wird eine Android-Applikation entwickelt, welche die Geschwindigkeit, Beschleunigung, Verzögerung und den eingelegten Gang misst (Magaña et al. 2012). Dem Fahrer wird während der Fahrt Feedback sowohl visuell über die Applikation als auch akustisch mit einer Text-to-Speech-Funktion gegeben (Magaña et al. 2012). Für das Feedback werden die folgenden Eco-Driving-Regeln beachtet: Die Fahrzeuggeschwindigkeit darf 110 km/h nicht überschreiten, die Beschleunigung darf nicht stärker als  $1,5 \text{ m/s}^2$  sein und die Verzögerung darf nicht größer als  $-1,5 \text{ m/s}^2$  sein, der Fahrer muss den Motor ausschalten, wenn das Fahrzeug mehr als zwei Minuten steht und der Gang darf nicht zu niedrig sein (Magaña et al. 2012). Neben den Eco-Regeln weist das System die Besonderheit auf, präventiv mit einer Verkehrszeichenerkennung vorausschauend Fahrsituationen zu analysieren, sodass die Fahrgeschwindigkeit für einen optimalen Energieverbrauch reduziert werden kann (Magaña et al. 2012).

Die **Collective Data Sharing** ist eine „soziale“ Fahrapplikation, welche während der Fahrt visuelles und akustisches Feedback gibt (Riener/Reder 2014). Für das Feedback wird der Energieverbrauch mit dem von anderen Fahrern verglichen und in eine Rangordnung gebracht (Riener/Reder 2014). Zur Erstellung der Rangordnung werden der Gang, die Beschleunigung und die Verzögerung in Relation zur gefahrenen Strecke gemessen, um den Energieverbrauch zu ermitteln (Riener/Reder 2014). Der Energieverbrauch ist wesentlich vom gewählten Gang abhängig (Riener/Reder 2014). In einem späteren Schritt sollen genauere Angaben hinsichtlich des eingelegten Gangs, der Beschleunigung und der Verzögerung ermittelt werden, um weitergehende Erkenntnisse bezüglich des Feedbacks zu erhalten (Riener/Reder 2014). Das Feedback ermöglicht einen Vergleich unter den Teilnehmern und führt zu einer Energieeinsparung (Riener/Reder 2014). Es stellt sich hier die Frage, wie eine Umsetzung in der Praxis möglich sein kann, da allein aufgrund der verschiedenen Fahrzeugtypen die Energieverbräuche nicht miteinander vergleichbar sind.

Politis et al. (2014) untersuchen sieben Arten (visuell, haptisch, akustisch und ihre Kombinationen) von Feedback in Bezug auf Dringlichkeit und Effektivität. Eine hohe Dringlichkeit ist bei Energieverbrauchsanzeigen nicht gegeben. Hinsichtlich der Effektivität schneidet multimodales Feedback am besten ab, während unimodales Feedback weniger effektiv ist (Politis et al. 2014).

Die Arbeit von Shim et al. (2015) analysiert einen Spezialfall mit Autismus und wird daher nicht näher betrachtet.

In Tabelle 8 sind die multimodalen Feedbacksysteme aufgelistet.

Quelle	Objekt(e)	Art	Messung	Einheit	Feedback
Azzi et al. (2011)	k. A.	Visuell + haptisch	Geschwindigkeit	Pedalwinkel	In-Trip
Barbé et al. (2007)	GERICO System	Visuell + akustisch	Geschwindigkeit, Gangschaltung	k. A.	In-Trip
Corcoba Magaña/Muñoz Organero (2015)	Eco-Driving Assistent	Keine konkrete Angabe	Beschleunigung, Verzögerung	k. A.	In-Trip
Jamson et al. (2015a)	Dot eco-driving (a), Gauge eco-driving (b), Foot eco-driving (c)	Visuell + akustisch + haptisch	Winkel des Gaspedals	in %	In-Trip
Landau et al. (2014)	Energy Flow	Visuell, haptisch, akustisch, visuell + haptisch, haptisch + akustisch, visuell + akustisch, visuell + haptisch + akustisch	AttrakDiff Fragebogen, technical-human (humaneness)	k. A.	In-Trip
Loehmann et al. (2014)	Heartbeat	Visuell + haptisch	Energieverbrauch (1), Geschwindigkeit (2), Beschleunigung (3)	(1) k. A., (2) k. A., (3) k. A.	In-Trip
Magaña et al. (2012), Magaña/Muñoz-Organero (2011b), (Magaña/Muñoz-Organero 2011a)	Artemisa	Visuell + akustisch	Geschwindigkeit, Beschleunigung, Verzögerung, Gang	km/h, m/s <sup>2</sup> , m/s <sup>2</sup> , Buchstabe bzw. natürliche Zahl	In-Trip
Riener/Reder (2014)	Collective Data Sharing	Visuell + akustisch	Gang, Beschleunigung, Verzögerung jeweils in Relation zur Strecke	k. A.	In-Trip

Tabelle 8: Auswertung multimodale Feedbacksysteme  
Quelle: Eigene Darstellung, k. A. = keine Angaben

Die Wiedergabe des Feedbacks bei multimodalen Feedbacksysteme ist In-Trip. Landau et al. (2014) sind die einzigen, welche alle Kombinationen der Interaktion mit dem Fahrer messen und vergleichen. Ansonsten sind die Kombinationen visuell-haptisch und visuell-akustisch untersucht worden. In der Literatur findet sich keine einheitliche Messgröße.

### 3.5 Diskussion und Zusammenfassung

Die Literatursuche wurde zum ersten Mal im Mai 2013 durchgeführt und erneut im März 2017. In den Jahren von 2013 bis 2017 (blau markiert) hat sich die Wissensbasis zur Domäne nahezu verdoppelt, wie die Abbildung 17 verdeutlicht.

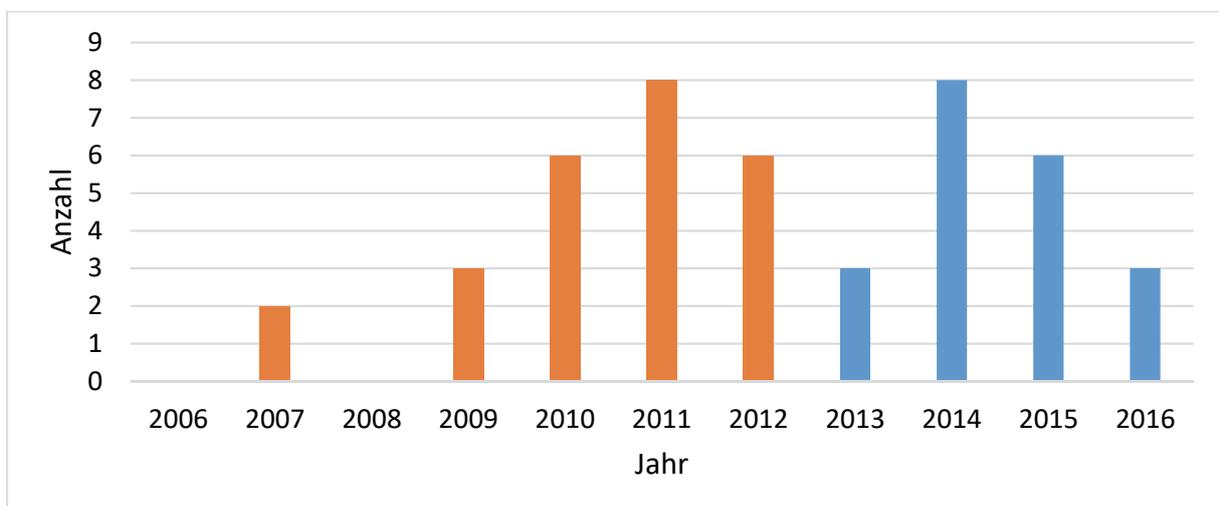


Abbildung 17: Gefundene Publikationen nach Jahren  
Quelle: Eigene Darstellung

Die Thematik des Energieverbrauchsfeedbacks ist weiterhin von Interesse, konzentriert seit 2011 jedoch stärker auf die Restreichweite von Elektrofahrzeugen (Jung et al. 2015; Lundström/Bogdan 2014; Lundström 2014; Lundström/Bogdan 2012; Strömberg et al. 2011).

Für die Auswertung wurden die Feedbacksysteme pro Quelle gezählt. Die Zählung führt zu Abweichungen, da noch tertiäre Quellen aufgezeigt wurden und doppelt verwendete wie bei Meschtscherjakov et al. (2009) und Wilfinger et al. (2010) nicht herausgerechnet wurden. Es wurden insgesamt 89 Feedbacksysteme zum energieeffizienten Fahren untersucht, davon arbeiten 70 visuell, acht haptisch, vier akustisch und acht multimodal. Die Ergebnisse von Seewald et al. (2013) und Dahlinger/Wortmann (2016) bestätigen die Verteilung der Quellen nach Interaktionskanälen. Dahlinger/Wortmann (2016) fanden in 25 Beiträgen nur einen zum haptischen Feedback. In Abbildung 18 ist die Verteilung in Anzahl und Prozent aufgezeigt.

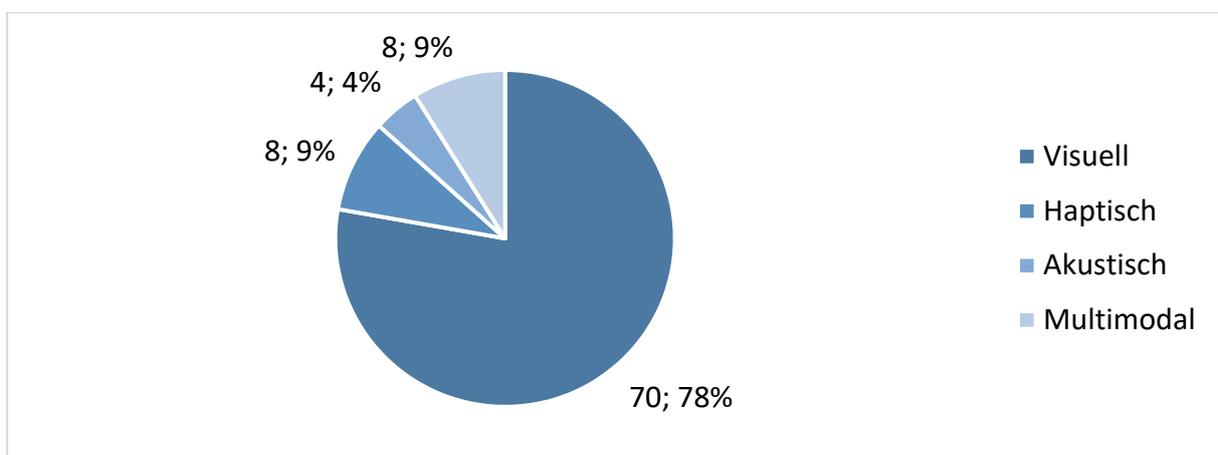


Abbildung 18: Verteilung der Feedbackarten  
Quelle: Eigene Darstellung

Der *haptische* Interaktionskanal bietet eine alternative Lösung für effektives Feedback, ohne den visuellen Kanal zu belasten. Die haptischen Feedbacksysteme geben In-Trip-Rückmeldungen.

Haptisches Feedback zur Energieeinsparung findet in der untersuchten Literatur wenig Anwendung (Birrell et al. 2013; Dahlinger/Wortmann 2016). Realisiert werden kann ein solches Feedback zum Beispiel durch ein haptisches Gegendruckpedal (Birrell et al. 2013; Mulder et al. 2008). Die Ergebnisse zeigen, dass die untersuchten haptischen Feedbacksysteme ein Gaspedal mit unterschiedlichen Aktionen zur Erzeugung von Eco-Driving verwenden. Allerdings zeigen die Ergebnisse von Meschtscherjakov et al. (2009), dass das Gaspedal als haptisches Feedback vom Nutzer nicht akzeptiert wird. Dagegen sprechen die Ergebnisse von Adell/Várhelyi (2008). Es stellt sich somit die Frage, ob ein haptisches Feedbacksystem denkbar ist, das nicht ans Gaspedal gebunden ist. Eine Möglichkeit ist die Vibration des Sitzes oder des Gurtes zur Erzeugung einer energieeffizienteren Fahrweise (Riener et al. 2010). Jedoch ist der Kunde nicht bereit, für ein haptisches Feedback-Element zusätzlich zu zahlen (Adell 2007). Es müsste also ein haptisches Feedbacksystem sein, für das dem Fahrer keine zusätzlichen Kosten entstehen und das nicht direkt mit der primären Fahraufgabe zusammenhängt. Eine mögliche Lösung stellt die Smartwatch dar, welche nicht Teil des Systems Fahrzeug ist. Zusätzlich wird die

Smartwatch als Feedback von der Erkenntnis gestützt, dass es zwischen dem Fuß und der Hand keine Unterschiede in der Wahrnehmung des haptischen Feedbacks gibt (Hajnal et al. 2007).

*Akustische* Feedbacksysteme haben den Vorteil, den visuellen Kanal zu entlasten (Nees et al. 2014). Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass im Gegensatz zu haptischen oder visuellem Feedback keine weitere Hardware erforderlich ist (Hammerschmidt, Tünnermann, & Hermann, 2014). Außerdem hat die Nutzung des akustischen Interaktionskanals den Vorteil, eine visuelle Überlastung zu vermeiden (Meschtscherjakov et al. 2009). Jedoch ist die Energieeffizienz des akustischen Feedbacks im Vergleich zu haptischem und visuellem Feedback geringer. Ein weiterer Nachteil der Nutzung des akustischen Interaktionskanals gegenüber dem visuellen Feedback besteht darin, dass der Nutzer den Zeitpunkt des Informationserhalts nicht selbst bestimmen kann (Meschtscherjakov et al. 2009). Es finden sich in der Literatur nur wenige akustische Systeme, was an der fehlenden Akzeptanz (Meschtscherjakov et al. 2009), mangelnder Eignung (Cao et al. 2010; Weinberg et al. 2011) oder störenden Nebengeräuschen (Riener et al. 2010) liegen kann. Akustisches Feedback ist aus zwei Gründen weniger geeignet als visuelles oder haptisches: Haptisches Feedback kann schneller als akustisches Feedback identifiziert werden (Cao et al. 2010) und visuelles Feedback weist weniger Fahrablenkung auf als akustisches (Weinberg et al. 2011).

*Visuelle* Feedbacksysteme sind sowohl in der Theorie als auch in der Praxis die häufigsten Anzeigen, obwohl seit Langem bekannt ist, dass die visuelle Wahrnehmung der primären Fahraufgabe zuzuordnen ist (Azzi et al. 2011). Allein das Halten einer Spur oder der Distanz verlangt so viel Aufmerksamkeit, dass Darstellungen in der Mittelkonsole ineffizient sind (Summala et al. 1998) und ihre Signale könnten in verschiedenen Situationen leicht übersehen und somit als Feedback nicht akzeptiert werden. An einer Verbesserung der Anzeigen wird noch immer geforscht, wie aktuelle Journalbeiträge beispielsweise von Jamson et al. (2015a) zeigen. Visuelle Feedbacksysteme zu verbessern und den Fahrer bei seiner primären Fahraufgabe zu unterstützen ist weiterhin von Bedeutung.

Genaue Richtlinien für die Gestaltung von visuellen Feedbacksystemen konnten nicht gefunden werden. Zudem ist die Vielfalt unter den Fahrertypen, welche zu analysieren sind, sehr groß und die Einsatzgebiete sind unterschiedlich, je nachdem ob es sich um Busse, LKWs, PKWs, öffentlichen oder gewerblichen Verkehr handelt. Die Anzeige ist bei jedem visuellen Feedbacksystem unterschiedlich. Beispielsweise verwendet Jamson et al. (2015a) die Farben blau, grün und rot, während Lee et al. (2010) grün (Optimum), weiß (Normalzustand) und rot (ineffiziente Fahrweise) benutzen. Die Messgröße von Jamson et al. (2015a) besitzt ein Optimum, welches den minimalen Energieverbrauch kennzeichnet. Mathematisch gesehen gehen Lee et al. (2010) von einem Grenzwert aus, welcher für  $x$  bis zu einem bestimmten Grenzwert gilt und somit eine Funktion wie  $f(x) = 1/(x+1)$  darstellt, während Jamson et al. (2015a) von einem globalen Minimum ausgehen, welches eher mit einer quadratischen Funktion wie  $f(x) = x^2+b$  verglichen werden kann. Das Eco-Speedometer-System besitzt nur die beiden Farben grün für optimal und gelb für nicht-optimal. Es kann als dichotom oder binär bezeichnet werden.

*Multimodales* Feedback scheint eine Möglichkeit zu sein, den Menschen von der primären Fahraufgabe nicht mehr als notwendig abzulenken und ihm gleichzeitig hinreichend Informationen geben zu können. Multimodales Feedback wurde in der Literatur bisher wenig untersucht. Das visuell-haptische Feedback weist die höchste Akzeptanz auf (Meschtscherjakov et al. 2009). Die Ergebnisse von Landau et al. (2014) bestätigen dieses Ergebnis. Die Verwendung von multimodalem Feedback wird auf Basis der untersuchten Literatur als ein geeignetes Feedback angesehen.

### 3.6 Forschungslücken

Die **Forschungslücken** lassen sich in fünf Kategorien unterteilen: Art der Information, Messmodell, multimodales Feedback, unimodales Feedback und Situation.

Die Kategorie **Situationen** nimmt Bezug auf die Frage in Abschnitt 3.1, ob Feedbacksysteme für ein energiebewussteres Fahren in unterschiedlichen Situationen verschieden wahrgenommen werden. Riener/Reder (2014) verstehen unter Situation verschiedene Verkehrssituationen wie Stopp-und-Go oder Stau; hier wird unter Situation verstanden, dass die Fahrstrecke bekannt ist, sich die Verhältnisse oder Umstände, in denen sich der Fahrer während einer Fahrt über die gesamte Dauer der Fahrstrecke befindet, aber ändern.

Die Ergebnisse der Literaturrecherche lassen keine Rückschlüsse auf spezielle Situationen wie den Weg zur Arbeit zu. Lediglich Politis et al. (2014) zeigen, dass multimodales Feedback in drei unterschiedlichen Dringlichkeitsstufen am besten abschneidet. Eine Übertragbarkeit auf Eco-Driving fehlt. Es stellt sich somit die Frage, ob je nach Situation ein entsprechender Interaktionskanal für eine energieeffiziente Fahrweise genutzt werden sollte. Insbesondere sind unterschiedliche Situationen eher motivierend oder nicht-motivierend und haben damit Einfluss auf die Fahrweise und können durch Feedbacksysteme beeinflusst werden.

Aus den vorherigen getroffenen Überlegungen ergibt sich die Forschungsfrage: *Was ist der Effekt eines Feedbacksystems auf das Verhalten einer Person beim Fahren in bestimmten Situationen?*

**Unimodales Feedback** wurde bisher vornehmlich in Bezug auf den visuellen Kanal untersucht. Jedoch kann visuelles Feedback durch eine Kombination mit dem haptischen Interaktionskanal den Fahrer entlasten (Cao et al. 2010). Als mögliches haptisches Feedbacks kommt eine Smartwatch in Frage. Fitnessarmbänder erscheinen als eine weitere Möglichkeit, sind jedoch wegen der asynchronen Kommunikation für In-Trip Feedback nicht geeignet. Smartwatches ermöglichen synchrone Kommunikation und somit ein unmittelbares Feedback. Akustisches Feedback ist wegen der vielen in Unterkapitel 3.5 erörterten Nachteile gegenüber haptischem und visuell Feedback nicht heranzuziehen (Cao et al. 2010; Weinberg et al. 2011; Riener et al. 2010; Meschtscherjakov et al. 2009). Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das haptische Feedback von den einzelnen Feedbackarten als am geeignetsten identifiziert wurde, der Fokus der bisherigen Untersuchungen jedoch auf dem Gaspedal lag.

**Multimodales Feedback** ist bisher wenig untersucht worden und nur mit kleinen Probandengrößen, die Verallgemeinerungen nicht zulassen. Es scheint jedoch sicher zu sein, dass multimodales Feedback zu einem energieeffizienterem Fahrstil führt als unimodales Feedback (Politis et al. 2014). Die Studien zeigen, dass die Kombination aus visuellem und haptischem Feedback besonders für Elektrofahrzeuge geeignet zu sein scheint (Landau et al. 2014). Jamson et al. (2015a) weisen explizit auf weiteres Untersuchungspotenzial im Hinblick auf den Energieverbrauch bei visuell-haptischem Feedback hin. Des Weiteren bekunden die Ergebnisse der Literaturrecherche, dass Altersunterschiede einen Unterschied hinsichtlich der Bedienbarkeit von komplexen Systemen machen. Jüngere Menschen kommen mit komplexeren Systemen einfacher zurecht als ältere (Barbé et al. 2007).

Ein **Messmodell** für das Eco Driving ist bisher nicht vorhanden, obwohl sich zahlreiche Beiträge mit dem Energieverbrauch auseinandersetzen und Regeln für einen ökologischen, umweltfreundlichen und energieeffizienten Fahrstil aufstellen (Ando/Nishihori 2011; Andrieu/Saint Pierre 2014; Azzi et al. 2011; Barkenbus 2010; Barbé et al. 2007; Beusen et al. 2009; Boriboonsomsin et al. 2010; Caulfield et al. 2014; Magaña/Muñoz-Organero 2011a, 2011b; Cristea et al. 2012; Álvarez et al. 2014; Dogan et al. 2011; Harvey et al. 2013; Hiraoka et al. 2009; Inbar et al. 2011; Kaufmann-Hayoz et al. 2012; Kircher et al. 2014; Lee et al. 2010; Magaña et al. 2012; McIlroy et al. 2013; Pace et al. 2007; Rakotonirainy et al. 2011; Rouzikhah et al. 2013; Sivak/Schoettle 2012; Wada et al. 2011).

Einige Regeln, um energieeffizienter zu fahren, wie das *Hochschalten alsbald als mögliche* (Beusen et al. 2009) oder *das so spät wie mögliche Runterschalten* (Kaufmann-Hayoz et al. 2012) sind nicht präzise, während andere Quellen konkretere Messgrößen wie die Berechnung von optimalen Pedalwinkeln für die Beschleunigung liefern (Wada et al. 2011; Jamson et al. 2015a). Manche Fahrregeln sind nicht nur vage oder unzureichend definiert, sondern in den meisten Beiträgen wird auch energiebewusstes Fahren unzureichend oder gar nicht definiert. Es stellt sich daher die Frage, wie energiebewusstes Fahren gemessen werden kann. Die Entwicklung eines Messmodells erfordert ein Klassifikationsschema, anhand dessen der Energieverbrauch und damit das Eco-Driving konkret bestimmen werden könnte.

Die **Art der Informationen**, welche dem Fahrer für eine energieeffiziente Fahrweise mitgeteilt werden sollen, ist nicht klar definiert worden (Tractinsky et al. 2011). Allerdings verfügen moderne Fahrzeuge über zahlreiche Sensoren, welche für die Messung herangezogen werden könnten, auch wenn es noch kein einheitliches Messmodell gibt.

Aus den Erkenntnissen des Unterkapitels 3.5 geht hervor, dass das haptische Feedback am geeignetsten erscheint und dass eine Kombination von visuellem und haptischem Feedback für das Erzeugen einer energieeffizienten Fahrweise am geeignetsten ist.

Der Forschungsschritt 1 ist umfassend untersucht worden. Im nächsten Schritt kann mit der Vorbereitung der Experimente begonnen werden, um den dritten Teil des Forschungsdesigns zu untersuchen und damit Forschungsfrage 2 und 3 zu bearbeiten. In Abbildung 19 ist die Forschungsmethodik in Gänze dargestellt.

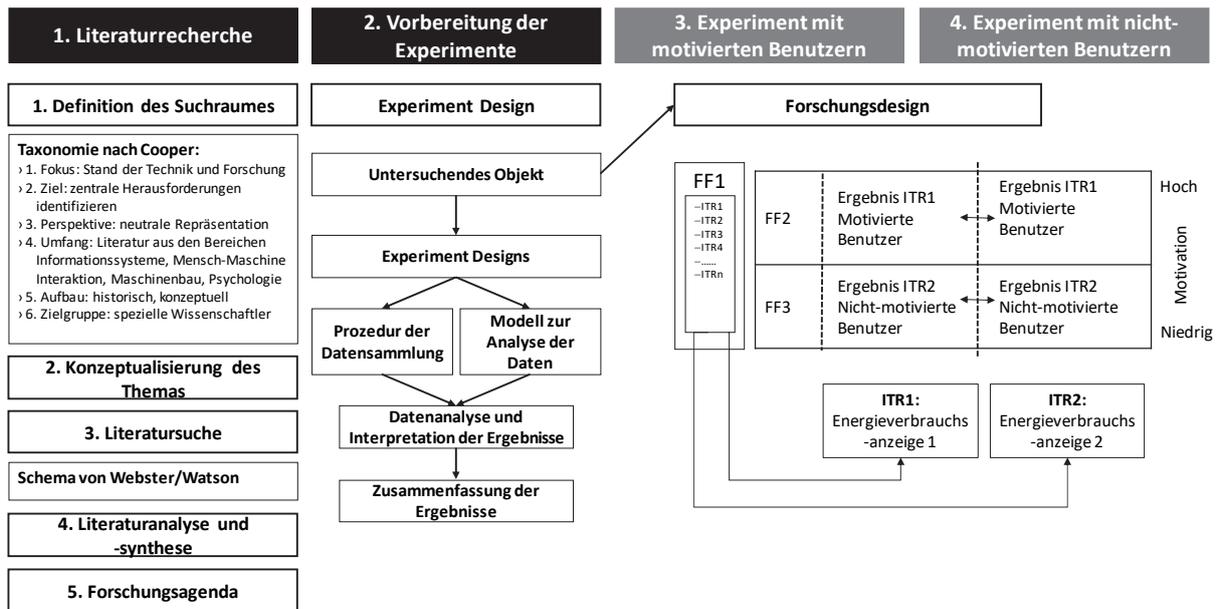


Abbildung 19: Forschungsmethodik  
 Quelle: Eigene Darstellung

Die Forschungsfrage 1 ist somit beantwortet. Die Vorbereitungen für die Experimente und die Forschungsfragen 2 und 3 können eingehend untersucht werden.

## 4 Planung des Fahrsimulatorexperiments

Das Forschungsdesign aus Unterkapitel 2.3 wurde um die ITRs aus Unterkapitel 3.6 ergänzt. Im Weiteren sind aus der Theorie die **Hypothesen** abzuleiten. Danach kann das **Experiment-design**, welches in Abschnitt 2.1.2 skizziert wurde, festgelegt werden.

### 4.1 Hypothesen

In der betrachteten Domäne von ITRs in Kapitel 3 werden drei Feedbackarten untersucht. Es stellte sich heraus, dass visuelles Feedback das am meisten untersuchte Feedback ist. Alternative Feedbacksysteme, welche zu einem geringeren **Energieverbrauch** führen, sollen untersucht werden.

Feedbacksysteme haben einen Einfluss auf den Energieverbrauch. Somit ergibt sich die Hypothese H1:

*H1: Feedbacksysteme haben einen Effekt auf den Energieverbrauch.*

Für den Energieverbrauch ergeben sich aus der Forschungslücke in Unterkapitel 3.6 zwei zu untersuchende Objekte: unimodal und multimodal.

Als **unimodales** Feedback wurden in Unterkapitel 3.6 der visuelle und der haptische Interaktionskanal untersucht. Das haptische ist besser als visuelles und akustisches Feedback geeignet und die Kombination von visuellem und haptischem Feedback ist am effektivsten, da es schneller beim Fahren identifiziert werden kann (Cao et al. 2010). In Bezug auf den Energieverbrauch lässt sich laut Azzi et al. (2011) jedoch kein Unterschied zwischen visuellem Feedback und haptischem Feedback erkennen. Hibberd et al. (2015) behaupten hingegen, dass haptisches Feedback im Vergleich zu visuellem Feedback einen signifikanteren Effekt auf den Energieverbrauch hat, wobei eine schnellere Identifikation des Feedbacks nicht gleichzusetzen ist mit einem geringeren Energieverbrauch. Aus diesem Forschungsstand ergibt sich die Hypothese H1.1:

*H1.1: Visuelles Feedback führt zu einem gleichen oder größeren Energieverbrauch als haptisches Feedback.*

**Multimodales** Feedback ist besser geeignet als unimodales Feedback (Landau et al. 2014; Boesche et al. 2013; Politis et al. 2014). Das unimodale Feedback ist entweder visuell oder haptisch. Für das multimodale, visuell-haptische Feedback leiten sich somit die Hypothesen H1.2a und H1.2b ab:

*H1.2a: Visuell-haptisches Feedback führt zu einem geringeren Energieverbrauch als haptisches Feedback.*

*H1.2b: Visuell-haptisches Feedback führt zu einem geringeren Energieverbrauch als visuelles Feedback.*

Es lässt sich somit ableiten, dass der Energieverbrauch eines visuellen Feedbacks  $EV_v$  größer oder gleich dem Energieverbrauch eines haptischen Feedbacks  $EV_h$  ist, während der Energieverbrauch des haptischen Feedbacks größer als die Kombination von visuellem und haptischem Feedback  $EV_{v+h}$  ist. Daraus ergibt sich für den Energieverbrauch in Bezug auf Feedbacksysteme die Formel 4.1:

$$EV_{v+h} < EV_h \leq EV_v \quad 4.1$$

Unabhängig davon ist zu analysieren, wie sich einzelne Eco-Driving-Feedbacksysteme auf den Energieverbrauch auswirken. Es werden zwei Beispiele für motivierte und nicht-motivierte Fahrer herangezogen. Die Motivation beeinflusst das Verhalten und kann über Energieverbrauchsfeedbacksysteme beeinflusst werden (Ajzen 1991; Ajzen/Fishbein 1975; Loock et al. 2013). In den beiden Situationen „motiviert“ und „nicht-motiviert“ werden die zuvor beschriebenen Feedbackarten visuell, haptisch und visuell-haptisch untersucht. Es werden explorativ zwei unterschiedliche Szenarien für motivierte und nicht-motivierte Nutzer (S1 und S2) zur Messung der Wirksamkeit entwickelt. Daraus ergibt sich die Hypothese H2:

*H2: Das Szenario S1 (motivierter Nutzer) hat im Vergleich zu dem Szenario S2 (nicht-motivierte Nutzer) einen unterschiedlichen Energieverbrauch.*

Das **Energiebewusstsein** ist bisher als Einflussgröße nicht untersucht worden. Es wird angenommen, dass das Energiebewusstsein einen Einfluss auf die Effekte hat. Energiebewusstsein ist somit als Moderator zu verstehen. Somit ergibt sich die Hypothese H3:

*H3: Das Energiebewusstsein eines Fahrers hat einen Effekt auf die Effektivität von Energieverbrauchsfeedbacksystemen.*

Aus den hergeleiteten Hypothesen ergibt sich das in Abbildung 20 dargestellte Forschungsmodell.

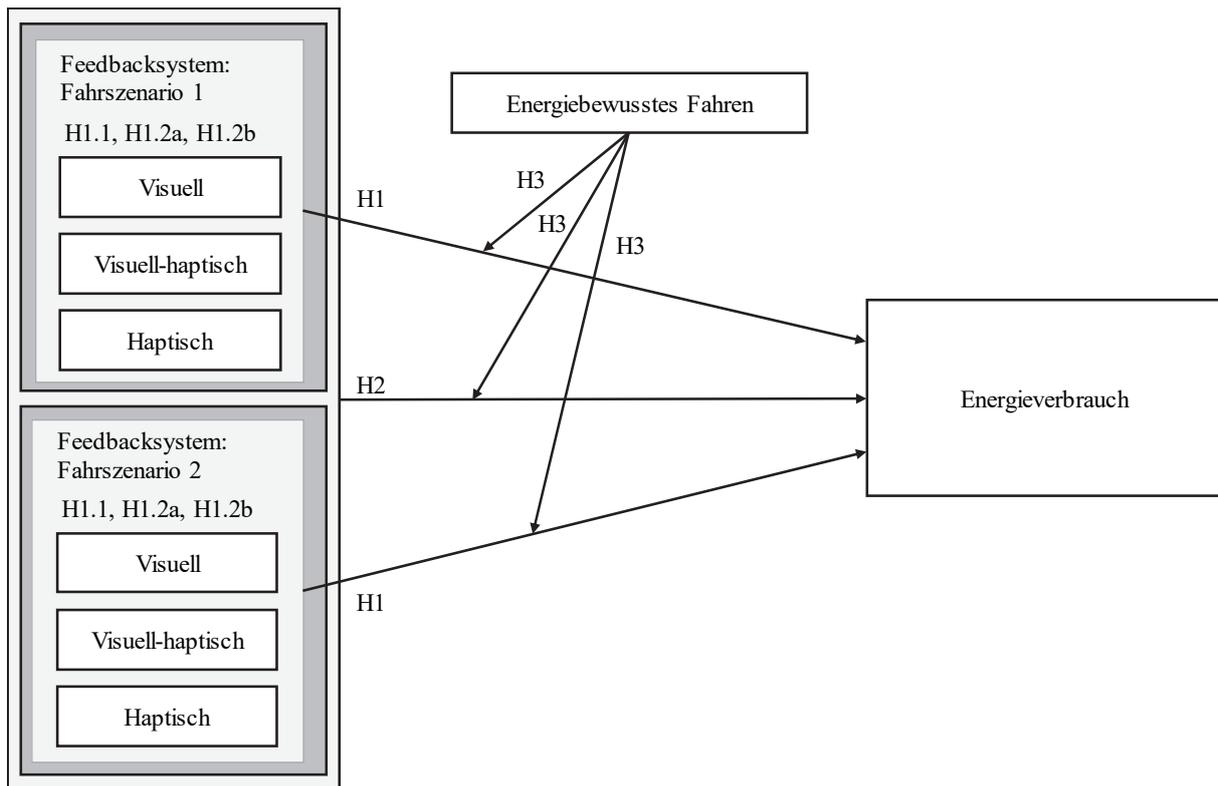


Abbildung 20: Forschungsmodell  
Quelle: Eigene Darstellung

## 4.2 Experimentdesign im Detail

In Abschnitt 2.1.2 wurde das Experimentdesign nach Lawson (2015, 6-7) bereits skizziert. Die Experimentsskizze kann nun um die Forschungslücken aus dem Domänenverständnis erweitert werden.

### 4.2.1 Definition des Untersuchungsobjektes

Das in Unterabschnitt 2.1.2.1 beschriebene Untersuchungsobjekt bleibt der Energieverbrauch. Der Verbrauch soll im Fahrsimulator auf einer bestimmten Strecke erhoben werden, welche in Kapitel 8 näher definiert wird. Auf der Strecke wird der Energieverbrauch in l/100 km als unabhängige Variable gemessen.

Aus dem Ergebnis der Forschungsfrage 1 und den aufgestellten Hypothesen ergeben sich die Untersuchungsobjekte (Treatments) als abhängige Variablen. Die abhängigen Variablen unterteilen sich in zwei Gruppen: Feedback und Szenarien.

#### 4.2.1.1 Feedback

Dem Feedback werden drei Energieverbrauchsfeedbacksysteme zum Testen der Hypothesen H1.1, H1.2a und H1.2b zugeordnet: ein (i) visuelles, ein (ii) haptisches und ein (iii) visuell-haptisches.

Das *visuelle* Feedback ist die in Abschnitt 3.4.1 am besten evaluierte Eco-Foot-Anzeige von Jamson et al. (2015b). Es wird eine bekannte Anzeige verwendet, um einen Vergleich zu den

neuen haptischen Feedbacksystemen zu ermöglichen. Das Feedback wird dem Fahrer im Armaturenbrett zwischen der Geschwindigkeits- und der Drehmomentanzeige visualisiert. Hier soll der Unterschied zwischen einem Head-up-Display und Head-down-Display nicht untersucht werden. Head-up-Displays sind in der Arbeit von Pace et al. (2007) untersucht worden.

Das *haptische* Feedback erfolgt durch eine Smartwatch, welche in Anlehnung an das visuelle Feedback erfolgt. Bei der verwendeten Smartwatch handelt es sich um die LG Urban aus der Produktion von 2015. Es wird erstmalig eine Smartwatch als Energieverbrauchsfeedbacksystem eingesetzt.

Das visuell-haptische Feedback setzt sich aus der Smartwatch – dem haptischen Feedback und der Eco-Foot-Anzeige – und dem visuellen Feedback zusammen.

#### 4.2.1.2 Szenarien

Den Szenarien werden den Situationen zugeordnet. Die Umbenennung von Situationen in Szenarien ist notwendig, um Verwechslungen zu vermeiden, da ein oder mehrere Fahrmanöver/Fahrsituationen einem Szenario zugeordnet werden. Die Szenarien dienen dazu, die Hypothese H2 zu beantworten.

Zur Verstärkung des Effekts in der Kontrollvariablen werden zwei Szenarien gewählt, die besonders motivierend oder nicht-motivierend sein sollen. Die Kontrollvariable wird in Kapitel 6 eingehender erörtert und erfasst das Energiebewusstsein als einen Moderator. Das Untersuchungsobjekt Szenarien ist in zwei Schritte unterteilt, in den Vergleich des Energieverbrauchs und in die detailliertere Betrachtung der einzelnen Feedbacksysteme je Szenario.

Es sind zunächst zwei Szenarien zu identifizieren, welche die Probanden in dem einen Szenario motivieren und im anderen nicht motivieren, die Feedbacksysteme zu verwenden. Für die Identifizierung geeigneter Szenarien werden die Erkenntnisse von Fogg (2009b) über die Auslöser menschlichen Verhaltens herangezogen. Das Verhalten wird nach Fogg (2009b) in Bezug auf Motivation und Fähigkeit bewertet.

Die **Motivation** wird über die Elemente Vergnügen/Schmerz, Hoffnung/Angst und/oder soziale Akzeptanz/Ablehnung geprüft (Fogg 2009b). Vergnügen/Schmerz ist der Haupttreiber für die Motivation, jedoch stellt sich bei Schmerzen die Frage nach der Ethik des Experiments. Da dieses Element kein Spektrum ist, sondern eine dichotome Verteilung (Fogg 2009b), müsste den Probanden in dem einen Szenario Vergnügen und in dem anderen Schmerzen bereitet werden, und sie wird für das Experiment nicht herangezogen. Das Element Hoffnung/Angst könnte über die Faktoren Zeit oder Energieeffizienz eingeführt werden, d. h. ob jemand rechtzeitig an einem Ort eintrifft. Energieeffizienz würde als Anreiz bedeuten, beispielsweise die Besten zu belohnen und gleichzeitig eine mögliche Verzerrung der Experimentdaten erzeugen. Die Verzerrung wird ausgelöst, wenn den Probanden mitgeteilt werden würde, worum es genau in dem Experiment geht, da die Probanden versuchen würden so energieeffizient wie möglich zu fahren. Das Element soziale Akzeptanz/Ablehnung erscheint dahingehend geeigneter zu sein, das Fahrszenario so zu wählen, dass es gesellschaftlich akzeptiert wird, langsamer oder schneller zu fahren. Dies kann durch soziale Ablehnung verstärkt werden (Fogg 2009b).

Die **Fähigkeit** wird anhand der Simplizitätsfaktoren Zeit, Geld, physische Leistung, „Brain Cycles“, soziale Abweichungen und Nicht-Routineaufgaben untersucht (Fogg 2009b). Unter den Brain Cycles wird intensives Nachdenken verstanden (Fogg 2009b). Die Zeit ist nach Fogg (2009b) einer der Hauptgründe, die das Verhalten beeinträchtigen kann. Eine „unbegrenzte“ Zeit ermöglicht es somit, sich neben der primären Fahraufgabe auf weitere Feedbacksysteme zu konzentrieren, während Zeitdruck das Gegenteil bewirkt. Geld ist ein weiterer Anreiz, da sich energieeffizienteres Fahren indirekt auf den Preis je gefahrenen Kilometer auswirkt.

Die physische Leistung sollte in beiden Szenarien gleich gehalten werden. Ebenso sind die Feedbacksysteme so zu gestalten, dass keine größere Ablenkung verursacht wird. Dies schließt die Brain Cycles aus. Soziale Abweichungen können eingesetzt werden, um die Szenarien so zu gestalten, dass in dem einen eine sichere und folglich langsamere sowie in dem anderen eine zügigere Fahrweise impliziert wird. Dem Fahrer zusätzliche Nicht-Routineaufgaben zu stellen fördert die Ablenkung von der primären Fahraufgabe und ist daher nicht anzuwenden.

Die zwei Dimensionen mit den jeweiligen Elementen ermöglichen zahlreiche Kombinationen und damit mögliche Fahrscenarien für die Auswahl zweier passender Szenarien.

Der Unterschied zwischen motivierten und nicht-motivierten Fahrern soll, wie bei den Treatments, mithilfe der unabhängigen Variable Energieverbrauch, welche in Unterabschnitt 2.1.2.1 beschrieben wurde, gemessen werden. Die Szenarien dienen damit der Beantwortung der Forschungsfragen 2 und 3. Die Messung der unterschiedlichen Feedbacksysteme beruht auf den Ergebnissen der Literaturrecherche und damit der Beantwortung der Forschungsfrage 1.

#### **4.2.1.2.1 Nicht-motivierte Benutzer**

Die Auswahl der Fahrscenarien erfolgte in einem kollegialen Brainstorming am Lehrstuhl, in zwei Iterationen. Den Kollegen wurde mitgeteilt, dass das Szenario ein motivierendes und ein nicht-motivierendes sein soll, um den Effekt zwischen den motivierten und den nicht-motivierten Fahrern messen zu können. Das Brainstorming ergab für nicht-motivierte Benutzer zur Nutzung eines Energieverbrauchsfeedbacksystems ein mögliches FahrscENARIO „Pendler“.

Im Jahr 2015 pendelten täglich 60 % der Arbeitnehmer in Deutschland zur Arbeit (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2017). Jeder Studierende aus Garching muss zum TUM Standort Garching pendeln, da keine Wohngebäude am Standort vorhanden sind. Die Experimente finden an der Universität in Garching statt. Somit ist generell das FahrscENARIO „Pendler“ geeignet.

Das rechtzeitige Erscheinen am Arbeitsplatz, hier gleichbedeutend mit Studienort oder Vorlesung, führt zu einer zeitlichen Abhängigkeit. Damit die Probanden jedoch nicht vollständig auf die Zeit fokussiert sind, werden weder eine genaue Uhrzeit angegeben noch ein Messinstrument zur Darstellung der Zeit verwendet. Eine zügige Fahrweise ist erwünscht, so ist der Kontext des Fahrscenarios entsprechend zu gestalten. Die Gestaltung mit einem zu späten Erscheinen am Arbeitsplatz soll dem Fahrer zeigen, dass eine soziale Ablehnung erfolgen könnte, wenn er nicht rechtzeitig erscheint. Somit wurden zwei Elemente im FahrscENARIO „Pendler“ gefunden, welche geeignet erscheinen, das Energieverbrauchsfeedback zu missachten.

Den Probanden kann folglich mitgeteilt werden: „Stellen Sie sich vor, Sie befinden sich auf dem Weg zur Arbeit und sollen rechtzeitig zu einem Termin erscheinen.“

#### **4.2.1.2.2 Motivierte Benutzer**

Es ist ein Fahrscenario zu identifizieren, welches nach Möglichkeit gegenteilige Elemente aufweist wie das in Unterabschnitt 4.2.1.2.1 vorgestellte Fahrscenario „Pendler“. Folglich ist herauszustellen, dass genügend Zeit ist und langsames Fahren akzeptiert wird.

Typischerweise fährt der Pendler werktags morgens zur Arbeit und abends zurück zu seinem Wohnsitz. Umgekehrt wird das Fahrzeug beispielsweise für Einkäufe, Transport oder Ausflüge verwendet.

Beim Ausflug ist der Zeitdruck durch Termine nicht gegeben. Für die soziale Akzeptanz kann ein Ausflug mit den eigenen Kindern auf der Rücksitzbank angedacht werden, sodass das Ziel sicher erreicht werden kann. Die zwei Elemente ergeben das Fahrscenario „Familie“, welche den Benutzer motiviert, das Energieverbrauchsfeedback zu nutzen.

Aus den Ergebnissen der Unterabschnitte 4.2.1.1 und 4.2.1.2 ergibt sich ein 2 x 3 faktorielles Laborexperiment mit Fahr Simulator (Meschtscherjakov et al. 2009; Truschin et al. 2014). Es enthält zwei abhängige Variablen, die Fahrscenarien „Familie“ und „Pendler“, und drei abhängige Variablen für das Energieverbrauchsfeedback: visuell, haptisch und visuell-haptisch.

### **4.3 Auswahl des Experimentdesigns im Detail**

Creswell (2012, 307 ff.) unterscheidet zwei Typen von Experimentdesigns: Between-Subject-Design und Within-Subject-Design. Bei einem Between-Subject-Design werden die Teilnehmer in Gruppen aufgeteilt und jeweils einem Untersuchungsobjekt zugeordnet, während bei einem Within-Subject-Design alle Teilnehmern jedes Untersuchungsobjekt erhalten.

Die Feedbacksysteme werden mittels Between-Subject-Design durchgeführt. Hingegen werden die Szenarien als Within-Subject-Design durchgeführt.

Zusätzlich soll das Energiebewusstsein als Kontrollvariable, welche in Kapitel 6 näher untersucht wird, in einer Post-Erhebung gemessen werden. Dadurch soll ermöglicht werden, einen vorhandenen Einfluss des Energiebewusstseins auf das Fahrverhalten hinsichtlich der Nutzung eines Energieverbrauchsfeedbacksystems aufzudecken.

### **4.4 Prozedur und Modell für die Datengenerierung und -analyse**

Die Prozedur folgt dem 2 x 3 faktoriellen Experimentdesign. Es werden drei Gruppen gebildet: je eine für das jeweilige Feedbacksystem und zwei für die Szenarien. Die Szenarien sind als Einzelfallstudie mit zwei unterschiedlichen Treatments zu behandeln. Es werden somit sequenziell die Szenarien nach dem A-B-A-B-Phasen-Schema geprüft (Kirk 2013, 16). In der *Phase A* wird eine Baseline ohne Treatment gefahren. Die Baseline ist als Kontrollgruppe anzusehen. Die *Phase B* dient zum Vergleich mit Phase A und erfolgt mit einem Treatment.

Als Treatment werden die Feedbacksysteme aus Unterabschnitt 4.2.1.1 herangezogen, wobei die Smartwatch Auswirkungen auf die auszuwählende Grundgesamtheit hat. Für die Grundgesamtheit wird eine technikaffine Gruppe benötigt, welche ein grundlegendes Verständnis für die Technik hat, da die eingesetzte Smartwatch eine abhängige Variable darstellt. Studierende der Wirtschaftsinformatik und der Informatik sind hierfür geeignet.

Zur Messung der Ergebnisse ist die bereits in Unterabschnitt 2.1.2.3 beschriebene ANOVA ein geeignetes Mittel, welche durch die Ergebnisse der Literatursuche als geeignete Messmethode für Fahrsimulatorexperimente bestätigt wird (Azzi et al. 2011; Jamson et al. 2015a; Meschtscherjakov et al. 2009).

Abschließend sind für das Experimentdesign die Moderatoren festzulegen. Neben den gängigen Moderatoren für Fahrsimulatorexperimente wie Alter, Geschlecht und Fahrerfahrung werden die Moderatoren Postleitzahl, eigenes Fahrzeug, Typ des Fahrzeugs, Gewohnheit von Automatikgetriebe, gültige Fahrerlaubnis, Anzahl der Jahre im Besitz einer Fahrerlaubnis, durchschnittlich gefahrene Kilometer pro Jahr, Häufigkeit, in der mit dem Fahrzeug gefahren wird, Häufigkeit des Spielens von Rennspielen, Art des Rennspiels, Studienfach sowie angestrebter Abschluss verwendet.

- a) Das **Alter** wird herangezogen und um eine Vergleichbarkeit mit anderen Studien zu ermöglichen. Für das Experiment wurden bewusst junge Teilnehmer gewählt (Zhang et al. 2007; Truschin et al. 2014).
- b) Das **Geschlecht** wird wegen möglicher geschlechtsspezifischer Unterschiede berücksichtigt (Zhang et al. 2007).
- c) Die **Postleitzahl** dient zwei Zwecken: Sie zeigt zum einen regionale Unterschiede auf und lässt die Unterscheidung zwischen stadtauswärts und stadteinwärts fahrenden Pendlern zu.
- d) Die Erfassung der **Fahrerfahrung** erfolgt anhand verschiedener Variablen. Bekannt ist die Erfassung über die durchschnittlich gefahrenen Kilometer pro Jahr, welche in der Literatur auch als Mileage bezeichnet wird (Truschin et al. 2011; Zhang et al. 2007).
- e) Zusätzlich wird erfragt, wie lange die Probanden bereits im **Besitz einer Fahrerlaubnis** sind. Schließlich kann es sein, dass ein Proband sehr viele Kilometer gefahren ist, aber nicht über einen längeren Zeitraum.
- f) Um die Zeitspanne in Relation zu den Kilometern pro Jahr einschätzen zu können, wird die **Nutzungsfrequenz des Fahrzeugs** mit einer 6er-Likert-Skala von täglich zu zweimal die Woche über einmal die Woche zu zweimal im Monat über einmal im Monat und weniger gemessen.
- g) Aus den **gefahrenen Kilometern pro Jahr** mit Bezug zur Zeitspanne des Besitzes einer Fahrerlaubnis kann ein Index berechnet werden. Der Index ermöglicht die Ergebnisse der Studie mit den Ergebnissen von Studien mit älteren Teilnehmern zu vergleichen.
- h) Ein **Automatikgetriebe**, wie es beim Fahrimulator der Fall ist, könnte bei der jungen Generation unbekannt sein. Die Verwendung eines Automatikgetriebes könnte jedoch einen Effekt haben. Deshalb wird abgefragt, ob eine automatische, manuelle oder beide Gangschaltungsarten bekannt sind. Außerdem wird die Selbsteinschätzung der Teilnehmer, inwiefern die Benutzung eines Automatikgetriebes gewohnt ist, mit einer 7er-Likert-Skala von eins (stimme gar nicht zu) bis sieben (stimme voll und ganz zu) erfragt.

- i) **Computerspiele** könnten einen Einfluss auf das Modell haben. So wird vermutet, dass eine Person, die Rennspiele spielt, mehr Erfahrung im Umgang mit einem Fahrsimulator besitzt als eine Person, die Rennspiele gar nicht oder nur sehr selten spielt. Für die Erfassung wird die Häufigkeit des Rennspielesfahrens mit sechs vorgegebenen Größen erfragt (täglich, zweimal die Woche, einmal die Woche, zweimal im Monat, einmal im Monat oder weniger häufig).
- j) Das **Studienfach** und der **angestrebte Abschluss** dienen zur weiteren Differenzierung der Teilnehmer.

#### 4.5 Datenanalyse und Interpretation der Ergebnisse im Detail

Nach der Literaturrecherche sind weitere Variablen zur Datenanalyse und Interpretation aus Unterabschnitt 2.1.2.4 hinzugekommen, welche näher zu beschreiben sind.

Die Fahrscenarien werden mittels ANOVA ausgewertet. Für die Auswertung sind die Daten der Fahrscenarien in das jeweilige Szenario zu transponieren. Somit wird ein Fall je Zeile einem Fahrer mit Daten nach Runde (Baseline, Szenario) zugeordnet. Für eine Auswertung nach Runden müssen die Daten je Zeile einem Szenario nach Fahrer zugeordnet werden. Die Messung der Szenarien erfolgt sequenziell, d. h. rundenbasiert, während das Treatment in allen von einem Fahrer gefahrenen Runden gleich bleibt. Die Ergebnisse sind bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$  ab  $p < 0,05$  relevant. Daran schließt sich die Messung der Effektgröße an.

Die Moderatoren werden mit dem PROCESS Makro von Hayes (2013) überprüft. Die Moderatoren sind einzeln zu testen. Weist der p-Wert Signifikanz aus ( $p < 0,05$ ), wird analysiert, in welcher Stärke sich der Effekt auf das Modell auswirkt.

Die Moderatoren Studienfach und angestrebter Abschluss werden nur ausgewertet, falls mindestens fünf Personen für jede Gruppe identifiziert werden, um die Anonymität der Teilnehmer sicherstellen zu können.

#### 4.6 Limitationen im Forschungsdesign

Die Analyse beschränkt sich auf die interne Validität. Effekte durch externe Faktoren können weitgehend ausgeschlossen werden, was allerdings die Verallgemeinbarkeit und Übertragbarkeit der Grundgesamtheit einschränkt.

Die Auswahl der Studierenden für die Testgruppe grenzt den Teilnehmerkreis auf junge Probanden mit i. d. R. geringerer Fahrerfahrung ein. Eine Übertragbarkeit auf ältere Probanden ist nicht zwangsläufig möglich.

Die Komplexität des Experimentes ist mit einem 2 x 3 faktoriellen Design und der Verwendung unterschiedlicher Designs als hoch anzusehen.

Ein wesentlicher Vorteil des komplexen Designs ist, dass aufgrund der Mischung der verschiedenen Experimentdesigns die Vor- und Nachteile von komplett randomisierten und faktoriellen

Designs verbunden werden. So ist das faktorielle Design robuster als das komplett randomisierte (Friedman/Sunder 1994, 27). Umgekehrt führt das randomisierte Design zu einer geringeren Stichprobengröße (Friedman/Sunder 1994, 27).

Ein weiterer Vorteil ist, dass das Design ermöglicht, Einflüsseffekte der Motivation in bestimmten Szenarien auf die Gestaltung der Energieverbrauchsfeedbacksysteme zu messen (Kirk 2013, 431). Und es können mehrere Treatments (Szenarien und Energieverbrauchsfeedbacksysteme) gleichzeitig untersucht werden (Kirk 2013, 431). Die Treatments besitzen die gleiche Präzision (Kirk 2013, 431).

Dem steht der für die Verhaltensforschung typische hohe Grad der Komplexität gegenüber (Kirk 2013, 431).

Das Experiment ist von der Probandenanzahl im Vergleich zu explorativen Experimenten deutlich größer (Kirk 2013, 431). Zufallsentdeckungen sind bei dem Design relativ gesehen geringer (Kirk 2013, 431). Im Allgemeinen könnte die Analyse eine kleinere Effektgröße aufweisen (Kirk 2013, 431). Jedoch führt das Design zu einer verstärkten Realitätsnähe, da mehrere Einflussgrößen zu anderen Effekten führen können.

Zusätzlich sind die Vor- und Nachteile von Within- und Between-Subject-Designs zu betrachten. Ein Within-Subject-Design erfordert zwar eine geringere Anzahl an Probanden, jedoch können durch das wiederholte Durchführen Lerneffekte auftreten (Friedman/Sunder 1994, 28). Zur Verringerung dieses Effektes wird zwischen den Treatments eine erneute Baseline gefahren. Eine zweite Baseline könnte den Probanden bei der Fahraufgabe langweilen (Friedman/Sunder 1994, 28). Es wird daher empfohlen, kein Experiment länger als zwei Stunden pro Proband anzusetzen (Friedman/Sunder 1994, 28). Hingegen ist beim Between-Subject-Design die Anzahl an Probanden i. d. R. höher, da jedes Treatment einem Probanden zugeordnet wird.

Zufällig könnten genau die Teilnehmer einem Treatment zugewiesen sein, bei denen kein Effekt festzustellen ist. Der Verzerrung wird durch die zufällige Auswahl und eine ausreichend große Anzahl an Probanden vorgebeugt.

Experimente können nicht perfekt geplant (Quenouille 1953, 5), sondern nur systematisch vorbereitet werden. Zur Vorbeugung durchlief das Experimentdesign in der internen Forschungsgruppe mehrfach einen Review-Prozess und ist zusätzlich extern bei Konferenzen mit dem Double-blind-peer-reviewed-Prozess verfeinert worden.

Die Planung des Fahrsimulatorexperiments erwies sich als geeignet, um den Energieverbrauch in unterschiedlichen Szenarien mit visuellem, haptischem und visuell-haptischem Feedback zu messen. Die Betrachtung von Effekten des Energiebewusstseins als Moderator in verschiedenen Szenarien führt zu einer höheren Grad an Komplexität im Experiment.

## 5 Messmodell: Energieverbrauch

Ein einheitliches Messmodell für Energieverbrauch konnte in der Literatur nicht gefunden werden. Für die Erfassung des Energieverbrauchs in den Experimenten ist deshalb zu klären, welche Faktoren in der Literatur und welche mit der vorhandenen Infrastruktur (Fahrsimulator am Lehrstuhl) gemessen werden, wie die Faktoren gemessen werden und wie einzelne und/oder mehrerer Faktoren sich auf den Energieverbrauch auswirken. Hieraus ergeben sich für ein zu entwickelndes Messmodell Forschungsfragen.

### **Forschungsfrage 1.1: Welche Dimensionen, die durch menschliches Verhalten veränderbar sind, beeinflussen energiebewusstes Fahren?**

Ziel der Frage ist es, Informationen über die Auswirkungen unterschiedlicher Dimensionen des menschlichen Verhaltens auf das energiebewusste Fahren zu sammeln, die von der Fahraufgabe selbst abhängen. Unter energiebewusstem Fahren werden hier *Eco-Driving* und *energieeffizientes Fahren* verstanden. Das Ergebnis ist ein Überblick über die Dimensionen, die das energiebewusste Fahren beeinflussen.

### **Forschungsfrage 1.2: Wie können diese Dimensionen gemessen werden?**

Ziel ist es, konkrete Messgrößen für die identifizierten Dimensionen zu ermitteln. Die gefundenen Studien werden auf konkrete Messgrößen hin analysiert. Es ergeben sich Erkenntnisse über die Dimensionen des energiebewussten Fahren und ihrer Messung. Die Messung ist eine Grundlage für die Implementierung des Feedbacks.

### **Forschungsfrage 1.3: Welche Abhängigkeiten ergeben sich aus diesen Erkenntnissen?**

Basierend auf den Erkenntnissen der Forschungsfragen 1.1 und 1.2 zielt die Frage auf die Abhängigkeiten zwischen den identifizierten Dimensionen und deren Messgrößen. So wird untersucht, welche Messgrößen die ausgewählten Studien in Kombination anwenden, welche Abhängigkeiten sie beschreiben und welche Abweichungen aus den Erkenntnissen gezogen werden können. Das Ergebnis sind Erkenntnisse über die Abhängigkeiten der Dimensionen und der Messgrößen voneinander, welche für die Entwicklung eines Energieverbrauchsfeedbacksystems notwendig sind. Ohne die Ermittlung dieser Abhängigkeiten kann der Energieverbrauch nicht hinreichend genau bestimmt werden.

### **Forschungsfrage 1.4: Was ist ein geeignetes Messmodell für energiebewusstes Fahren?**

Ziel ist es, die Erkenntnisse in einem Messmodell für energiebewusstes Fahren zu synthetisieren. Das synthetisierte Modell wird mit Experteninterviews formativ evaluiert. Das validierte Messmodell für energiebewusstes Fahren ist für die Umsetzung in der Fahrsimulationssoftware und die angestrebten Experimente notwendig.

#### **5.1 Messgröße zur Messung von energiebewusstem Autofahren anhand des Energieverbrauchs**

Zur Entwicklung eines Messmodells wird im ersten Schritt für ein besseres Verständnis der Verbrauch im Allgemeinen näher betrachtet. Anschließend kann auf die spezielleren Messgrößen eingegangen werden.

### 5.1.1 Allgemein

Sozio-technische Systeme ermöglichen es dem Menschen komplexe Sachverhalte einfach darzustellen, indem die Informationsmenge auf ein bestimmtes Maß reduziert wird. Für die Informationsreduzierung können Modelle verwendet werden, welche die reale Welt vereinfacht darstellen (Krcmar 2015). Zur Vereinfachung der Komplexität, welche sich auf die große Anzahl an Einflussgrößen zurückführen lässt, kann ein Messmodell herangezogen werden. Das Messmodell reduziert den Anteil an Informationen des Eco-Driving Feedbacks für den Fahrer.

Bevor jedoch ein Messmodell mit einem konkreten Wert festgelegt werden kann, ist es notwendig, die physikalischen Größen zu kennen und zu verstehen. Physikalisch betrachtet wird potenzielle Energie in kinetische Energie umgewandelt. Bei einem Benzinmotor wird zum Beispiel durch Verbrennung Wärme erzeugt, welche innerhalb eines Kolbens zur Explosion gebracht wird. Die Explosion treibt i. d. R. einen Zylinder an. Der Zylinder überträgt die Kraft über eine Kurbelwelle auf die Räder des Fahrzeugs.

Es stellt sich die Frage wann ein Energieverbrauchsfeedback zu geben ist. Feedback ist somit zu geben, wenn die Fahrweise nicht energieeffizient ist. Hier stellt sich die Frage, ob es einen oder mehrere optimale Zeitpunkte gibt, wann der Energieverbrauch minimal ist. Für den Verbrauch von Energie ergibt sich eine Parabel zweiter Ordnung (s. Formel 5.1) (o. A. 2015).

$$\text{Verbrauch} = a \cdot v^2 + b \cdot v + c + \frac{d}{v} \quad 5.1$$

In Abbildung 21 ist die Formel 5.1 dargestellt. Sie zeigt zwei Auffälligkeiten. Zum einen ist eine signifikante Energiemenge bei geringen Geschwindigkeiten notwendig. Die Energie, welche benötigt wird, um das Fahrzeug in Bewegung zu setzen ist i. d. R. höher als bei Fahrzeugen, die bereits in Bewegung sind. Zum anderen gibt es ein globales Minimum. Es gibt somit einen optimalen Punkt, bei dem der Verbrauch minimal ist. Getriebe führen zu mehreren lokalen Minima. Abbildung 21 stellt den Benzinverbrauch beispielhaft ohne Gangschaltung dar.

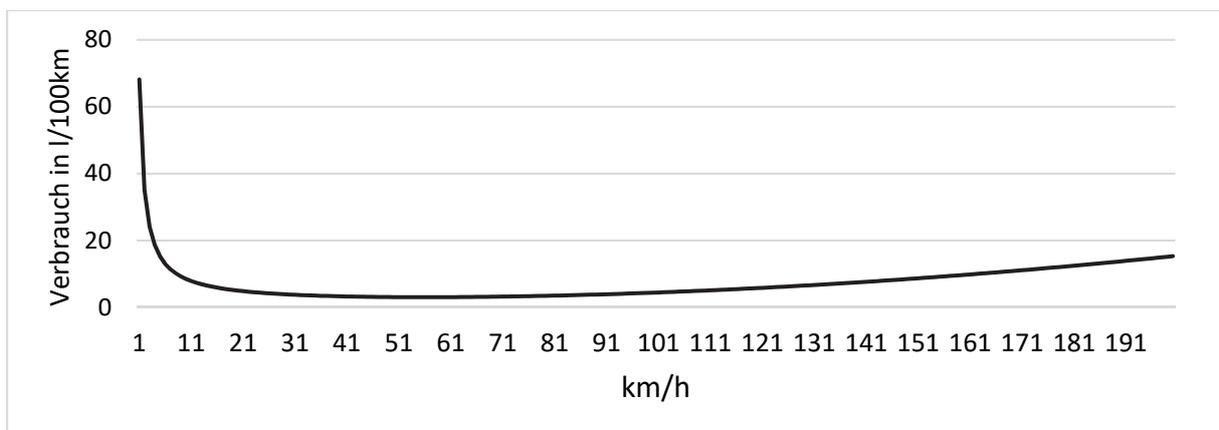


Abbildung 21: Beispiel Benzinverbrauch  
Quelle: o. A. (2015)

Aus der Formel 5.1 geht hervor, dass sich die Ausprägung des Energieverbrauchs nach der Geschwindigkeit in zu wenig, optimal und zu viel aufteilt. Das bestätigt die Ausprägung von

Jamson et al. (2015a). Die Dot- und die Foot-Anzeige von Jamson et al. (2015a) sind ebenfalls in der Informationsmenge reduziert, lassen aber den Schluss zu, ob der „Druck“ auf dem Gaspedal verringert oder erhöht werden soll. Nur die Gauge-Anzeige von Jamson et al. (2015a) ermöglicht die Abdeckung des vollen Spektrums. Dagegen beschreibt die Ausprägung von Lee et al. (2010) einen normalen Wert nicht eindeutig. Die Ausprägung von Meschtscherjakov et al. (2009) zum Eco-Speedometer-System ist eine stark vereinfachte dichotome Ausprägung: zu wenig und zu viel. Eine dichotome Ausprägung reduziert die Informationsmenge auf den Handlungsbedarf bei einer ineffizienten Fahrweise.

Im Hinblick auf die primäre Fahraufgabe und der notwendigen Reduzierung von visuellen Einflüssen ist es sinnvoll, diese im Speziellen vorzunehmen.

### 5.1.2 Energiebewusstes Fahren

Im Speziellen wird eine Analyse von Messgrößen des Konstruktes „Energiebewusstes Fahren“ vorgenommen. Energiebewusstes Fahren wird aus dem Eco-Driving abgeleitet. Eco-Driving kann unter zwei Perspektiven betrachtet werden: In der ersten wird das Eco-Driving in einem breiteren Kontext unter Berücksichtigung der Umwelt, des Verkehrsmanagements und der Wahl der Verkehrsrouten verstanden (Barth/Boriboonsomsin 2009). In der zweiten steht die Fahraufgabe selbst, als Form einer Strategie zur Verringerung des Energieverbrauchs im Fokus (Boriboonsomsin et al. 2010). Die Strategie zur Verringerung des Energieverbrauchs ist hier für die Darstellung von Bedeutung.

Die Gestaltung von Energieverbrauchsanzeigen, die Eco-Feedback während des Fahrens geben, ist für den Fahrer eine zusätzliche Herausforderung zur primären Fahraufgabe (Kern/Schmidt 2009). Eco-Driving erfordert die Beachtung des Energieverbrauchs und führt zu einer zusätzlichen kognitiven Belastung (Salvucci et al. 2001; Sethumadhavan 2011; Manner et al. 2013; Donmez et al. 2007). Die Gestaltung von Anzeigen ist durch die Diversität, die sich durch die Anzahl unterschiedlicher Faktoren, welche für die Akzeptanz von Systemen ausschlaggebend sind (persönliche Eigenschaften, Erwartungen, Auffassungen und subjektive Evaluierungen [Schade/Baum 2007]), eine komplexe Aufgabe. Eine nähere Betrachtung dieser Akzeptanzfaktoren ist nicht Gegenstand dieser Untersuchung. Ihr Gegenstand ist vielmehr ein Feedback-System, das dem Fahrer hilft optimal zu fahren, also effizient im Sinne des Energieverbrauchs.

Eine weitere Möglichkeit zur Förderung des energiebewussten Fahrens ist die Betrachtung von Energieverbrauch und Energieverlust. In der Literatur wird häufig der Energieverbrauch als Messgröße für ökonomisches und ökologisches Fahren als Feedbackmechanismus erwähnt. Hier wird energiebewusstes Fahren als Zusammensetzung der Komponenten Energieverbrauch und Energieverlust verstanden.

Die Bezeichnung des **Energieverlustes** ist nicht in dem Sinne zu verstehen, dass ein Verlust an Energie eingetreten ist, sondern als eine Energie, welche dem Fahrer nicht mehr zur Verfügung steht und somit in eine andere Energieform umgewandelt wurde, wie beispielsweise Wärme beim aktiven Bremsen.

Der **Energieverbrauch** kennzeichnet hier den notwendigen Bedarf an Kraftstoff (zu verrichtende Arbeit), um von A nach B mit angemessener Geschwindigkeit zu fahren.

Für die Ermittlung des notwendigen Energieverbrauchs und des Energieverlustes sind Messgrößen zu identifizieren, sodass der notwendige und nicht notwendige Energiebedarf vom Fahrer erkannt werden kann. Ein energiebewusstes Fahren zu erkennen ermöglichen Fahrerassistenzsysteme. Die Assistenzsysteme geben Eco-Feedback und sind eine notwendige Schlüsseltechnologie, um das menschliche Verhalten zu verändern, um eine energieeffizientere Fahrweise zu erreichen (Watson et al. 2010; Loock et al. 2013). Menschliches Verhalten hat einen signifikanten Einfluss auf den Energieverbrauch (McIlroy et al. 2013; Evans 1979). Im Ergebnis sind der notwendige Energieverbrauch und der Energieverlust zu operationalisieren. Für die Operationalisierung des energiebewussten Fahrens werden aus der Literatur angewandte Messgrößen zum Eco-Driving analysiert.

## 5.2 Methodisches Vorgehen

Bevor die Fragen beantwortet werden, wird das methodische Vorgehen dargelegt. Es wird ein zweistufiger Ansatz angewendet, um Messgrößen für das energiebewusste Fahren zu identifizieren. Im ersten Schritt wird relevante Literatur ausgewählt, im zweiten Schritt werden für die Operationalisierung des Messmodells Messgrößen für energiebewusstes Fahren identifiziert.

Die **Auswahl relevanter Literatur** erfolgte ähnlich wie in Kapitel 3 (Gottlieb et al. 2018a). Im Unterschied zu Kapitel 3 wird zusätzlich die SIGCHI betrachtet. Die Schlüsselwörter sind *eco\**, *energy efficient*, *driving* und Kombinationen inklusive der folgenden Zusammensetzungen: (eco\* or energy efficient or driving), (eco\* and energy efficient), (eco\* and driving), (energy efficient and driving) und (eco\* and energy efficient and driving). Aufgrund der erheblichen Menge an Quellen (7793 Artikeln), welche bei Google Scholar gefunden wurden, ist die Suche auf die ersten 150 Treffer begrenzt worden (Gottlieb et al. 2018a). Zur Eingrenzung der Ergebnisse auf relevante Beiträge wurden diese nach Vorkommen der gesuchten Schlüsselwörtern wie folgt hierarchisiert: (1) Titel, (2) Schlüsselwörter und (3) Abstrakt (Gottlieb et al. 2018a). In Tabelle 9 ist die Literatursuche zusammengefasst.

Journal/Konferenz	Suchwörter	Databank	Suchfelder	Abdeckung
MISQ	eco*, energy efficient, driving und Kombinationen aus diesen Suchwörtern	EBSCOhost, IEEE Xplore, ACM Digital Library, Google Scholar	Titel, Schlüsselwörter, Abstrakt	Seit 1960
ISR				
JMIS				
JAIS				
EJIS				
ISJ				
JSIS				
JIT				
TR Part C				
TR Part D				
TR Part F				
CHI				
SIGCHI				
Automotive UI				

Tabelle 9: Übersicht der Literatursuche zu Energieverbrauchsanzeigen  
Quelle: Eigene Darstellung

Zur **Operationalisierung des Messmodells** im zweiten Schritt werden die Erkenntnisse aus dem ersten Schritt herangezogen, um ein geeignetes Codierungsschemata zu identifizieren; die Ergebnisse zeigen vage Regeln für Eco-Driving auf. Aus den Regeln wurden Codewörter abgeleitet; jedes Codewort steht für eine Dimension. Die Dimension wird als Grundlage für das Codierungsschema verwendet, um die Ergebnisse in dem konzeptzentrierten Ansatz nach Webster/Watson (2002) zu synthetisieren. Für die Synthese wird die Literatur binär mit null und eins codiert.

Zur Messung des Einflusses und um die Abdeckung der Dimension je Artikel zu identifizieren, ist die binäre Codierung je Zeile und Spalte summiert worden. Die Spaltensumme wurde nach der absoluten Häufigkeit geordnet. Je höher der Rang, desto größer ist die Anzahl der abgedeckten Dimensionen. Entsprechend wurde die Zeilensumme der absoluten Frequenz eingestuft. Je höher der Rang, desto höher ist die Anzahl der gefundenen Beiträge.

Zunächst wird die jeweilige Dimension definiert. Anschließend werden die mit der Dimension verbundenen Eco-Driving-Regeln analysiert. Und zuletzt werden die Methoden der Messung der jeweiligen Dimension zugeordnet. Überdies wird die Umsetzung der Dimensionen im Hinblick auf die Gestaltung von Eco-Feedback für energiebewusstes Fahren untersucht. Danach werden die Abhängigkeiten und Zusammenhänge zwischen den einzelnen Dimensionen analysiert. Schließlich werden die gefundenen Ergebnisse in einem Messmodell synthetisiert.

Als Ergebnis ist ein aus der Literatur abgeleitetes, synthetisiertes Messmodell mit Dimensionen für energiebewusstes Fahren festzuhalten.

### **5.3 Literaturanalyse zu Energieverbrauchsanzeigen**

Es sind 32 relevante Beiträge identifiziert worden. Sie sind in Tabelle 10 aufgeführt. Auszugsweise wurden die Ergebnisse der Literaturanalyse in Gottlieb et al. (2018a) veröffentlicht.

Beusen et al. (2009) stellen vier *goldene Regeln* für Eco-Driving auf: (i) so schnell wie möglich hochschalten, (ii) Benutzung des höchstmöglichen Gangs und Fahren bei geringer Motorleistung, (iii) Beibehaltung einer gleichmäßigen oder konstanten Geschwindigkeit, um den Verkehrsfluss zu antizipieren, und (iv) Verzögerung durch die Motorbremse. Im Folgenden wird der Begriff der konstanten Geschwindigkeit für die in der Literatur verwendeten Begriffe *cruising* (Andrieu/Saint Pierre 2014) und *steady speed* (Beusen et al. 2009) verwendet. Die vier Regeln können um zwei Regeln von Kaufmann-Hayoz et al. (2012) erweitert werden: (v) spätes Herunterschalten und (vi) schnelles Beschleunigen.

Neumann et al. (2015) bestätigen die sechs Regeln. Aus den sechs Regeln leiten sich die sechs Codierungen als Dimension ab: *antizipatives Fahren* (Regel iii), *Gangschaltung* (Regeln i, ii, iv, und v), *Beschleunigung* (Regel vi), *Entschleunigung* (Regel iv), *Motordrehzahl* (Regel ii) und *Geschwindigkeitseinhaltung* (Regel iii).

Die Begrifflichkeit Geschwindigkeitseinhaltung leitet sich von Speeding aus dem Englischen ab und meint die empfohlene Richtgeschwindigkeit wie 130 km/h in Deutschland.

Die Begrifflichkeit Entschleunigung wird im Folgenden durch den Begriff Verzögerung ersetzt; sie stammt von der Übersetzung des in der Literatur verwendeten Wortes *deceleration*. Zur besseren Verständlichkeit wird eine positive Beschleunigung (acceleration) als Beschleunigung und eine negative Beschleunigung (deceleration) als Verzögerung bezeichnet.

Die Begriffe Beschleunigung und Verzögerung scheinen dieselbe Dimension darzustellen, da sich nur die Richtung ändert. Die genaue Analyse der Dimension Beschleunigung in Abschnitt 5.4.4 und der Dimension Verzögerung in Abschnitt 5.4.5 wird zeigen, ob die Dimensionen zusammen oder getrennt behandelt werden sollten.

Autor(en)	Antizipatives Fahren	Geschwindig- keitseinhaltung	Gangschaltung	Beschleuni- gung (Cruis- ing/ Non-cruis- ing)	Verzögerung (Aktiv/Passiv)	Motordrehzahl	Summe
Álvarez et al. (2014)	0	1	0	1	1	0	3
Ando/Nishihori (2011)	0	0	0	1	1	0	2
Andrieu/Saint Pierre (2014)	1	1	1	1	1	1	6
Azzi et al. (2011)	0	0	0	1	0	0	1
Barbé et al. (2007)	0	1	1	0	0	0	2
Barkenbus (2010)	1	1	1	1	1	1	6
Barth/Boriboonsomsin (2009)	0	1	0	0	0	0	1
Beusen et al. (2009)	0	1	1	1	1	1	5
Bingham et al. (2012)	0	0	0	1	1	0	2
Boriboonsomsin et al. (2010)	0	1	0	1	0	0	2
Caulfield et al. (2014)	0	0	0	1	1	0	2
Cho (2008)	0	0	0	1	1	0	2
Cristea et al. (2012)	0	1	0	0	0	0	1
Dahlinger/Wortmann (2016)	0	0	1	1	0	1	3
Dogan et al. (2011)	1	1	1	1	1	1	6
Ericsson (2001)	0	1	1	1	1	1	5
Evans (1979)	1	1	0	1	1	0	4
Ford Motor Company (2016)	0	0	0	1	0	0	1
Harvey et al. (2013)	0	0	0	1	1	0	2
Helmbrecht et al. (2014)	1	1	0	1	1	0	4
Hiraoka et al. (2009)	0	0	0	1	0	1	2
Jamson et al. (2015a)	0	0	0	1	0	0	1
Kaufmann-Hayoz et al. (2012)	1	0	1	1	1	1	5
Kircher et al. (2014)	1	1	0	1	1	0	4
Magaña/Muñoz-Organero (2011a)	1	1	1	1	1	1	6
Magaña/Muñoz-Organero (2011b)	0	1	0	1	1	1	4
Neumann et al. (2015)	0	1	0	1	0	1	3
Pace et al. (2007)	0	0	0	1	1	0	2
Rommerskirchen et al. (2013)	1	0	0	0	0	0	1
Saboochi/Farzaneh (2009)	0	1	1	0	0	1	3
Sivak/Schoettle (2012)	0	1	0	0	0	1	2
Wada et al. (2011)	0	0	0	1	0	0	1
<b>Summe</b>	<b>9</b>	<b>18</b>	<b>11</b>	<b>26</b>	<b>18</b>	<b>12</b>	

Tabelle 10: Konzeptmatrix

Quelle: In Anlehnung an Gottlieb et al. (2018a)

Tabelle 10 konzeptualisiert die Resultate nach den Dimensionen: (1) *antizipatives Fahren*, (2) *Geschwindigkeitseinhaltung*, (3) *Gangschaltung*, (4) *Verzögerung*, (5) *Beschleunigung* und (6)

*Motordrehzahl*. Die Tabelle 10 stellt zusätzlich die Publikationen nach Jahren dar. Die meisten Beiträge fokussieren sich auf die Beschleunigung (26 Publikationen), Verzögerung (18 Publikationen) und Geschwindigkeitseinhaltung (18 Publikationen). Sieben Beiträge behandeln sechs (Barkenbus 2010; Andrieu/Saint Pierre 2014; Dogan et al. 2011; Magaña/Muñoz-Organero 2011a) oder fünf (Beusen et al. 2009; Ericsson 2001; Kaufmann-Hayoz et al. 2012) der Dimensionen von Messgrößen für Eco-Driving.

Bevor die Dimensionen näher untersucht werden, sind die in der Literatur gefundenen Ergebnisse aufzuführen, welche weder in Beziehung mit der primären Fahraufgabe stehen noch den sechs Dimensionen zugeordnet werden konnten, jedoch Messgrößen und Faktoren des Eco-Driving darstellen.

Faktoren, welche Einfluss auf das Eco-Driving haben, sind der Reifendruck (Barkenbus 2010; Boriboonsomsin et al. 2010; Cho 2008; Magaña/Muñoz-Organero 2011a) und die Temperatur der Reifen (Magaña/Muñoz-Organero 2011a), regelmäßiges Wechseln des Luftfilters (Barkenbus 2010), die Nutzung einer Geschwindigkeitsregelanlage (Sivak/Schoettle 2012), die Verwendung von zusätzlichen Hilfsfunktionen wie Klimaanlage oder Radio (Neumann et al. 2015; Sivak/Schoettle 2012), die Auswahl einer energieeffizienten Fahrtroute (Dahlinger/Wortmann 2016; Helmbrecht et al. 2014; Saboohi/Farzaneh 2009; Sivak/Schoettle 2012), der zeitliche Abstand zwischen den Fahrzeugen (Cristea et al. 2012) und Kurvenfahrten (Caulfield et al. 2014; Dahlinger/Wortmann 2016; Neumann et al. 2015).

Es werden unterschiedliche Messgrößen für Eco-Driving herangezogen. Dazu zählen der Spritverbrauch (Beusen et al. 2009; Caulfield et al. 2014; Dogan et al. 2011; Magaña/Muñoz-Organero 2011a; Hiraoka et al. 2009; Barbé et al. 2007; Barth/Boriboonsomsin 2009; Boriboonsomsin et al. 2010; Kircher et al. 2014; Wada et al. 2011), der Verbrauch von elektrischer Energie (Neumann et al. 2015) und CO<sub>2</sub>-Emissionen (Caulfield et al. 2014; Barth/Boriboonsomsin 2009; Azzi et al. 2011). Lee et al. (2010) verwenden die durchschnittlich jährlich gefahrenen Kilometer bezogen auf den Verbrauch (km/l), um dem Fahrer ein Eco-Feedback zu geben. Das Feedback ist in drei Farben ohne genauere Wertangaben aufgeteilt: grün (effiziente Fahrweise), weiß (normale Fahrweise) und rot (ineffiziente Fahrweise) (Lee et al. 2010). Spezifischere Daten oder ein Patent der bei KIA Motors verwendeten Darstellung, welche auch von Cho (2008) eingesetzt wird, konnten nicht gefunden werden.

## **5.4 Dimensionen der Messgrößen**

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Definitionen der identifizierten Dimensionen der Messgrößen analysiert und es wird gezeigt, wie sie klassifiziert werden können.

### **5.4.1 Antizipatives Fahren**

**Antizipatives Fahren** ist im Vergleich zu den fünf anderen Dimensionen (Geschwindigkeitseinhaltung, Gangschaltung, Beschleunigung, Verzögerung und Motordrehzahl) ein verhältnismäßig junges Thema. Die Thematik wurde bisher nur begrenzt untersucht und weist noch keine genauen Messwerte auf. Antizipatives Fahren beeinflusst Geschwindigkeit, Gangschaltung, Beschleunigung und Verzögerung.

Die Messung wird mit einem vorausschauenden Fahrstil als „Blick in die Zukunft“ beschrieben. Vorausschauendes Fahren wird in der englischen Literatur als „Anticipatory Driving“ bezeichnet. Er ist charakterisiert durch ein soweit als möglich vorausblickendes Fahren und das Beobachten des umgebenden Verkehrs (Andrieu/Saint Pierre 2014), von Verkehrereignissen (Cristea et al. 2012) und Signalen (Barkenbus 2010). Antizipatives Fahren hilft dem Fahrer plötzliche Fahrmanöver (Barkenbus 2010), starkes und unnötiges Bremsen, Beschleunigen und Gangwechsel zu vermeiden (Kaufmann-Hayoz et al. 2012).

Es kann angenommen werden, dass antizipatives Fahren den Fahrer unterstützt, eine konstante Geschwindigkeit (*cruising*) beizubehalten (Andrieu/Saint Pierre 2014; Beusen et al. 2009; Rakotonirainy et al. 2011) und das Bremsen zu minimieren (Evans 1979), (Evans 1979). Die Verringerung von Bremsvorgängen führt zu einer Reduzierung des unnötigen Energieverlust (Saboohi/Farzaneh 2009; Kircher et al. 2014).

Der unnötige Energieverbrauch wird durch die gesetzlich zulässige Geschwindigkeit begrenzt. Vorübergehende Situationen mit Geschwindigkeitsreduzierung werden von antizipativen Fahrern vorhergesehen und können zu einer Verringerung der Bremsvorgänge und der Anzahl der Stopps führen (Evans 1979). Ericsson (2001) misst die Anzahl der Stopps pro Kilometer in verschiedenen Geschwindigkeitsintervallen, um das Eco-Driving zu bewerten und den Kraftstoffverbrauch zu verringern.

Um das antizipative Fahren zu bewerten, messen Andrieu/Saint Pierre (2014) die positive kinetische Energie. Sie charakterisieren antizipatives Fahren durch die Fähigkeit des Fahrers, die verwendete kinetische Energie so niedrig wie möglich zu halten. Eine positive kinetische Energie nahe Null kennzeichnet ein sanftes („smooth“) Fahren (Andrieu/Saint Pierre 2014). Für eine antizipative Fahrweise kann als Indikator der Gaspedallösungsabstand dienen (Dogan et al. 2011). Der Gaspedallösungsabstand ist der Abstand zwischen dem Punkt, an dem zuerst der Druck vom Gaspedal genommen und das Bremspedal gedrückt wird.

Die Messung ist problematisch. So müssten Sensoren nicht nur die umliegende Verkehrssituation erfassen und auswerten können, sondern auch zukünftige Situationen im Verkehr berücksichtigen (Magaña/Muñoz-Organero 2011a).

Der Einsatz von Eco-Driving in Form einer antizipativen Rückmeldung über das Fahrverhalten wirkt sich signifikant auf den Energieverbrauch aus (Magaña/Muñoz-Organero 2011a). Eco-Driving wird nicht als separate Dimension betrachtet, sondern unter die Dimension des antizipativen Fahrens subsumiert.

Antizipatives Fahren kann durch Fahrerassistenzsysteme gefördert werden (Helmbrecht et al. 2014; Rommerskirchen et al. 2013). Bevorstehende Ereignisse wie Änderungen der Geschwindigkeitsbegrenzung können den Fahrer informieren, das Gaspedal rechtzeitig freizugeben, um beispielsweise die Motorbremse zu nutzen (Kircher et al. 2014). Die Nutzung eines antizipativen Fahrerassistenzsystems kann den Kraftstoffverbrauch um 10 % verringern (Helmbrecht et al. 2014; Rommerskirchen et al. 2013).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass antizipatives Fahren als ein menschliches Verhalten anzusehen ist, bei dem versucht wird, durch Erfahrungswerte den Fahrstil, das Fahrverhalten der anderen Verkehrsteilnehmer oder -situationen zu errahnen, um zu einen energieeffizienteren und sicheren Fahren zu gelangen.

#### 5.4.2 Geschwindigkeitseinhaltung

Die Dimension **Geschwindigkeitseinhaltung** beeinflusst die Dimension Motordrehzahl (Ericsson 2001) und die Komponente Energieverbrauch des Konstruktes energiebewusstes Fahren (Álvarez et al. 2014; Barth/Boriboonsomsin 2009; Ericsson 2001; Helmbrecht et al. 2014; Sivak/Schoettle 2012). Die Geschwindigkeitseinhaltung wird im Allgemeinen mit der aktuell gefahrenen Geschwindigkeit in Meilen oder Kilometern pro Stunde gemessen und über den Tacho im Armaturenbrett angezeigt (Kircher et al. 2014). Im Besonderen wird die Dimension Geschwindigkeitseinhaltung über die Positionsbestimmung mittels Global Positioning System (GPS) Sensoren (Beusen et al. 2009; Helmbrecht et al. 2014) oder durch die durchschnittliche Beschleunigung auf einer bestimmten Strecke gemessen (Andrieu/Saint Pierre 2014; Neumann et al. 2015; Helmbrecht et al. 2014; Beusen et al. 2009; Dogan et al. 2011). Andrieu/Saint Pierre (2014) betrachten den Prozentsatz der Zeit, bei welcher schneller als die gesetzliche Höchstgeschwindigkeit gefahren wird, um die Auswirkungen auf das wirtschaftliche Fahrverhalten zu messen. Je höher dieser Wert ist, desto höher ist der Energieverbrauch (Andrieu/Saint Pierre 2014). Geschwindigkeitseinhaltung wird als Maß für energiebewusstes Fahren in 18 der analysierten Forschungsarbeiten angewandt.

Geschwindigkeitseinhaltung beeinflusst Eco-Driving und Kraftstoffverbrauch im Allgemeinen (Barth/Boriboonsomsin 2009; Saboohi/Farzaneh 2009). Je höher die Geschwindigkeit ist, desto mehr Kraftstoff wird verbraucht (Kircher et al. 2014; Evans 1979). Der Energieverbrauch kann durch die Reduktion der Durchschnittsgeschwindigkeit (Helmbrecht et al. 2014) und die Vermeidung von Hochgeschwindigkeitsfahrten gesenkt werden. Somit ist es ratsam, nicht schneller als notwendig zu fahren (Kircher et al. 2014). Es wird empfohlen, sich an die Geschwindigkeitsbegrenzung zu halten (Cristea et al. 2012; Barkenbus 2010), respektive sicher unterhalb der vorgeschlagenen Geschwindigkeitsbegrenzung zu fahren (Barkenbus 2010). Ein spezifischer Vorschlag für Belgien ist beispielsweise, nicht schneller als die Höchstgeschwindigkeit auf der Autobahn (120 km/h) zu fahren (Beusen et al. 2009). In Deutschland kann die Richtgeschwindigkeit von 130 km/h als Empfehlung herangezogen werden. Die Empfehlung beeinträchtigt den Verkehrsfluss nicht. Eine Implementierung wäre durch ein Eco-Driving-Assistenzsystem möglich, das die Geschwindigkeitsinformationen nur dann anzeigt, wenn die gesetzliche Höchstgeschwindigkeit oder auch die Richtgeschwindigkeit überschritten werden (Kircher et al. 2014). Die Geschwindigkeitsbegrenzung kann durch Verkehrszeichenerkennung erfasst oder durch gespeicherte Kartendaten bestimmt werden. Ein Vergleich der Daten zeigt eine überhöhte Geschwindigkeit auf, welche zu zusätzlichem Energieverbrauch führt (Kircher et al. 2014). Ist keine Geschwindigkeitsbegrenzung vorgeschrieben, empfiehlt es sich, die gesetzlich vorgeschriebene Höchst- oder Richtgeschwindigkeit anzusetzen.

Hingegen kann Energie im Stadtverkehr durch Erhöhung der durchschnittlichen Geschwindigkeit eingespart werden, da die Geschwindigkeit während des Fahrens innerhalb der Stadtgrenzen üblicherweise unter dem optimalen Geschwindigkeitsbereich liegt (Evans 1979).

Beispielsweise kann das Fahren mit 60 km/h im sechsten Gang effizienter sein als 50 km/h im fünften Gang. Der Kraftstoffverbrauch ist eine umgekehrt U-förmige Funktion von Geschwindigkeit und RPM (Sivak/Schoettle 2012), wobei das Fahren mit 50-70 km/h (Ericsson 2001) beziehungsweise 60-70 km/h eine gute Energieeffizienz aufweist (Hiraoka et al. 2009).

### 5.4.3 Gangschaltung

Die Dimension **Gangschaltung** beschäftigt sich mit Beiträgen zum Schaltvorgang, zum Gangwechsel oder dem gewählten Gang. Mit einem zeitlich angemessenen Gangwechsel kann Eco-Driving erreicht werden (Ericsson 2001; Jamson et al. 2015a). Es wird empfohlen, während der Fahrt einen hohen Gang zu nutzen (Hiraoka et al. 2009), genauer den höchstmöglichen Gang (Beusen et al. 2009; Saboohi/Farzaneh 2009). Ein frühes Schalten in den nächsthöheren Gang ist alsbald als möglich zu empfehlen (Kaufmann-Hayoz et al. 2012; Rakotonirainy et al. 2011; Saboohi/Farzaneh 2009; Beusen et al. 2009; Boriboonsomsin et al. 2010; Cho 2008).

Die Vorschläge hinsichtlich des Gangwechsels sind unterschiedlich. Im Allgemeinen gilt ein Intervall zwischen 2000 und 2500 RPM als optimal (Beusen et al. 2009; Andrieu/Saint Pierre 2014; Barkenbus 2010). Dagegen identifizieren Saboohi/Farzaneh (2009) einen optimalen Schaltpunkt bei einer Umdrehungszahl von 1930 RPM. Besonders das Schalten vom ersten Gang in den dritten Gang sollte unverzüglich erfolgen (Saboohi/Farzaneh 2009). Ein spätes Wechseln des Gangs vom zweiten in den dritten verursacht einen über dem Durchschnitt liegenden hohen Energieverbrauch (Ericsson 2001).

Die Instruktion „shift up early“ (schnelles oder frühes Hochschalten) wird mehrheitlich mit der durchschnittlichen Motorleistung gemessen, welche erreicht werden muss, um in einen höheren Gang zu schalten (Andrieu/Saint Pierre 2014; Dogan et al. 2011; Beusen et al. 2009). Der eingelegte Gang kann berechnet werden, in dem die elektronischen Motordaten vom CAN-Bus ausgelesen werden (Beusen et al. 2009). Im Gegensatz zum frühen Hochschalten des Gangs sollte das Runterschalten so spät als möglich erfolgen (Kaufmann-Hayoz et al. 2012).

### 5.4.4 Beschleunigung

Die Dimension **Beschleunigung** bezieht sich auf Beiträge, die eine Zunahme der Geschwindigkeit von einer bestimmten Geschwindigkeit A auf eine höhere Geschwindigkeit B verstehen, wie von 0 km/h (potenzieller Energie) auf 50 km/h (kinetische Energie). Ebenso ist darunter der Wechsel von einer Geschwindigkeit B (50 km/h) zu einer höheren Geschwindigkeit C (60 km/h) zu verstehen.

Beschleunigung ist die am meisten verwendete Messgröße für Eco-Driving. Der Einfluss auf den Energieverbrauch durch die Beschleunigung ist unbestritten (Jamson et al. 2015a; Wada et al. 2011; Ericsson 2001; Bingham et al. 2012; Cho 2008; Evans 1979; Helmbrecht et al. 2014; Pace et al. 2007). Die Beschleunigung kann in zwei Komponenten unterschieden werden: (i) konstant und (ii) nicht-konstant. **Konstant** bedeutet, das Gaspedal so zu bedienen, dass mit gleichmäßiger Geschwindigkeit gefahren wird (Jamson et al. 2015a). Konstantes Fahren wird empfohlen (Ando/Nishihori 2011; Andrieu/Saint Pierre 2014; Beusen et al. 2009; Barkenbus 2010; Barth/Boriboonsomsin 2009; Boriboonsomsin et al. 2010; Cho 2008; Hiraoka et al. 2009;

Neumann et al. 2015) und führt zu einem geringeren Energieverlust (Helmbrecht et al. 2014; Neumann et al. 2015; Evans 1979; Ericsson 2001) und resultiert in einem niedrigeren Energieverbrauch (Ericsson 2001). Für die Aufrechterhaltung einer konstanten Geschwindigkeit, ist die Geschwindigkeitsregelanlage eine geeignete Technologie (Sivak/Schoettle 2012). Hierbei werden zwei Arten von Geschwindigkeitsregelanlagen unterschieden: aktive und normale. Eine *aktive* Geschwindigkeitsregelanlage bremst im Gegensatz zur *normalen* ab, um die Geschwindigkeit auch bei Bergabfahrten nicht zu erhöhen. **Nicht-konstant** ist als eine inkrementelle Beschleunigung von einer bestimmten Geschwindigkeit zu einer höheren Geschwindigkeit zu verstehen (Jamson et al. 2015a). Zur Vollständigkeit sei erwähnt, dass nicht-konstantes Fahren auch als „starting movement jerk“ und konstantes Fahren als „cruising track jerk“ zu verstehen ist (Álvarez et al. 2014). Beim nicht-konstanten Fahren ist es ratsam, sanft und nicht zu schnell durch eine mäßige Benutzung des Gaspedals zu beschleunigen (Barkenbus 2010; Barth/Boriboonsomsin 2009; Boriboonsomsin et al. 2010; Cho 2008; Helmbrecht et al. 2014; Neumann et al. 2015; Saboohi/Farzaneh 2009). Eine behutsame Benutzung des Gaspedals kann zu einer Reduzierung des Energieverbrauchs von ungefähr 15 % führen (Evans 1979). Allerdings empfehlen Kaufmann-Hayoz et al. (2012) als einzige eine schnelle Beschleunigung. Von einer höheren Beschleunigung als erforderlich wird abgeraten, um unnötiges Bremsen zu vermeiden (Evans 1979).

Für eine ökologische und effiziente Beschleunigung gibt es landesabhängige Unterschiede, so wird in Japan eine behutsame Beschleunigung empfohlen, während im deutschen Verkehr eine „angemessene“ Beschleunigung auf eine bestimmte Geschwindigkeit bezogen wird (Hiraoka et al. 2009).

Beschleunigung kann auf verschiedene Weise im Fahrsimulator gemessen werden. Als Messgröße den Winkel des Gaspedals heranzuziehen ist die häufigste Variante (Ford Motor Company 2016; Azzi et al. 2011; Beusen et al. 2009; Dogan et al. 2011; Jamson et al. 2015a; Wada et al. 2011). Hervorzuheben ist, dass die Erkenntnisse von Jamson et al. (2015a) nicht nur präzise sind, sondern auch übertragbare Werte liefern. Die Werte zur Berechnung wurden in Abschnitt 3.4.1 dargelegt.

Der Winkel des Gaspedals wird von mehreren Automobilherstellern dem Fahrer als Echtzeitinformationen über die richtige Beschleunigung zur Verfügung gestellt (Ford Motor Company 2016; Inbar et al. 2011; Harumoto et al. 2011; Motonaga/Saito 2012). Die Autohersteller messen, wie weit das Pedal zur Beschleunigung gedrückt wird, und veranschaulichen dies mit einem Balken, der den Abstand zeigt (Ford Motor Company 2016; Inbar et al. 2011). Eine einfachere Darstellung ist das visuelle Scoring-Modell für Eco-Driving (Wada et al. 2011), welches in Abschnitt 3.4.1 genauer beschrieben wurde. Eine weitere Variante ist, die Beschleunigung über der durchschnittlichen Beschleunigung zu messen. Dazu wird die augenblickliche Längsbeschleunigung mit dem optimalen Beschleunigungsniveau auf Grundlage der Geschwindigkeit des Fahrzeugs verglichen. Die Differenz der Messgrößen zeigt, ob und wie viel der Fahrer zu stark beschleunigt. Bei der Verwendung eines haptischen Pedalsystems kann einer zu starken Beschleunigung durch Erhöhung der Widerstandskraft des Pedals entgegengewirkt werden, sodass der Fahrer ausschließlich angemessen beschleunigen kann (Azzi et al. 2011; Jamson et al. 2015a). Das optimale Beschleunigungsniveau wird durch die proprietären Eco-Driving-Regeln

des Herstellers bestimmt (Azzi et al. 2011). Die Messung der ineffizienten Beschleunigungszeit ist eine weitere Variante (Caulfield et al. 2014). Bei der Variante werden die prozentuale Zeit der zu starken Beschleunigung (mehr als  $1,5 \text{ m/s}^2$ ) gemessen (Beusen et al. 2009) sowie die Intensität, Häufigkeit und Zeit der Beschleunigung berücksichtigt (Magaña/Muñoz-Organero 2011b). Zusätzlich werden extern zu messende Variablen herangezogen, welche durch die Installation eines Beschleunigungssensors erfasst werden (Magaña/Muñoz-Organero 2011a).

#### 5.4.5 Verzögerung

Die Dimension **Verzögerung** beinhaltet Beiträge, welche eine Verringerung der Geschwindigkeit von einer bestimmten Geschwindigkeit C (wie 60 km/h) zu einer Geschwindigkeit D ( wie 30 km/h) aufweisen. Bevor jedoch ein Fahrzeug verzögert oder abgebremst werden kann, muss eine bestimmte Geschwindigkeit vorliegen (Neumann et al. 2015). Verzögerung wird in zwei Komponenten unterschieden: (i) aktive und (ii) passive. **Aktive Verzögerung** ist das Betätigen des Bremspedals. Das Betätigen des Bremspedals sollte vermieden werden, um keinen Energieverlust zu erfahren (Saboohi/Farzaneh 2009; Kircher et al. 2014; Ericsson 2001). Ein Energieverlust bedeutet, dass die aufgewendete Energie dem System Fahrzeug nicht mehr zur Verfügung steht. **Passive Verzögerung** oder auch passives Bremsen bedeutet, dass der Fuß vom Gaspedal genommen wird und eine allmähliche Verzögerung erreicht wird und schließt regeneratives Bremsen oder die Verwendung der Motorbremse mit ein (Hiraoka et al. 2009; Beusen et al. 2009; Kircher et al. 2014).

- a) Bei der Nutzung der *Motorbremse* wird das Gaspedal rechtzeitig freigegeben, während der Gang eingelegt bleibt (Beusen et al. 2009; Hiraoka et al. 2009; Ando/Nishihori 2011; Andrieu/Saint Pierre 2014). So kann hartes/abruptes Bremsen vermieden werden (Helmbrecht et al. 2014; Boriboonsomsin et al. 2010; Beusen et al. 2009; Andrieu/Saint Pierre 2014; Cho 2008; Jamson et al. 2015a), was zu einem reduzierten Energieverbrauch führt (Ando/Nishihori 2011; Helmbrecht et al. 2014; Pace et al. 2007).
- b) Es wird empfohlen, das *regenerative Bremsen* zu verwenden (Neumann et al. 2015; Helmbrecht et al. 2014). Beim regenerativen Bremsen wird die Bremsenergie gespeichert, während zusätzlich mit der Motorbremse gebremst wird (Hiraoka et al. 2009).
- c) Eine *allmähliche Verzögerung* wird anstelle einer sanften Entschleunigung empfohlen (Saboohi/Farzaneh 2009). Im Gegensatz zur sanften Verzögerung wird hierbei das Getriebe vom Motor getrennt. Das allmähliche Verzögern wird auch als „coasting deceleration“ bezeichnet, der Autohersteller BMW bezeichnet es als „Segel-Modus“ (Lichte 2013). Beim „Segeln“ wird nur die Energie verbraucht, welche der Motor im Leerlauf benötigt und durch den Luftwiderstand oder den Rollwiderstand wird eine Verzögerung herbeigeführt. Durch eine Evaluierung des Routenprofils der geologischen Lage der Straße kann ein Höhenprofil erstellt werden. Das Profil ist die Grundlage für einen „coasting guide“, welcher optimale Zeitpunkte angibt, an denen das Gaspedal freigegeben und coasting, ein Fahren ohne eingelegten Gang, eingesetzt werden soll (Kircher et al. 2014).

Die Dimension Verzögerung kann mit dem Winkel des Bremspedals gemessen werden, d. h. das Ausmaß, in dem das Pedal gedrückt wurde, gemessen in Prozent (Dogan et al. 2011). Der Prozentsatz der Zeit, in der das Fahrzeug mit Motorbremse fährt (Andrieu/Saint Pierre 2014; Beusen et al. 2009) sowie der zeitliche Abstand zwischen dem Freigeben des Gaspedals und

dem Betätigen des Bremspedals können als Indikatoren für ein ökologisch effizientes Bremsen herangezogen werden (Dogan et al. 2011). Weitere Messgrößen der sanften oder mittelmäßigen Verzögerung werden in  $\text{m/s}^2$  (Dogan et al. 2011; Andrieu/Saint Pierre 2014; Pace et al. 2007) und dem Prozentsatz der Zeit an starker Verzögerung (größer als  $2,5 \text{ m/s}^2$ ) angegeben (Beusen et al. 2009). Toyota installierte einen Bremsbetätigungssensor, der erkennt, wie oft das Bremspedal verwendet wird, und gibt nach einer bestimmten Anzahl an Bremsungen ein blinkendes Feedback an den Fahrer, als Warnung vor ineffizienter Fahrweise (Harumoto et al. 2011; Motonaga/Saito 2012).

Die aufgezeigten Messgrößen beschränken sich auf die aktive Komponente der Dimension. Eine Messung der passiven Komponente konnte nicht gefunden werden. Eine Messung könnte jedoch unter folgenden Bedingungen erfolgen: Es liegt eine Geschwindigkeit  $X$  mit  $X > 0 \text{ km/h}$  vor, das Brems- und Gaspedal wird nicht betätigt (Winkel 100 %), somit kommt es i. d. R. zu einer passiven Verzögerung.

#### 5.4.6 Motordrehzahl

Die Dimension **Motordrehzahl** bezieht sich auf Beiträge, die sich mit der Anzahl der Umdrehungen des Motors. Die Motordrehzahl wird vom eingelegten Gang beeinflusst. Durch ein geeignetes Schaltverhalten kann die Motordrehzahl reduziert werden (Ericsson 2001; Barbé et al. 2007; Andrieu/Saint Pierre 2014; Dogan et al. 2011). Dabei wird die Motordrehzahl als Anzahl der RPM (Beusen et al. 2009) oder durchschnittliche RPM (Andrieu/Saint Pierre 2014; Dogan et al. 2011) gemessen.

Es wird empfohlen, das Fahrzeug mit einer geringen Motorleistung zu fahren (Beusen et al. 2009; Kaufmann-Hayoz et al. 2012; Hiraoka et al. 2009), weil eine hohe Motorleistung zu höherem Energieverbrauch führt (Magaña/Muñoz-Organero 2011b).

Die optimale Motordrehzahl wird unterschiedlich definiert. Barbé et al. (2007) legen 2500 RPM als zu hohe Drehzahl fest, während Azzi et al. (2011) empfehlen, eine Motordrehzahl von 2000 RPM nicht zu überschreiten. Beusen et al. (2009) legen eine optimale Drehzahl für gleichbleibende Geschwindigkeiten mit einer Drehzahl zwischen 1100 und 1700 RPM fest. Ericsson (2001) unterstreicht den überdurchschnittlich positiven Einfluss einer Motordrehzahl von mehr als 3500 RPM auf den Kraftstoffverbrauch (höherer Kraftstoffverbrauch) und die negativen Auswirkungen des Fahrens mit der genannten Motordrehzahl im zweiten und dritten Gang (weniger Kraftstoffverbrauch). Wie bereits erwähnt, liegt die am meisten genannte optimale Motordrehzahl zwischen 2000 und 2500 RPM (Andrieu/Saint Pierre 2014; Barkenbus 2010). Die optimale Motordrehzahl ist also spezifisch für das jeweilige Fahrzeug und den untersuchten Kontext.

Zusätzlich zur Gangwahl kann eine hohe Motordrehzahl durch langsames Fahren oder Reduktion der Geschwindigkeit erreicht werden (Ericsson 2001). Beusen et al. (2009) betrachten die prozentuale Distanz mit optimaler Motordrehzahl. Andrieu/Saint Pierre (2014) verwenden einen Indikator, den *IndexGearRPM*, welcher die durchschnittliche Motordrehzahl zu jedem möglichen Gang mit dem Prozentsatz an Zeit multipliziert, in welchem der jeweilige Gang ein-

gelegt war (Andrieu/Saint Pierre 2014). Die Leerlaufzeit wird benutzt um Eco-Driving zu messen, obwohl der Energieverbrauch höher ist als bei ausgeschaltetem Motor oder wenn das Fahrzeug stillsteht (Pace et al. 2007; Caulfield et al. 2014; Harvey et al. 2013; Saboohi/Farzaneh 2009; Sivak/Schoettle 2012).

## 5.5 Synthese der Messgrößen

Die Messgrößen in der recherchierten Literatur werden im Folgenden zu einem Messmodell für das Konstrukt „energiebewusstes Fahren“ zusammengefasst.

Die Dimension *antizipatives Fahren* beeinflusst alle Dimensionen: Motordrehzahl (Magaña/Muñoz-Organero 2011b), Gangschaltung (Magaña/Muñoz-Organero 2011a), Geschwindigkeitseinhaltung (Evans 1979; Kircher et al. 2014), Beschleunigung (Evans 1979; Álvarez et al. 2014; Beusen et al. 2009), Verzögerung (Evans 1979; Beusen et al. 2009; Andrieu/Saint Pierre 2014; Álvarez et al. 2014; Helmbrecht et al. 2014; Magaña/Muñoz-Organero 2011a) und das Konstrukt energiebewusstes Fahren (Evans 1979; Helmbrecht et al. 2014).

Die Dimension *Gangschaltung* beeinflusst die Dimensionen *Motordrehzahl* (Andrieu/Saint Pierre 2014; Barbé et al. 2007; Dogan et al. 2011; Ericsson 2001; Saboohi/Farzaneh 2009) und den Energieverbrauch (Sivak/Schoettle 2012; Magaña/Muñoz-Organero 2011b; Ericsson 2001).

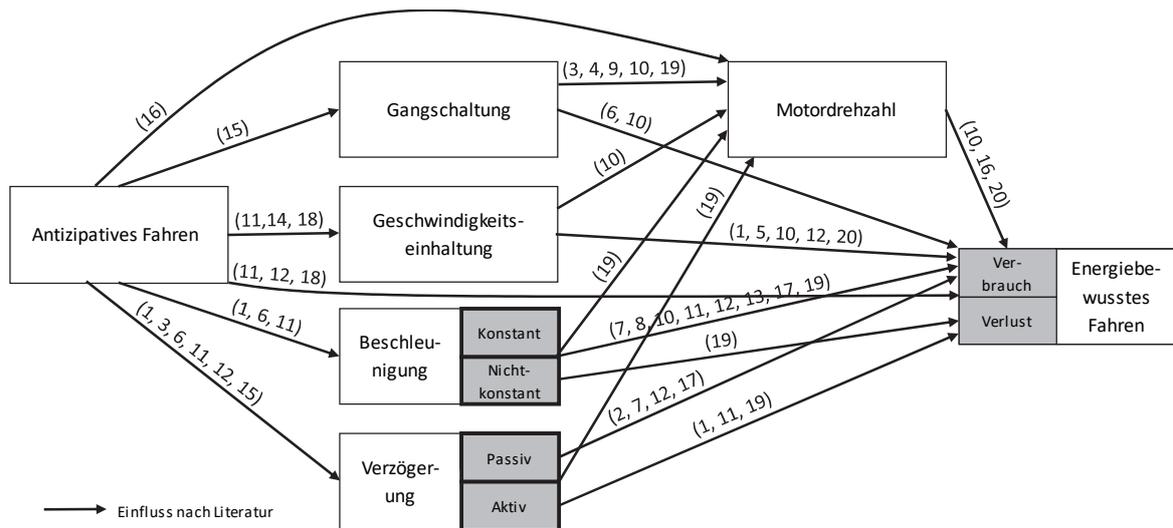
Die Dimension *Geschwindigkeitseinhaltung* beeinflusst die Dimension *Motordrehzahl* (Ericsson 2001) und die Komponente *Energieverbrauch* des Konstruktes energiebewusstes Fahren (Álvarez et al. 2014; Barth/Boriboonsomsin 2009; Ericsson 2001; Helmbrecht et al. 2014; Sivak/Schoettle 2012).

Die Dimension *Beschleunigung* beeinflusst den Energieverbrauch (Ericsson 2001; Bingham et al. 2012; Cho 2008; Evans 1979; Helmbrecht et al. 2014; Jamson et al. 2015a; Pace et al. 2007; Saboohi/Farzaneh 2009). Die Beschleunigung hat einen Einfluss auf die *Motordrehzahl* (Saboohi/Farzaneh 2009). Die nicht-konstante Beschleunigung verursacht einen Energieverlust (Saboohi/Farzaneh 2009), welcher dem Fahrer in Echtzeit zugänglich gemacht werden sollte.

Die Dimension *Verzögerung* beeinflusst die Dimension *Motordrehzahl* (Saboohi/Farzaneh 2009). Auf der einen Seite senkt die passive Verzögerung den Energieverbrauch (Ando/Nishihori 2011; Bingham et al. 2012; Helmbrecht et al. 2014; Pace et al. 2007). Auf der anderen Seite führt aktive Verzögerung zu einem Energieverlust (Saboohi/Farzaneh 2009; Álvarez et al. 2014; Evans 1979).

Die Dimension *Motordrehzahl* beeinflusst den Energieverbrauch (Ericsson 2001; Magaña/Muñoz-Organero 2011b; Sivak/Schoettle 2012).

Abbildung 22 zeigt die Synthese der identifizierten Dimensionen als Messmodell für das Konstrukt energiebewusstes Fahren.



- [1] Álvarez et al. (2014), [2] Ando and Nishihori (2011), [3] Andrieu and Saint Pierre (2014), [4] Barbé et al. (2007), [5] Barth and Boriboonsomsin (2009), [6] Beusen et al. (2009), [7] Bingham et al. (2012), [8] Cho (2008), [9] Dogan et al. (2011), [10] Ericsson (2001), [11] Evans (1979), [12] Helmbrecht et al. (2014), [13] Jamson et al. (2015), [14] Kircher et al. (2014), [15] Magaña and Munoz-Organero (2011a), [16] Magaña and Munoz-Organero (2011b), [17] Pace et al. (2007), [18] Rommerskirchen et al. (2013), [19] Saboohi et al. (2009), [20] Sivak and Schoettle (2012)

Abbildung 22: Messmodell für energiebewusstes Fahren  
Quelle: In Anlehnung an Gottlieb et al. (2018a)

## 5.6 Messmodell für energiebewusstes Fahren: Vor- und Nachteile

Sechs messbare Dimensionen des energiebewussten Fahrens sind identifiziert: *antizipatives Fahren*, *Gangschaltung*, *Geschwindigkeitseinhaltung*, *Beschleunigung*, *Verzögerung* und *Motordrehzahl*. Da die Komplexität der Faktoren sehr umfangreich ist, handelt es sich beim energiebewussten Fahren um ein multidimensionales Konstrukt.

Die Untersuchung teilt sich in drei Schritte auf. Im ersten Schritt werden Beiträge betrachtet, welche mehrere der sechs Dimensionen identifizieren. Im zweiten Schritt werden die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Dimensionen, welche möglicherweise zu einer Dimension zusammengeführt werden könnten, diskutiert. Im dritten Schritt werden die Abhängigkeiten zwischen den Dimensionen behandelt, um die jeweilige Position im Messmodell zu lokalisieren.

### 5.6.1 Die Dimensionen

Sechs der 32 Beiträge untersuchen fünf oder sechs Dimensionen. Bereits im Jahre 1979 führte Evans (1979) eine Analyse der Auswirkungen des Fahrerverhaltens auf den Kraftstoffverbrauch durch. Er untersuchte den Kompromiss zwischen Zeitersparnis und Kraftstoffeinsparung beim Fahren. Obwohl er die Begrifflichkeit „Eco-Driving“ nicht kannte, weist seine Arbeit ähnliche Dimensionen auf. So hat er den Einfluss von Geschwindigkeitseinhaltung, Beschleunigung, Verzögerung und antizipativem Fahren mithilfe von möglichen Stopp-Manövern auf den Kraftstoffverbrauch gemessen. Evans (1979) Arbeit ist bemerkenswert, da er sich dem Thema bereits 1979 widmete. Es dauerte mehr als 20 Jahre, bis der Beitrag von Ericsson (2001) über den Einfluss treibender Faktoren auf Kraftstoffverbräuche und Abgasemissionen veröffentlicht wurde. In den letzten zehn Jahren zeigte sich ein größeres Interesse an der Thematik des Eco-Driving.

Dogan et al. (2011) und Magaña/Muñoz-Organero (2011a) verwenden jede der sechs Dimensionen. Dogan et al. (2011) untersuchen die Dimensionen anhand ihrer Messgrößen hinsichtlich der Auswirkungen der Zeitersparnis, um die Kraftstoffeinsparung während der Fahrt zu identifizieren. Allerdings analysieren Dogan et al. (2011) nicht die Wirkung des energiebewussten Fahrens auf den Kraftstoffverbrauch.

Der Eco-Driving-Assistent von Magaña/Muñoz-Organero (2011a) verknüpft weder die Variablen, welche gemessen werden, miteinander, noch werden die Messgrößen zu einem Indikator zusammengefasst, wie die Details aus Abschnitt 3.4.4 bekunden.

Barkenbus (2010) und Andrieu/Saint Pierre (2014) wenden sechs Dimensionen an. Andrieu/Saint Pierre (2014) verwenden die einzelnen Dimensionen, um den Unterschied zwischen Beratung und Ausbildung auf den Eco-Driving-Fahrstil zu vergleichen. Zusätzlich kombinieren sie die Dimensionen, um die Berechnung eines globalen Eco-Driving-Indikators durchführen zu können. Andrieu/Saint Pierre (2014) definieren Formeln für jede goldene Regel des Eco-Drivings. Die einzelnen Dimensionen werden auch von Barkenbus (2010) nicht in einem umfassenden Modell verknüpft.

Keiner der Beiträge zeigt einen Überblick oder die Abhängigkeiten der Dimensionen voneinander auf. Ein Beitrag, welcher ein umfassendes Messmodell für energiebewusstes Fahren abbildet, fehlt.

### **5.6.2 Gangschaltung und Motordrehzahl**

Der Einfluss zwischen Gangschaltung und Motordrehzahl wird am häufigsten behandelt (Andrieu/Saint Pierre 2014; Barbé et al. 2007; Dogan et al. 2011; Saboohi/Farzaneh 2009). Während ein Einfluss zwischen Motordrehzahl und den Dimensionen antipartizipatorisches Fahren (Magaña/Muñoz-Organero 2011b), Geschwindigkeitseinhaltung (Dogan et al. 2011), Beschleunigung (Saboohi/Farzaneh 2009) und Verzögerung (Saboohi/Farzaneh 2009) nur in jeweils einer Quelle untersucht wird.

Die Dimension **Motordrehzahl** hängt von den Dimensionen antizipatives Fahren, Gangschaltung, Geschwindigkeitseinhaltung, Beschleunigung und Verzögerung ab. Die Abhängigkeit der Dimension Motordrehzahl ist dem Konstrukt energiebewusstes Fahren ähnlich, da die Messung eine gemeinsame Basis darstellt. Für die Messung verwenden mehrere Studien RPM als Indikator (Beusen et al. 2009; Andrieu/Saint Pierre 2014; Dogan et al. 2011). Je kleiner die Motordrehzahl desto geringer ist die verbrauchte Energie (Beusen et al. 2009; Hiraoka et al. 2009; Kaufmann-Hayoz et al. 2012). Je niedriger die verbrauchte Energie ist, desto umweltfreundlicher wird gefahren. Allerdings ist eine niedrige Motordrehzahl nicht zwingend gleichbedeutend mit energiebewusstem Fahren, da eine aktive Verzögerung zu einer niedrigeren Motordrehzahl führt und den Effekt eines zusätzlichen Energieverlustes mit geringerem Energieverbrauch hat. Die Dimension Motordrehzahl und die Verwendung von RPM beeinflusst den Energieverbrauch beim energiebewussten Fahren. Die Verzögerung sollte in eine aktive und eine passive Komponente aufgeteilt werden.

Die Dimension **Gangschaltung** ist abhängig vom antizipativen Fahren und beeinflusst die Motordrehzahl sowie den Energieverbrauch. Jedoch sind die Regeln vage (Andrieu/Saint Pierre 2014; Beusen et al. 2009; Dogan et al. 2011; Ericsson 2001; Jamson et al. 2015a; Hiraoka et al. 2009; Boriboonsomsin et al. 2010; Cho 2008; Saboohi/Farzaneh 2009; Kaufmann-Hayoz et al. 2012). Die Literatur bietet keine gemeinsame Grundlage für eine spezifische Umdrehungszahl, bei welcher der Gang zu ändern ist. Der optimale Gangwechsel für Eco-Driving erfordert spezifische Berechnungen für einzelne Getriebe und Fahrzeugeigenschaften (Yang et al. 2002; Ngo et al. 2013). Für jedes Fahrzeug und Getriebe kann somit der optimale Schaltpunkt berechnet werden.

Festzuhalten ist, dass die Motordrehzahl in RPM gemessen wird, während der Gangwechsel von einer bestimmten Drehzahl des Motors abhängt. Die Motordrehzahl und die Gangschaltung werden somit als zwei verschiedene Dimensionen betrachtet.

### 5.6.3 Beschleunigung und Verzögerung

Beiträge, welche sich mit der Beschleunigung beschäftigen, befassen sich auch mit der Verzögerung (Álvarez et al. 2014; Ando/Nishihori 2011; Barkenbus 2010; Beusen et al. 2009; Andrieu/Saint Pierre 2014; Bingham et al. 2012; Caulfield et al. 2014; Cho 2008; Dogan et al. 2011; Ericsson 2001; Evans 1979; Harvey et al. 2013; Helmbrecht et al. 2014; Kaufmann-Hayoz et al. 2012; Kircher et al. 2014; Magaña/Muñoz-Organero 2011a, 2011b; Pace et al. 2007). Beide Dimensionen beeinflussen die Dimension Motordrehzahl und das Konstrukt energiebewusstes Fahren, spezifischer den Energieverbrauch und den Energieverlust.

Die Dimension **Beschleunigung** beschreibt eine Erhöhung der Geschwindigkeit und ist in zwei Komponenten unterteilt: konstant und nicht-konstant. Bei nicht-konstant kann im Gegensatz zu konstant ein zusätzlicher Energieverlust entstehen. Es stellt sich die Frage, woher der Energieverlust kommt. Viele der analysierten Beiträge empfehlen, sanft oder weich zu beschleunigen (Barkenbus 2010; Barth/Boriboonsomsin 2009; Boriboonsomsin et al. 2010; Cho 2008; Helmbrecht et al. 2014; Neumann et al. 2015; Saboohi/Farzaneh 2009). Saboohi/Farzaneh (2009) empfehlen eine sanfte Beschleunigung bei hoher Verkehrsdichte und generell eine behutsame Beschleunigung. Die Ausnahme sind Kaufmann-Hayoz et al. (2012), welche eine schnelle Beschleunigung empfehlen. Die Literatur liefert kein eindeutiges Ergebnis zur Frage nach schnellem oder langsamem Beschleunigen. Nach der mehrheitlichen Meinung erscheint eine langsame und somit sanfte Beschleunigung eine logische Konsequenz für energiebewusstes Fahren. Eine schnelle Beschleunigung verursacht unter Umständen rutschende/durchdrehende Räder. Die Kraftübertragung ist somit nicht mehr vollständig gegeben und ein erhöhter Energiebedarf entsteht. Der Bedarf kann durch eine angepasste Beschleunigung vermieden werden. Zum besseren Verständnis wird im Folgenden von einer angemessenen Beschleunigung gesprochen. Unter einer angemessenen Beschleunigung wird verstanden, dass der Verkehrsfluss nicht beeinträchtigt ist und keine Reibungsverluste aufgrund durchdrehender Räder auftreten.

Die Dimension **Verzögerung** beschreibt eine Abnahme der Geschwindigkeit und wird in zwei Komponenten unterteilt: aktiv und passiv. Die passive Verzögerung beeinflusst den Energie-

verbrauch unmittelbar, während die aktive Verzögerung durch Betätigen des Bremspedals einen Energieverlust verursacht. Um einen energiebewussten Fahrstil zu erreichen, sollte jede aktive Verzögerung vermieden werden.

Die Dimensionen Beschleunigung und Verzögerung unterscheiden sich in der Richtung ihrer Beschleunigung. Die Eigenschaften sind ähnlich. Beschleunigung und Verzögerung sind als zwei verschiedene Dimensionen zu betrachten.

#### **5.6.4 Energiebewusstes Fahren**

Das Konstrukt energiebewusstes Fahren hängt von sechs Dimensionen ab. Die sechs Dimensionen können als Variablen erster Ordnung verstanden werden, um das Konstrukt energiebewusstes Fahren zweiter Ordnung zu erklären.

Das Konstrukt energiebewusstes Fahren setzt sich aus zwei Komponenten zusammen: Energieverbrauch und Energieverlust. Nach Saboohi/Farzaneh (2009) wird Energieverlust durch eine nicht-gleichmäßige Beschleunigung und ergänzend durch aktive Verzögerung verursacht (Álvarez et al. 2014; Evans 1979; Saboohi/Farzaneh 2009). Ein Energieverlust ist ein Mehr an Energie gegenüber dem optimalen Energieverbrauch. Für die Anzeige der Differenz muss die Messung der Effizienz die Einflüsse auf den Energieverlust berücksichtigen. Zudem ist der Einfluss des Schaltverhaltens, der gleichmäßigen Beschleunigung und der passiven Verzögerung zu berücksichtigen, welche die Motordrehzahl beeinflussen. Die Motordrehzahl wiederum beeinflusst den Energieverbrauch, sodass eine transitive Relation vorliegt. Zusätzlich wird die Motordrehzahl durch antizipatives Fahren beeinflusst.

Die Motordrehzahl kann als Kontrollgröße für die Dimensionen antizipatives Fahren, Gangschaltung, Geschwindigkeitseinhaltung, Beschleunigung und Verzögerung verstanden werden.

Ähnlich zur Dimension Motordrehzahl besitzt die Dimension antizipatives Fahren eine besondere, vorgelagerte Position, welche als einzige alle anderen Dimensionen und das Konstrukt energiebewusstes Fahren beeinflusst.

Eine gemeinsame Grundlage für die Messung der Dimension antizipatives Fahren konnte in der Literatur nicht identifiziert werden, wahrscheinlich weil die verschiedenen Faktoren nicht präzise genug sind. Die Messgrößen sind vielfältig und umfassen die Dimensionen Motordrehzahl, Gangschaltung, Geschwindigkeitseinhaltung, Beschleunigung und Verzögerung. Die Dimension antizipatives Fahren wird als sog. pre-ordered Variable (Vor-Ordnung) angesehen.

Abschließend konnte ein umfassendes Messmodell für energiebewusstes Fahren identifiziert werden. Das Konstrukt energiebewusstes Fahren wird durch sechs Dimensionen erklärt, die untereinander in Abhängigkeiten stehen. Das Messmodell kann in drei Ordnungen unterteilt werden: Vor-Ordnung, erster Ordnung und zweiter Ordnung. Die *Vor-Ordnung* enthält alle Dimensionen von Messgrößen, die auf alle anderen Dimensionen und das Konstrukt energiebewusstes Fahren einwirken. Der Vor-Ordnung wird die Dimension antizipatives Fahren zugeordnet. Die *erste Ordnung* enthält alle Dimensionen, die das Konstrukt energiebewusstes Fahren und eine oder mehrere der Dimensionen, aber nicht alle, beeinflussen. Der ersten Ordnung

sind werden Gangschaltung, Geschwindigkeitseinhaltung, Beschleunigung, Verzögerung und Motordrehzahl zugeteilt. Die *zweite Ordnung* enthält das Konstrukt energiebewusstes Fahren.

## 5.7 Validierung

Zur Validierung des Messmodells wurde ein Interviewfragebogen erstellt. Der Fragebogen validiert das Messmodell formativ, um den Einfluss der identifizierten Dimensionen auf energiebewusstes Fahren reflektierend zu messen. Die Validierung wird in Anlehnung an Bliemel et al. (2005) durchgeführt: (i) Validierung mit Experten, (ii) Messung der Indikatorrelevanz durch Korrelationsmatrix, Varianzinflationsfaktor und Zustandsindex sowie (iii) Nachweis der externen Validität. Auszugsweise wurden die Ergebnisse der Validierung in Gottlieb/Böhm (2018) veröffentlicht.

Für die **Validierung durch Experten** wurden zahlreiche Experten aus Theorie und Praxis wie TÜV und Autohersteller angefragt. Allerdings erklärten sich nur fünf Experten aus der Forschung bereit für ein Interview bereit. Die Schritte **Messung der Indikatorrelevanz** und **externe Validität** konnten aufgrund der geringen Größe der Stichprobe nicht durchgeführt werden. Trotz zahlreicher Anfragen bei Autoherstellern sowohl über Pressestellen als auch persönliche Kontakte stand kein Experte für ein Interview zur Verfügung. Die Ursache könnte an der speziellen Thematik oder der aktuellen Diskussion über Dieselmotorkraftfahrzeuge liegen (Schwarzer 2016).

Die Validierung des Messmodells erfolgt viergliedrig. Im ersten Teil wird zunächst ein „Pre-Fragebogen“ (englisch pre questionnaire) durchgeführt. Im zweiten Teil wird das Messmodell den Experten vorgeführt. Im dritten Teil werden in einem „Post-Fragebogen“ (englisch post questionnaire) Fragen zu den einzelnen Dimensionen und deren Zusammenwirken gestellt. Nach abschließender Auswertung der Fragen fließen die Ergebnisse in das Modell ein.

### 5.7.1 Aufbau und Fragestellungen des Fragebogens

Der Fragebogen gliedert sich in einen Pre- und einen Post-Fragebogen, um eine Teilnahme am Interview auch internationalen Experten zu ermöglichen, sind die Fragen in Englisch gehalten.

Der **Pre-Fragebogen** dient der Selbsteinschätzung des Wissens der Experten bezüglich der Domäne und der einzelnen Dimensionen des Messmodells. Der Fragebogen umfasst 30 Fragen in sechs Kategorien. Die ersten drei Kategorien betreffen die Selbsteinschätzung. Ziel ist es, die Selbsteinschätzung der Experten über ihre Kenntnisse zum energiebewussten Fahren zu ermitteln. Die Kategorien vier bis sechs fragen ab, ob die Experten überhaupt einen Einfluss hinsichtlich der gefundenen Besonderheiten in den einzelnen Dimensionen ausmachen. Besonderheiten gibt es bei den Dimensionen energiebewusstes Fahren, Motordrehzahl und antizipatives Fahren. Die Motordrehzahl scheint als eine Art Proxy für energiebewusstes Fahren zu fungieren und wurde daher ebenfalls in den Pre-Fragebogen aufgenommen. Der Pre-Fragebogen stellt sicher, dass die ausgesuchten Interviewpartner Experten auf dem Gebiet sind. Je höher der Wert auf der Likert-Skala ist, desto wahrscheinlicher ist es, tatsächlich einen Experten interviewt zu haben.

Die *erste Kategorie* umfasst Fragen zum allgemeinen Domänenwissen und wird entsprechend bezeichnet. Es handelt sich um die zwei Bereiche „eco-driving“ und „energy-conscious driving“. Beide werden mit einer 7er-Likert-Skala abgefragt, wobei eins für „keine Ahnung“ und sieben für „viele Jahre an Erfahrung“ steht.

Die *zweite Kategorie* enthält Fragen zum Domänenwissen hinsichtlich des Eco-Drivings und wird mittels einer 7er-Likert-Skala gemessen. Diese Kategorie zeigt auf, ob ausreichend Wissen vorhanden ist, um die gefundenen Ergebnisse bewerten zu können. Je höher die Einschätzung der Domäne unter Berücksichtigung der Dimension ist, desto besser kann das Messmodell hinsichtlich dieser Dimension vom Experten bewertet werden. Das bedeutet jedoch zugleich, dass die Einschätzung der Güte bei einem niedrigen Wert (Mittelwert  $< 3,5$ ) bei einer Dimension mit Vorsicht zu betrachten ist.

Die *dritte Kategorie* enthält Fragen zum Domänenwissen hinsichtlich des energiebewussten Fahrens (energy-conscious driving) und ist ebenfalls auf die festgelegten Dimensionen begrenzt. Die dritte Kategorie wird mit „energy-conscious driving“ bezeichnet und mit einer 7er-Likert-Skala gemessen.

Die *vierte Kategorie* misst, ob der Experte der Meinung ist, dass energiebewusstes Fahren von einer in der Literatur gefundenen Dimension beeinflusst wird oder nicht. Die Messung erfolgt dichotom.

Die *fünfte Kategorie* erfragt, ob der Experte der Auffassung ist, dass antizipatives Fahren einen Einfluss auf alle anderen Dimensionen hat oder nicht. Die Messung erfolgt ebenfalls dichotom.

Die *sechste Kategorie* gibt an, ob der Experte annimmt, dass die Motordrehzahl als eine Art Proxy oder Ersatz für energiebewusstes Fahren herangezogen werden kann. Die Messung erfolgt auch dichotom.

Der **Post-Fragebogen** erhebt eine Einschätzung der Experten bezüglich der einzelnen Dimensionen des Messmodells und ihres Zusammenwirkens. Nach Darstellung des entwickelten Messmodells, welches in Abschnitt 5.5 anhand Abbildung 22 vorgestellt wurde, wird der Post-Fragebogen den Experten vorgelegt. Die Messungen erfolgen binominal, mit offenen Antworten und einer 7er-Likert-Skala wobei eins für „stimme ganz und gar nicht zu“ und sieben für „stimme voll und ganz zu“ steht. Der Fragebogen teilt sich in acht Kategorien: energiebewusstes Fahren, Dimensionseinteilung, Beschleunigung, Verzögerung, Messung energiebewussten Fahrens, Spezialfall antizipatives Fahren, Spezialfall Motordrehzahl und Anordnung der Dimensionen. Der Post-Fragebogen schließt mit einer offenen Antwort hinsichtlich weiterer Fragen und Kommentare ab.

### 5.7.2 Ergebnisse der Experteninterviews

Die Interviewergebnisse unterteilen werden in drei Schritten analysiert. Im ersten Schritt werden nach der Struktur der Fragebögen die Themen aufbereitet. Im zweiten die Struktur des Modells eingehender betrachtet und abschließend die weiteren Expertenankmerkungen diskutiert.

### 5.7.2.1 Selbsteinschätzungen der Experten

Die Experten beurteilen ihre Kenntnisse im Bereich des Eco-Drivings höher als im Bereich des energiebewussten Fahrens (Frage 1:  $M = 6,4$ ,  $SD = 0,8$ ). Ihre Selbsteinschätzung zum energiebewussten Fahren ist niedriger (Frage 2:  $M = 5,6$ ,  $SD = 0,8$ ). Ein Grund könnte sein, dass der Begriff energiebewusstes Fahren in der Literatur keine Verwendung findet. Bedeutsam ist, dass die Experten Schwierigkeiten haben, den Sinn und die Notwendigkeit des Konstrukts energiebewussten Fahren einzuordnen. Experte B versteht energiebewusstes Fahren lediglich als subjektive Wahrnehmung des Fahrers. Experte E sieht keine Notwendigkeit, einen neuen Begriff für ökologisches und energiebewusstes Fahren einzuführen. Die Antworten auf die Fragen 9 bis 14 zu den Dimensionen des Energiebewusstseins unterscheiden sich durchschnittlich um 0,6 oder 0 von den Antworten auf die Fragen 3 – 8 zu den Dimensionen des Eco-Drivings. In Tabelle 11 sind die Mittelwerte und Varianzen der Fragen 1 bis 14 dargestellt.

Fragen-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Mittelwert	6,4	5,6	6,0	6,0	5,4	6,2	6,0	5,4	5,2	5,2	4,8	5,6	5,4	4,8
Varianz	0,8	0,8	0,5	0,5	2,3	0,7	1,0	2,3	0,2	0,2	1,2	0,8	1,3	1,2

Tabelle 11: Durchschnitts- und Varianzwerte der Selbsteinschätzung der Interviewten

Quelle: Eigene Darstellung, Likert-Skala von 1 (keine Erfahrung) bis 7 (seit vielen Jahren Erfahrung)

### 5.7.2.2 Konstrukt energiebewusstes Fahren

Die Aufteilung des energiebewussten Fahrens in Verbrauch und Verlust wird von den Experten kontrovers gesehen (Frage 31:  $M = 0,6$ ,  $SD = 0,3$ ). Drei von fünf Experten halten diese Unterscheidung für sinnvoll. Die meisten Experten würden keine weitere Dimension oder keine weitere Unterteilung von Verbrauch und Verlust vornehmen (Frage 33:  $M = 0,2$ ,  $SD = 0,2$ ). Die Parameter Verlust und Verbrauch betrachtet Experte D als nicht ausreichend und erwähnt die Notwendigkeit, den Fahrzeugtyp und das aktuelle Geschwindigkeitsniveau zusätzlich einzuschließen, um eine genauere Messung vornehmen zu können. Jedoch sei die Frage, ob die Teilung überhaupt notwendig oder sinnvoll ist (Frage 32:  $M = 0,4$ ,  $SD = 0,3$ ), da der Verlust direkt mit höheren Energieverbrauchswerten zusammenhänge und somit redundant sei. Aus Sicht des Experten D geht Energie durch unnötiges Bremsen verloren. Der höhere Energieverbrauch sei bereits im Vorfeld verursacht worden.

Experten A und B schlagen vor, die Unterscheidung in Energieverbrauch und Energieverlust zu entfernen und energiebewusstes Fahren ausschließlich über den Energieverbrauch zu messen. Nach der Konzeption von Experten B tritt gar kein Energieverlust auf.

### 5.7.2.3 Betrachtung der Dimensionen und der einzelnen Messgrößen

Der Einfluss der Dimensionen Gangschaltung (Frage 15), Beschleunigung (Frage 17), Verzögerung (Frage 18), antizipatives Fahren (Frage 19) und Motordrehzahl (Frage 20) auf das Konstrukt energiebewussten Fahren wird von keinem Experten angezweifelt ( $M = 1,0$ ,  $SD = 0,0$ ).

Dem Einfluss der Dimension Geschwindigkeitseinhaltung auf das energiebewusste Fahren wird überwiegend zugestimmt (Frage 16:  $M = 0,8$ ,  $SD = 0,2$ ). Jedoch führen die Experten A und D an, dass die Dimension Geschwindigkeitseinhaltung durch **Geschwindigkeitsbegrenzungen** eingeschränkt ist. Allerdings könne auch zu langsames Fahren einen negativen Einfluss auf den

Energieverbrauch haben. Experte A empfiehlt die Dimension Geschwindigkeitseinhaltung umzubenennen in Geschwindigkeit.

Des Weiteren merkt Experte A an, dass das Fahren bei einer Geschwindigkeit über der zulässigen Höchstgeschwindigkeit bei einem höheren Gang zu einem geringeren Verbrauch führen könne. Beispielsweise weisen moderne Fahrzeuge mit 60 km/h im sechsten Gang einen niedrigeren Verbrauch auf als mit 50 km/h im fünften Gang. Die Definition der Dimension Geschwindigkeitseinhaltung als Überschreiten der Geschwindigkeitsbegrenzung ist seiner Meinung nach zu restriktiv. Zusätzlich schlägt er vor, zwischen Fahren mit konstanter Geschwindigkeit und Stop-and-go zu unterscheiden.

Drei von vier Experten stimmen der Unterscheidung von sechs Dimensionen im Modell zu (Frage 35:  $M = 0,75$ ,  $SD = 0,25$ ). Allerdings sind die Experten geneigt, dem Modell eine weitere Dimension hinzuzufügen (Frage 36;  $M = 1,0$ ,  $SD = 0,0$ ), während ein Experte eine Dimension aus dem bestehenden Messmodell entfernen würde (Frage 38:  $M = 0,2$ ,  $SD = 0,2$ ). Drei Experten weisen auf die Redundanz der Dimensionen Motordrehzahl und Schaltvorgang hin, obwohl keiner der Experten eine der Dimensionen streichen würde. Abschließend stimmen die Experten mit den dargestellten Messgrößen im Modell überein. Jedoch würden sie die Messgrößen um folgende Dimensionen/Faktoren erweitern:

- (i) reibungsloses Fahren mit konstanter Geschwindigkeit (Experte A),
- (ii) Start-Stopp-Strategien (Experte A),
- (iii) eine Verbrauchskarte, die den Energieverbrauch als Funktion der Motordrehzahl und der Motorlast darstellt (Experte B),
- (iv) Querschleunigung (Experte C),
- (v) Geschwindigkeitsüberschreitung im Sinne des Fahrens unterhalb der Geschwindigkeitsbegrenzung (Experte D),
- (vi) Hilfsfunktionen (Experte D),
- (vii) Fahren mit konstanter Geschwindigkeit im Sinne von „neutralem Gang“ und Nicht-Drücken eines Pedals (Experte D),
- (viii) Fahrzeugtyp (Experte E) und
- (ix) Vorhandensein von Personenkraftwagen und persönliche Beziehung zu einem PKW (z. B. eigene Kinder) (Experte E).

#### **5.7.2.4 Komponenten der Dimension Beschleunigung**

Die Dimension Beschleunigung würden die meisten Experten nicht in Komponenten aufteilen (Frage 41:  $M = 0,2$ ,  $SD = 0,25$ ). Die Aufteilung ist nach Meinung der Experten vom Grundverständnis korrekt (Frage 40:  $M = 0,6$ ,  $SD = 0,3$ ), manche halten allerdings eine weitere Aufteilung für erforderlich (Frage 42:  $M = 0,2$ ,  $SD = 0,25$ ). Die Experten B und C verstehen die Dimension Beschleunigung als Phase der zunehmenden Geschwindigkeit. Daher schlägt Experte C vor, die Komponente konstante Beschleunigung von der Dimension Beschleunigung zu trennen und in eine neue Dimension konstante Geschwindigkeit zu überführen („steady-speed-driving“). Experte B hat eine ähnliche Empfehlung wie Experte C und nennt die neue Dimension steady-state-driving. Experte B würde die Komponente konstante Beschleunigung der Dimension Geschwindigkeit zuweisen. Auch würde B lediglich den Beschleunigungsprozess in die Dimension Beschleunigung aufnehmen und sie nicht weiter aufteilen.

Eine alternative Aufteilung der Komponenten könnte nach Experten C so aussehen, dass die Beschleunigung einem Beschleunigungsniveau zugeordnet wird. Experte C versteht konstante Beschleunigung als eine sanfte Beschleunigung und nicht-konstant als eine starke Beschleunigung als Folge eines aggressiven Fahrstils. Experte E wiederum schlägt vor, den Winkel des Gaspedals zu messen und zusätzlich zu erfassen, wie schnell das Gaspedal nach unten gedrückt wird, um eine bessere Unterteilung der Komponenten in konstant und nicht-konstant zu ermöglichen. Hingegen wird eine detaillierte Definition der Begriffe „starkes“ und „sanftes“ Drücken des Gaspedals von den Interviewten nicht vorgenommen.

#### **5.7.2.5 Komponenten der Dimension Verzögerung**

Die Experten stimmen der vorgenommenen Aufteilung der Dimension Verzögerung in die Komponenten aktiv und passiv zu (Frage 44:  $M = 1,0$ ,  $SD = 0,0$ ). Einige Experten halten die Einteilung in eine aktive und passive Komponente für unzureichend und schlagen eine zusätzliche Untergliederung vor. Experte B empfiehlt, Rekuperation, d. h. die Erzeugung von Energie während des Bremsens, auf dem gleichen Niveau wie aktives und passives Bremsen einzufügen. Experte A schlägt vor, die passive Verzögerung weiter in Ausrollen und Leerlauf zu unterscheiden. Das Ergebnis bestätigen die Ja-Nein-Antworten auf die Fragen 46 ( $M = 1,0$ ,  $SD = 0,0$ ) und 47 ( $M = 0,5$ ,  $SD = 0,33$ ).

#### **5.7.2.6 Komponenten des Konstruktes energiebewusstes Fahren**

Das Konstrukt energiebewusstes Fahren setzt sich aus Energieverbrauch und -verlust zusammen.

##### **5.7.2.6.1 Messung des Energieverbrauchs des Konstruktes energiebewusstes Fahren**

Die Frage, ob der Energieverbrauch indirekt durch Messung der Motordrehzahl (Frage 49:  $M = 6,0$ ,  $SD = 0,67$ ), Gangschaltung (Frage 50:  $M = 6,25$ ,  $SD = 0,25$ ), Geschwindigkeitseinhaltung (Frage 51:  $M = 5,5$ ,  $SD = 0,33$ ), antizipatives Fahren (Frage 52:  $M = 6,5$ ,  $SD = 0,33$ ), Beschleunigung konstant (Frage 53:  $M = 5,75$ ,  $SD = 0,25$ ), Beschleunigung nicht-konstant (Frage 54:  $M = 6,0$ ,  $SD = 0,67$ ) oder passive Verzögerung (Frage 55:  $M = 6,25$ ,  $SD = 0,25$ ) berechnet werden kann, werden affirmativ beantwortet.

Die indirekte Messung des Energieverbrauchs über die Geschwindigkeitsmessung ergab den niedrigsten Mittelwert von 5,5 (Frage 51:  $SD = 0,33$ ). Experte A erklärt, dass Geschwindigkeitsüberschreitungen keinen Einfluss auf den Energieverbrauch hätten. Jedoch habe die Geschwindigkeitsüberschreitung Einfluss auf die absolute Geschwindigkeit. Danach könnte ein leichtes Überschreiten der Geschwindigkeitsbegrenzung zu einem niedrigeren Energieverbrauch führen als die strikte Einhaltung der Geschwindigkeitsbegrenzung.

Die indirekte Messung des Energieverbrauchs über das antizipative Fahren erhielt die größte Zustimmung (Frage 52:  $M = 6,5$ ,  $SD = 0,33$ ). Jedoch weist Experte E darauf hin, dass die Messung des antizipativen Fahrens nur theoretisch möglich sei, da das Thema ein noch offenes Forschungsthema sei. Experte B fügt hinzu, dass das Wechseln des Ganges nur ein qualitativer

Indikator für den Energieverbrauch sei. Darüber hinaus weist B darauf hin, dass ein zu frühzeitiger Einsatz der Motorbremse die Notwendigkeit der Beschleunigung zur Folge habe. Nach passiver Verzögerung könne es somit zu unnötigem Energieverbrauch kommen.

Die Interviewten widersprechen im Wesentlichen der Aussage, dass der Energieverbrauch nicht direkt mit der aktiven Verzögerung gemessen wird (Frage 56:  $M = 2,25$ ,  $SD = 6,25$ ). Diese Einschätzung folgt der Erwägung, dass der aktiven Verzögerung eine Beschleunigung und damit ein Energieverbrauch vorausgehen, da für die Verzögerung und das damit verbundene Bremsen ein bestimmtes Geschwindigkeitsniveau erforderlich sei. Die hohe Varianz belegt, dass die Aussage als kontrovers angesehen wird.

#### **5.7.2.6.2 Messung des Energieverlustes beim Konstrukt energiebewusstes Fahren**

Die Messung des Energieverlustes über die aktive Verzögerung (Frage 58:  $M = 5,6$ ,  $SD = 6,8$ ) und des antizipativen Fahrens (Frage 59:  $M = 5,4$ ,  $SD = 6,8$ ) erhält wenig Zustimmung. Die beiden Fragen weisen eine hohe Abweichung der Varianz auf. Ein Experte beantwortet die Frage 58 mit 1, einer mit 6 und drei mit 7. Bei der Frage 59 ist dies ähnlich, so gibt ein Experte einen Wert mit 1 an, einer mit 5 und drei wählen 7. Bei der niedrigen Wertung handelt es sich um den gleichen Experten. Die Selbsteinschätzung seines Wissens über Eco-Driving und energiebewusstes Fahren ist jedoch bei ihm hoch. Hingegen sieht der Experte Energieverlust nicht als Messgröße an. Die indirekte Messung des Energieverlusts über die Dimension Beschleunigung während einer nicht-konstanten Phase ist generell umstritten (Frage 57:  $M = 3,2$ ,  $SD = 6,2$ ).

Die Möglichkeit der direkten Messung des Energieverlusts wird nicht bezweifelt, sofern die Beschleunigung während der konstanten Phase (Frage 61:  $M = 7,0$ ,  $SD = 0,0$ ) oder bei Geschwindigkeitseinhaltung (Frage 62:  $M = 7,0$ ,  $SD = 0,0$ ) gemessen wird. Der Energieverlust könne nicht indirekt über die Messung der passiven Verzögerung (Frage 60:  $M = 5,5$ ,  $SD = 9,0$ ), die Gangschaltung (Frage 63:  $M = 5,5$ ,  $SD = 9,0$ ) und die Motordrehzahl (Frage 64:  $M = 5,5$ ,  $SD = 9,0$ ) gemessen werden, wie die Mittelwerte bestätigen. Der Einfluss dieser Größe wird nicht eindeutig gesehen: So stimmen drei Experten voll und ganz zu, während ein Experte ganz und gar nicht zustimmt.

#### **5.7.2.7 Dimensionen des antizipativen Fahrens**

Im Pre-Fragebogen bestätigen die Experten, dass antizipatives Fahren einen Einfluss auf die anderen fünf Dimensionen hat (Frage 21-25). Die Ergebnisse des Post-Fragebogens (Frage 65-69) ermöglichen darüber hinaus eine genauere Betrachtung dieses Einflusses.

Den Einfluss des antizipativen Fahrens auf Beschleunigung und Verzögerung sehen die Experten (Frage 68 und 69:  $M = 7,0$ ,  $SD = 0,0$ ).

Der Einfluss des antizipativen Fahrens auf die Geschwindigkeitseinhaltung (Frage 67:  $M = 6,8$ ,  $SD = 0,2$ ) wird ebenfalls bestätigt, ebenso wie der Einfluss des antizipativen Fahrens auf die Motordrehzahl (Frage 65:  $M = 5,6$ ,  $SD = 6,8$ ) oder die Gangschaltung (Frage 66:  $M = 6,0$ ,

$SD = 3,0$ ). Allerdings können die Mittelwerte als Zustimmung verstanden werden. Die niedrigeren Mittelwerte und Varianzen sind auf die Bewertung des Experten B zurückzuführen, der mit der Aussage nicht einverstanden ist, dass die Motordrehzahl durch einen antizipativen Fahrstil beeinflusst werden kann (Punktzahl 1). Er weist darauf hin, dass der Fahrer selbst die Motordrehzahl nicht direkt beeinflussen könne, sondern nur indirekt über die Wahl eines geeigneten Getriebes. Als Konsequenz würde er den Zusammenhang vom antizipativen Fahren und Motordrehzahl im Modell entfernen. Dieser Experte sieht auch keinen großen Einfluss des antizipativen Fahrens auf den Gangwechsel (Punktzahl 3).

Die größte Herausforderung der Dimension antizipatives Fahren besteht darin, sie überhaupt zu messen. Obwohl die Experten der bedeutsamen Rolle des antizipativen Fahrens für ein energiebewusstes Fahren zustimmen, bezweifeln sie ihre technische Messbarkeit. Experte A weist darauf hin, dass die Messung der Dimension antizipatives Fahren ohne Informationen über die Umwelt oder der anderen Faktoren wie Verkehrsteilnehmer nicht möglich sei. Er kommt zu dem Schluss, dass das eine Umsetzung zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht möglich ist.

#### **5.7.2.8 Dimensionen der Motordrehzahl**

Die Abhängigkeit der Motordrehzahl von den anderen fünf Dimensionen ist bei den Interviewpartnern umstritten.

Die Abhängigkeit der Motordrehzahl vom Schaltvorgang ist eindeutig. Die Experten stimmen dem Zusammenhang sowohl im Pre-Fragebogen als auch im Post-Fragebogen zu (Frage 26 (Pre-Fragebogen):  $M = 1,0$ ,  $SD = 0,0$ ; Frage 71 (Post-Fragebogen):  $M = 7,0$ ,  $SD = 0,0$ ).

Die Motordrehzahl hängt von den Dimensionen Geschwindigkeitseinhaltung (Frage 72:  $M = 5,6$ ,  $SD = 6,8$ ) und/oder Beschleunigung (Frage 73:  $M = 5,6$ ,  $SD = 6,8$ ) ab. Insgesamt scheint diese Abhängigkeit jedoch schwächer als die des gewählten Gangs zu sein. Die hohe Varianz ist auf die abweichende Meinung des Experten B zurückzuführen. Er geht davon aus, dass die Motordrehzahl nur vom Schaltvorgang abhängt. Die Abhängigkeit der Motordrehzahl von den Dimensionen Geschwindigkeitseinhaltung und Beschleunigung wird von vier der fünf Experten gesehen (Frage 27 und 28 (Pre-Fragebogen):  $M = 0,8$ ,  $SD = 0,2$ ).

Der Einfluss der Dimension antizipatives Fahren auf die Dimension Motordrehzahl ist umstritten (Frage 70:  $M = 4,4$ ,  $SD = 9,8$ ). Die Ergebnisse des Pre-Fragebogens deuten bereits auf das Ergebnis hin (Frage 30:  $M = 0,6$ ,  $SD = 0,3$ ). Die Experten stimmen diesem Zusammenhang entweder stark zu oder sind stark dagegen (Punktzahl 1: 2, Punktzahl 6: 1, Punktzahl 7: 2). Der Einfluss der Dimension des antizipativen Fahrens auf die Dimension Motordrehzahl wird kontrovers betrachtet. Unter den gegebenen Anhaltspunkten ist eine Aufnahme als Dimension ins Messmodell fraglich.

Die Abhängigkeit zwischen den Dimensionen Verzögerung und Motordrehzahl wird als kritisch angesehen (Frage 29:  $M = 0,4$ ,  $SD = 0,3$ , Frage 74:  $M = 5,2$ ,  $SD = 7,2$ ). Drei von fünf Experten stimmen zu. Ein Experte lehnt die Verbindung ab und einem ist sie gleichgültig. Experte A gibt den Einwand, dass die Motordrehzahl für den Energieverbrauch irrelevant sei, wenn das Gaspedal während der passiven Verzögerung nicht gedrückt werde.

Das aus der Literatur abgeleitete Messmodell entspricht den Meinungen der Experten. Nur dem Einfluss der Komponente nicht-konstante Beschleunigung auf das Konstrukt energiebewusstes Fahren wird in geringerem Umfang zugestimmt (vgl. Frage 57). Die gefundenen Werte sind im Messmodell mit einer Farbskala in Abbildung 23 verdeutlicht.

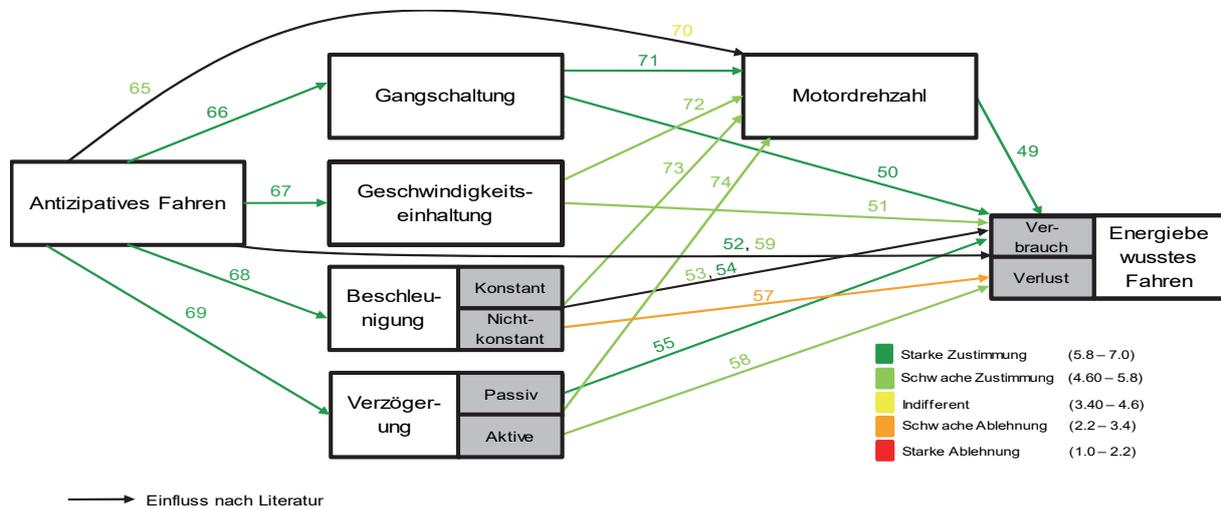


Abbildung 23: Messmodell mit validierten Ergebnissen  
Quelle: Eigene Darstellung

### 5.7.2.9 Modell-Struktur

Die Anordnung der Dimension antizipatives Fahren als Vor-Ordnung ist laut Experten nicht so eindeutig wie der allgemeine Einfluss der Dimension (Frage 75:  $M = 5,5$ ,  $SD = 5,67$ ). Experte A stimmt mit der Einstufung des antizipativen Fahrens als Vor-Ordnung nicht überein. Dennoch stimmt er dem Einfluss und der Bedeutung des antizipativen Fahrens auf das energiebewusstes Fahren im Allgemeinen zu. Er erklärt dies durch die Tatsache, dass die Messung des antizipativen Fahrens umgekehrt gerichtet sei. Das antizipative Fahren könne somit nur indirekt durch die Verzögerung oder die Motordrehzahl gemessen werden.

Die Dimension Motordrehzahl als Kontrollvariable zu verstehen, wird von den Experten kontrovers angesehen (Frage 76:  $M = 3,0$ ,  $SD = 6,5$ ). Ein Experte ist indifferent und nur ein Experte ist mit dieser Position einverstanden, während drei von fünf Experten nicht zustimmen. Der Einwand der Experten A und D lautet, dass die Motordrehzahl als alleiniges Maß nicht ausreiche. Die Dimension Motordrehzahl wird auf dem gleichen Niveau wie die Dimensionen Gangschaltung, Geschwindigkeitseinhaltung, Beschleunigung und Verzögerung angeordnet.

Die Experten stimmen mit der Anordnung der Dimensionen überein, welche Gangschaltung, Geschwindigkeitseinhaltung, Beschleunigung und Verzögerung als gleichrangig erachten (Frage 77:  $M = 5,25$ ,  $SD = 5,58$ ). Experte B schlägt eine dreigeteilte Kette von Einflussfaktoren/Dimensionen vor.

Auf dem ersten Glied befände sich diesem Vorschlag zufolge, die Dimension antizipatives Fahren, da der Fahrer eine Entscheidung trifft, die alle anderen fünf Dimensionen beeinflusst.

Das zweite Glied würde aus den Dimensionen Geschwindigkeitseinhaltung, Verzögerung und Beschleunigung bestehen, durch die der Fahrer den Antrieb steuert und die Fahrerentscheidung des ersten Gliedes offenbart. Das dritte Glied würde unterhalb des zweiten angeordnet werden. Es bestünde aus Gangschaltung und Motordrehzahl.

Der Motor wandle die Entscheidung des Fahrers im ersten Glied um. Durch die steuerbaren Dimensionen Geschwindigkeitseinhaltung, Beschleunigung und Verzögerung werde das zweite Glied offensichtlich bestimmt.

#### **5.7.2.10 Weitere Anmerkungen der Experten zum Messmodell**

Experte A empfiehlt, die Fähigkeit, das Wissen und das Wollen der Fahrer energieeffizient zu fahren, aufzunehmen. Der Fahrer müsse wissen, wie er umweltfreundlich fahren könne. Grundsätzlich sollte der Fahrer so vorausschauend fahren, dass kein Sonderfall eintrete, wie beispielsweise eine Notbremsung.

Experte B schlägt vor, die Einstellung des Fahrers, wie beispielsweise eine sportliche Fahrweise, als Dimension *individuelles Fahrprofil* der Vor-Ordnung hinzuzufügen.

Experte E kritisiert, dass das Modell das Verhalten des Fahrers mit den Eingaben (Input) des Fahrers oder der Fahrleistung verwechsle. Beschleunigung, Verzögerung und Lenkung seien die einzigen Dimensionen, die ein Fahrer tatsächlich beeinflussen könne. Die Dimensionen könnten direkt durch Messung des Lenkwinkels und der Winkel von Brems- und Gaspedal gemessen werden. Nur daraus ergäben sich konkrete Leistungskennzahlen.

Geschwindigkeitseinhaltung ist nach Experten E ein Ergebnis, das vom Verhalten des Fahrers bei Beschleunigung oder Verzögerung abhängig ist.

Experte E empfiehlt die Differenzierung nach Beschleunigung und Verzögerung nicht vorzunehmen, weil es sich um die gleiche Sache handelt, bei der sich nur die Richtung in positiv und negativ unterscheiden lasse.

### **5.7.3 Die Validierung des Messmodells**

Die Validierung des Messmodells unterteilt sich in vier Schritte. Zuerst wird das Konstrukt energiebewusste Fahren näher betrachtet. Im zweiten Schritt werden die sechs Dimensionen von Messgrößen detailliert analysiert. Im dritten Schritt werden Fragen an das Modell weitergehend untersucht. Im vierten Schritt werden die Ergebnisse des Experteninterviews zusammengefasst in einem Messmodell präsentiert.

#### **5.7.3.1 Energiebewusstes Fahren**

Zunächst wird das Konstrukt analysiert und danach die Einflüsse der einzelnen Dimensionen auf das Konstrukt.

### 5.7.3.1.1 Das Konstrukt und dessen Komponenten

Die Unterteilung des Konstruktes energiebewusstes Fahren in die Komponenten Energieverbrauch und -verlust erhält von den Experten unterschiedliches Feedback. Einige Experten meinen, die Komponente Energieverlust sei aufgrund ihrer direkten Beziehung mit höheren Verbrauchswerten redundant. Sie schlagen vor, die Unterscheidung nicht vorzunehmen und energiebewusstes Fahren ausschließlich über die verbrauchte Energie zu messen. Der Begriff Energieverlust wird von den Experten A und B in seiner physikalischen Bedeutung verstanden, so dass der Begriff sie irritiert. Experte B weist daraufhin, dass es in seiner Profession als Antriebsingenieur keinen Energieverlust gibt. Energieverluste spiegeln sich in höheren Energieverbrauchswerten wider. Als mögliche Alternative schlägt er den Begriff zusätzlicher Energieverbrauch vor.

Experte B schlägt vor, den Energieverbrauch als einzige Messgröße zu verwenden und in die Komponenten unvermeidbarer und vermeidbarer oder notwendiger und unnötiger Energieverbrauch zu unterteilen. Wenn Feedback auf die Vorteile hinweist, sei es effektiver (Gonder et al. 2012). Kraftstoffeinsparungen sollten daher anstelle des negativen Aspekts des Energieverlusts hervorgehoben werden.

Der Begriff Energieverlust wird von den Experten anders verwendet. Die Begrifflichkeit sollte (i) entweder genauer definiert oder ersetzt werden oder es sollte (ii) nur der Energieverbrauch gemessen werden.

Die Notwendigkeit für das neue Konstrukt energiebewusstes Fahren wird hinterfragt, wie sich aus: (i) den niedrigeren Werten zur Selbsteinschätzung der Interviewten im Bereich des energiebewussten Fahrens gegenüber dem Eco-Driving und (ii) den aufgeworfenen Fragen zur Begrifflichkeit ableiten lässt. Hingegen wird eine Notwendigkeit, eines neuen Begriff für ökologisches und energiebewussten Fahren einzuführen, vom Experten E nicht gesehen. Das Konstrukt energiebewusstes Fahren ermöglicht m. E. (i) die Absicht, das Fahrerverhalten zu ändern betonen zu können, anstatt zu versuchen, die Leistung des Fahrers zu ändern, (ii) den neuen Aspekt des Energieverlustes hinzuzufügen und (iii) ein vollständiges Bild der Messung zeigen zu können.

Ferner schlägt Experte D vor, den Typ des Fahrzeugs und den aktuellen Geschwindigkeitswert als eine zusätzliche Komponente hinzuzufügen. Nach Experten D sei der Fahrzeugtyp eine Einflussgröße der Umwelt, welche durch den Fahrer selbst nur durch die Kaufentscheidung beeinflusst werden könne. Die Größe wird als konstant angenommen und ist nicht Gegenstand der Betrachtung.

Der aktuelle Geschwindigkeitswert ist als eine Abänderung der Dimension Geschwindigkeitseinhaltung zu verstehen und bereits im Modell enthalten. Eine Dimension wäre sinnvoller als eine zusätzliche Komponente des energiebewussten Fahrens. Die Überlegungen des Experten D werden im Unterabschnitt 5.7.3.2.7 eingehender analysiert.

### 5.7.3.1.2 Einfluss auf den Energieverbrauch

Der Einfluss auf den Energieverbrauch wird im Modell mit Pfeilen symbolisiert. Es wird davon ausgegangen, dass der Einfluss auf den Energieverbrauch durch die Pfeile korrekt dargestellt ist, da die Fragen 49 bis 56 und 60 bis 64 von den Experten positiv beantwortet worden sind.

Es ist zumindest theoretisch möglich, den Energieverbrauch über Motordrehzahl, Gangschaltung, Geschwindigkeitseinhaltung, antizipatives Fahren, konstante und nicht-konstante Beschleunigung sowie passive Verzögerung zu messen. Pfeile, die auf den Energieverbrauch zeigen und von den Experten positiv beurteilt wurden, können als zutreffend übernommen werden.

Die Experten sehen einen Einfluss von der aktiven Verzögerung hin zum Energieverbrauch (Frage 56:  $M = 2,25$ ). Eine Begründung lautet, dass ein gewisses Geschwindigkeitsniveau Energie im Vorfeld für das Bremsen benötigt. Der aktiven Verzögerung folgt im Wesentlichen eine Beschleunigungsphase, die den Energieverbrauch verursacht. Zum Energieverbrauch führt die aktive Verzögerung vor und nach der Verzögerungsphase, weshalb die Experten einen Einfluss der Komponente aktiv auf den Energieverbrauch sehen.

Die bisherigen Verbindungen zum Energieverbrauch sind valide. Ist der Energieverbrauch optimal, so ist er notwendig. Ist der Energieverbrauch nicht optimal, so bedarf es zusätzlicher Energie. Der Verbrauch dieser Energie ist nicht notwendig, somit wird der Vorschlag der Experten, eine weitere Verbindung hinzuzufügen, nicht umgesetzt.

### 5.7.3.1.3 Verbindungen zum Energieverlust

Die Verbindung der aktiven Verzögerung wird von den Experten nur in einem geringen Maße als korrekt angesehen (Frage 58:  $M = 5,6$ ,  $SD = 6,8$ ). Da unnötiges aktives Bremsen bereits in der Literaturrecherche als Verschwendung von Energie identifiziert wurde (Kircher et al. 2014; Saboohi/Farzaneh 2009), wird der Einfluss der Dimension Verzögerung auf den Energieverlust als Komponente des Konstruktes energiebewusstes Fahren als zutreffend angesehen, obwohl die Experten unterschiedlicher Meinung sind (Frage 58:  $M = 5,6$ ,  $SD = 6,8$ ).

Die Verbindung der Dimension des antizipativen Fahrens zum Energieverlust wird von den Experten abgelehnt (Frage 59:  $M = 5,4$ ,  $SD = 6,8$ ). Allerdings ist die Messung des antizipativen Fahrens und die Einschätzung, wie der Fahrstil den Energieverbrauch beeinflusst, ein umstrittenes Thema und wird in Unterabschnitt 5.7.3.2.1 genauer untersucht.

Die Experten empfehlen, die Verbindung der Dimension Beschleunigung während der nicht-konstanten Phase (Erhöhung der Geschwindigkeit) zur Dimension des Energieverlustes wegzulassen (Frage 57:  $M = 3,2$ ,  $SD = 6,2$ ). Die Experten sind jedoch in der Fragestellung selbst eher zweigeteilter Meinung.

Die Idee der Verbindung ist, dass das zu starke Betätigung des Gaspedals mehr Energie verbraucht, als es bei einem optimalen Winkel der Fall wäre, wie Jamson et al. (2015a) bewiesen haben. Die Begrifflichkeit des Energieverlusts hat im physikalischen Sinne für die Experten eine andere Bedeutung. Die Ablehnung lässt sich auf die falsche Interpretation des Begriffs Energieverlust zurückführen. Der Begriff Energieverlust könnte die Akzeptanz erhöhen, weil

die Verbindung zwischen zu starker Beschleunigung und hohem Energieverbrauch logisch erscheint (Jamson et al. 2015a). Die Verbindung wird als notwendig erachtet und im Messmodell belassen.

In dem Messmodell existieren keine Verbindungen zwischen dem konstanten Fahren oder Geschwindigkeitseinhaltung auf die Komponente Energieverlust. Die Experten befürworten die dazugehörigen Fragen 61 und 62 ( $M = 7,0$ ,  $SD = 0,0$ ).

Das Fehlen der Verbindung von der passiven Komponente der Dimension Verzögerung, der Dimensionen Gangschaltung und Motordrehzahl zur Komponente Energieverlust weist einen positiven Mittelwert von 5,5, auf. Die Varianz ist mit 9,0 im Vergleich zu den bisherigen Varianzen höher.

Zur passiven Komponente der Dimension Verzögerung weist Experte B darauf hin, dass die passive Verzögerung den Energieverbrauch so beeinflussen kann, dass ein nicht-notwendiger Energieverbrauch verursacht wird. Der nicht-notwendige Verbrauch wird symbolisiert durch den Begriff Energieverlust. Die Existenz der Verbindung hängt von der Entscheidung ab, ob die gesamte Fahrt oder nur die parallele Folge der passiven Verzögerungen im Modell berücksichtigt wird. Das Messmodell berücksichtigt die parallelen Effekte der Einflussfaktoren und nicht ihre Auswirkungen auf die gesamte Reise. Die Verbindung von der Komponente passiv zur Komponente Energieverlust wird nicht zum Messmodell hinzugefügt.

Für die Dimension Gangschaltung erklärt Experte A, dass das Fahren mit 60 km/h im sechsten Gang effizienter sei als Fahren mit 50 km/h im fünften Gang. Nach den Eco-Driving-Regeln empfiehlt sich frühzeitig hochzuschalten (Kaufmann-Hayoz et al. 2012; Rakotonirainy et al. 2011) und den höchstmöglichen Gang zu verwenden (Beusen et al. 2009; Saboohi/Farzaneh 2009). Spätes Schalten kann unnötigen Energieverbrauch verursachen.

Mehrere Studien empfehlen, das Fahrzeug bei niedrigen Motordrehzahlen pro Minute zu betreiben (Beusen et al. 2009; Hiraoka et al. 2009; Kaufmann-Hayoz et al. 2012). Hohe Drehzahlen sind ein Indikator für unnötigen Energieverbrauch, woraus abgeleitet werden kann, dass eine Verbindung von der Dimension Gangschaltung in Richtung Energieverlust hinzuzufügen ist (Magaña/Muñoz-Organero 2011b).

### **5.7.3.2 Dimensionen der Messgrößen**

Bei der Überprüfung der verschiedenen Ansätze zur Bewertung des energiebewussten Fahrens sind die Dimensionen antizipatives Fahren, Gangschaltung, Geschwindigkeitseinhaltung, Beschleunigung, Verzögerung und Motordrehzahl identifiziert worden, welche das energiebewusste Fahren beeinflussen. Das Ergebnis der Bewertung der Dimensionen wird im nächsten Abschnitt näher erörtert.

### 5.7.3.2.1 Antizipatives Fahren

Die Rolle des **antizipativen Fahrens** für energiebewusstes Fahren und sein Einfluss auf die anderen Dimensionen ist unzweifelhaft. Auch ihre Rolle als Variable in einer Vor-Ordnung im Modell ist weitgehend übereinstimmend. Allerdings sind die Messgrößen nicht präzise genug.

Experte E bestätigt, dass das antizipative Fahren eher ein Verhalten des Fahrers als ein konkretes Maß für die Fahrleistung ist. Die Experteninterviews belegen, dass antizipatives Fahren vor allem als Fahrstil verstanden wird, welcher sich durch Geschwindigkeitseinhaltung, Verzögerung und Beschleunigung charakterisieren lässt. Hier wird das antizipative Fahren jedoch als Fahrverhalten und die Fähigkeit, den Verkehr vorherzusehen, gesehen. Es beeinflusst die Art und Weise der Beschleunigung, der Verzögerung, der Geschwindigkeitseinhaltung, der Gangschaltung und die Motordrehzahl. Das allgemeine Verständnis des Begriffs antizipatives Fahren ist anders als seine Bedeutung im Modell. Dennoch stimmen die Experten dem Einfluss des antizipativen Fahrens auf die verbleibenden fünf Dimensionen zu.

Die Dimension kann nicht präzise genug gemessen werden, obwohl es einen nicht quantifizierbaren Einfluss hat, und wird daher aus dem Modell entfernt.

### 5.7.3.2.2 Motordrehzahl

Die Dimension **Motordrehzahl** als Kontrollvariable wird kontrovers gesehen (Frage 76:  $M = 3,0$ ,  $SD = 6,5$ ). Die Interviews zeigen, dass die Motordrehzahl nicht als universelle Regelgröße angesehen wird, sondern als zusätzliche Messgröße. Die Messung der Motordrehzahl gibt Auskunft über den wahrscheinlichen Energieverbrauch, ist aber nicht ausreichend für die Ermittlung des Energieverbrauchs (Frage 49:  $M = 6,0$ ,  $SD = 0,67$ ).

Experte B zeigt eine Beeinflussungskette auf, welche das bisherige Messmodell in drei Gliederungsebenen unterteilt.

- 1) Auf der dritten Ebene sieht Experte B die vom Motor beeinflussten Dimensionen und ordnet die Dimensionen Motordrehzahl und Gangschaltung dieser Ebene zu.
- 2) Die dritte Ebene wird von der zweiten Ebene beeinflusst, welche aus den Dimensionen besteht, die der Fahrer direkt steuern kann. Daraus lässt sich ableiten, dass die Geschwindigkeit des Motors als Translation der durch den Fahrer steuerbaren Dimensionen hervorgerufen wird. Die zweite Ebene der Beeinflussungskette besteht aus den Dimensionen Geschwindigkeitseinhaltung, Verzögerung und Beschleunigung.
- 3) Die erste Ebene besteht aus Dimensionen, die von der Entscheidung des Fahrers abhängen und beeinflussen die zweite Ebene.

In Abbildung 24 ist eine Visualisierung des Modells des Experten B dargestellt.

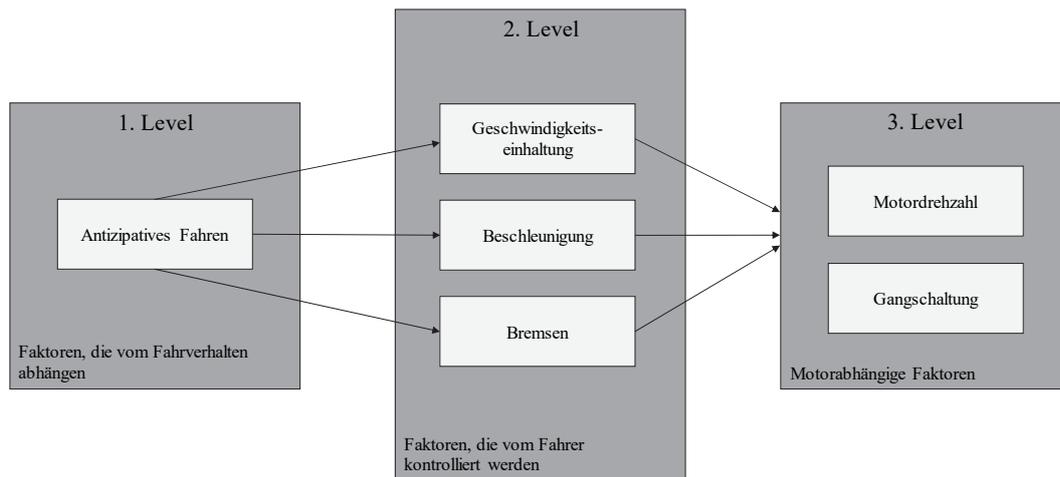


Abbildung 24: Beeinflussungskette der Dimensionen nach Experten B  
Quelle: Eigene Darstellung

Das Modell des Experten B kann als Interpretation für die Verbindungen dienen, die auf die Motordrehzahl zeigen (Frage 72:  $M = 5,6$ ,  $SD = 6,8$ , Frage 73:  $M = 5,6$ ,  $SD = 6,8$ , Frage 74:  $M = 5,2$ ,  $SD = 5,7$ ). Die Pfeile von Geschwindigkeitseinhaltung, Beschleunigung und Verzögerung erhielten somit eine schwache positive Einschätzung der Experten. Dies entspricht dem Modell des Experten B. Der Fahrer beeinflusst indirekt die Motordrehzahl, indem er die Dimensionen Geschwindigkeitseinhaltung, Beschleunigung und Verzögerung auf der zweiten Ebene beeinflusst. Der Einfluss ist jedoch nicht so stark, wie die Verbindung mit der Dimension Gangschaltung.

Der Pfeil von der Gangschaltung zur Motordrehzahl ist eindeutig (Frage 71:  $M = 7,0$ ,  $SD = 0,0$ ). Die Motordrehzahl ist stark vom gewählten Gang abhängig und somit kongruent mit der Anordnung von B, die Gangschaltung und Motordrehzahl auf dem gleichen Niveau festzulegen.

Daher wird die Gangschaltung auf dem gleichen Niveau wie die Motordrehzahl angesiedelt.

Anhand der Frage 70 wurde gemessen, inwieweit die Verbindung vom antizipativen Fahren in Richtung der Dimension Motordrehzahl als sinnvoll erachtet werden kann ( $M = 4,4$ ,  $SD = 9,8$ ). Die Zuordnung wurde nicht eindeutig bestätigt, so dass das Modell des Experten B die Entscheidung des Fahrers berücksichtigt. Antizipatives Fahren beeinflusst wiederum die Motordrehzahl.

Experte E sieht die Dimensionen Geschwindigkeitseinhaltung, Beschleunigung und Verzögerung als eine erste Gruppe. Während die Motordrehzahl und Gangschaltung eine zweite Gruppe bilden. Experte E sieht die zweite Gruppe als messbare Dimensionen an. Hingegen würde er die Dimension antizipatives Fahren als nicht-messbar erfassen. Diese Dimension führt der Experte E auf das Fahrverhalten zurück und sieht sie nicht als „Key Performance Metrik“ an wie den Winkel des Gaspedals, während die Dimensionen Geschwindigkeitseinhaltung, Beschleunigung und Verzögerung als Fahrereingaben gesehen werden.

Die Motordrehzahl und Gangschaltung werden dem Motor zugeordnet und sind für den Experten E unmittelbar abhängig vom Motor selbst und mittelbar abhängig von den Fahrereingaben. Die aktiv beeinflussbaren Faktoren des Fahrers sind, nach Experten E, Beschleunigung, Verzögerung und Lenkung. Sie können direkt mit Key-Performance-Metriken gemessen werden.

Die Meinung vom Experten E bestätigt die Auffassungen vom Experten B über die fahrer-gesteuerten Dimensionen Geschwindigkeitseinhaltung, Beschleunigung und Verzögerung. Experte E gliedert die Dimensionen in die gleichen drei Teile wie Experte B. In Abbildung 25 ist die Einteilung von Experten E visualisiert.

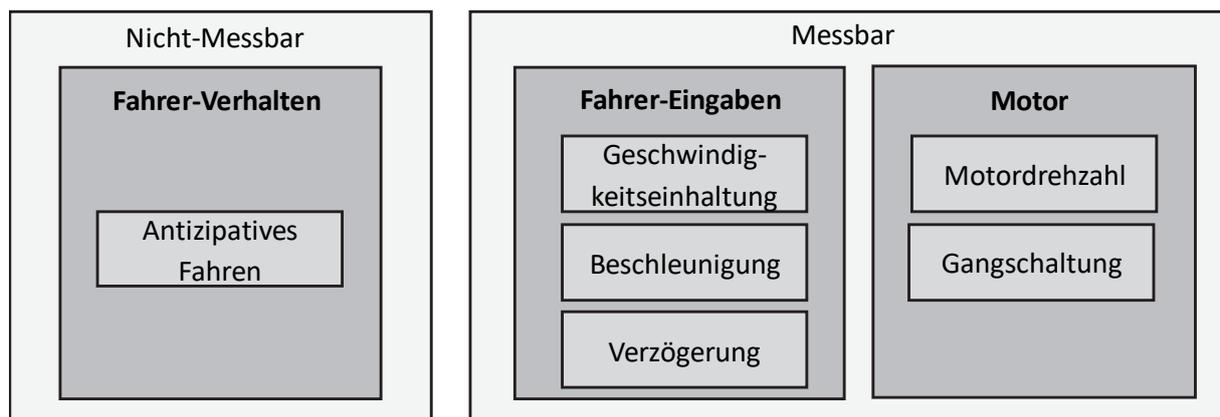


Abbildung 25: Gruppierung der Dimensionen nach Einschätzung von Experten E  
Quelle: Eigene Darstellung

Die Meinung, dass die Dimension Gangschaltung einer anderen Ebene als Geschwindigkeitseinhaltung, Beschleunigung sowie Verzögerung zuzuordnen ist, kann erklären, dass die Anordnung von Gangschaltung, Geschwindigkeitseinhaltung, Beschleunigung und Verzögerung im Modell unterschiedlich bewertet wird (Frage 77:  $M = 5,25$ ,  $SD = 5,58$ ).

Die Messung der Dimension Motordrehzahl wird in der Praxis in den Anzeigen neben der aktuellen Geschwindigkeit als Standard verwendet und ist in der Literatur umfassend untersucht worden (Beusen et al. 2009; Andrieu/Saint Pierre 2014; Dogan et al. 2011). Jedoch ist in der Literatur eine optimale Motordrehzahl nicht einheitlich definiert (s. Abschnitt 5.4.6).

Es lässt sich festhalten, dass die Experten die Dimension Motordrehzahl nicht als Kontrollvariable sehen. Nach den Interviews könnte die Dimensionen zu einer Beeinflussungskette bestehend aus drei Ebenen: (1) Fahrverhalten mit der Dimension antizipatives Fahren, (2) fahrerabhängig mit den Dimensionen Geschwindigkeitseinhaltung, Verzögerung und Beschleunigung sowie (3) fahrerabhängig mit den Dimensionen Motordrehzahl und Gangschaltung, zusammengestellt werden.

### 5.7.3.2.3 Gangschaltung

Die Dimension **Gangschaltung** hat einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Motordrehzahl. Für Experte E sind das Messen von Gangschaltvorgängen und Motordrehzahl das Gleiche und er betrachtet die Dimension als redundant. Hingegen geben mehrere Autoren einen Zusammenhang zwischen optimalem Drehzahlbereich für das Hochschalten und den Gang an

(Andrieu/Saint Pierre 2014; Barkenbus 2010; Beusen et al. 2009). Trotzdem würde keiner der Experten auf die Dimension Motordrehzahl oder auf die Dimension Gangschaltung im Messmodell verzichten. Experte B erwähnt, dass die Gangschaltung nur ein qualitativer Indikator für den Energieverbrauch und keine quantitative Messgröße sei. Somit ist es nicht möglich, den Energieverbrauch direkt unter Berücksichtigung des gewählten Getriebes zu messen. Bei der Verbindung zwischen den Dimensionen Gangschaltung und Motordrehzahl handelt es sich daher um eine starke Verbindung.

Die Dimension Gangschaltung wird mit der durchschnittlichen Motordrehzahl gemessen (Andrieu/Saint Pierre 2014; Beusen et al. 2009; Dogan et al. 2011). Der optimale Gang der Dimension Gangschaltung für das Eco-Driving erfordert spezifische Berechnungen für einzelne Getriebe und Fahrzeugeigenschaften (Ngo et al. 2013; Yang et al. 2002). Für jedes Fahrzeug und jedes Getriebe kann der optimale Schaltpunkt des Getriebes berechnet werden. Ein Maß für einen optimalen Gang für die Messung des Konstruktes energiebewusstes Fahren ist möglich. Jede Abweichung vom Optimum verursacht zusätzlichen Energieverbrauch.

Die Dimension Gangschaltung wird im Messmodell beibehalten. Die Motordrehzahl ist vom gewählten Gang abhängig, wodurch die Aufzeichnung des Ganges möglicherweise überflüssig ist. Nach den Interviews hat der Gang einen Einfluss auf das Konstrukt energiebewusstes Fahren. Der ausgewählte Gang alleine stellt keine ausreichende Messgröße dar. Die Messmethoden der beiden Dimensionen unterscheiden sich grundlegend. Die Motordrehzahl wird in RPM gemessen, während die Wahl des Ganges von einer bestimmten Motordrehzahl abhängt und nur als eine Zahl oder ein Buchstabe wiedergegeben wird. Bei Fahrzeugen mit Automatikgetriebe ist ausgeschlossen, dass Gangwechsel übersprungen werden können. Bei Fahrzeugen mit manueller Gangschaltung sollte das Überspringen von Gängen berücksichtigt werden.

#### **5.7.3.2.4 Beschleunigung**

Der Name der Dimension **Beschleunigung** wird als irreführend angesehen. Das allgemeine Verständnis der Experten von Beschleunigung ist eine zunehmende Geschwindigkeit (Urbom 2000, 8). Die Definition der Dimension Beschleunigung steht im Widerspruch zur Definition der Komponente konstant. Unter der Komponente konstant wird ein Drücken des Gaspedals verstanden, bei dem die Geschwindigkeit des Fahrzeuges gleich bleibt, während die Definition der Komponente nicht-konstant als Synonym für die Beschleunigungsphase steht und dem Verständnis der Experten hinsichtlich der Dimension Beschleunigung entspricht. Die missverständliche Benennung könnte der Grund sein, dass die meisten Experten die Dimension nicht Beschleunigung nennen würden.

Eine Umsetzung des Vorschlags von Experte C, die Dimension Beschleunigung in starke und schwache Beschleunigung zu unterscheiden, ist vergleichbar mit den unterschiedlichen Pedalwinkeln im Beitrag von Jamson et al. (2015a). Im Messmodell sind die Pedalwinkel jedoch bereits mit den Komponenten konstant und nicht-konstant im weitesten Sinne abgedeckt. Im engeren Sinne sind beide Teile des Experten C zur Komponente nicht-konstant hinzuzufügen. Allerdings werden die Formeln von Jamson et al. (2015a) für die Bestimmung der Komponente herangezogen. Somit ist der Vorschlag hinreichend berücksichtigt.

Die Dimension Beschleunigung wird im Modell über die Beschleunigungsrate gemessen. Die konkrete Messgröße für die Dimension Beschleunigung ist damit der Winkel des Gaspedals.

Die häufigste Variante für die Bereitstellung von Echtzeit-Feedback wird mit dem Winkel des Gaspedals gemessen (Azzi et al. 2011; Beusen et al. 2009; Dogan et al. 2011; Ford Motor Company 2016; Jamson et al. 2015a; Wada et al. 2011). Diese Messgröße kommt in der Theorie und Praxis zum Einsatz. So bieten zahlreiche Automobilhersteller dem Fahrer Echtzeit-Informationen über die optimale Beschleunigung unter Berücksichtigung des Winkels des Fahrpedals an (Ford Motor Company 2016; Harumoto et al. 2011; Inbar et al. 2011; Motonaga/Saito 2012).

Die Aufteilung der Dimension Beschleunigung in die Komponenten konstant und nicht-konstant wird nicht mehr vorgenommen. Anstelle dessen wird nur die Beschleunigung selbst betrachtet. Die Idee des Fahrens mit konstanter Geschwindigkeit wird in die Dimension Geschwindigkeitseinhaltung übernommen.

### 5.7.3.2.5 Verzögerung

Die Aufteilung der Dimension **Verzögerung** in die Komponenten aktiv und passiv wird beibehalten, da die Experten im Hinblick auf Frage 44 ( $M = 1,0$ ,  $SD = 0,0$ ) der Aufteilung zustimmen. Die aktive Verzögerung wird von den Experten bestätigt. Nach den Experten ist eine passive Verzögerung gegeben, wenn das Gaspedal nicht betätigt wird. Beim Nicht-Betätigen des Bremspedals wirkt die Motorbremse/regeneratives Bremsen oder der Roll- und Luftwiderstand zur Verzögerung. Passive Verzögerung ist ähnlich zu Kircher et al. (2014) somit in zwei Komponenten zu unterscheiden: Leerlauf und Motorbremse. Zum eindeutigeren Verständnis wird die passive Verzögerung in Motorbremse und Leerlauf aufgeteilt. In Abbildung 26 ist die Dimension Verzögerung illustriert.

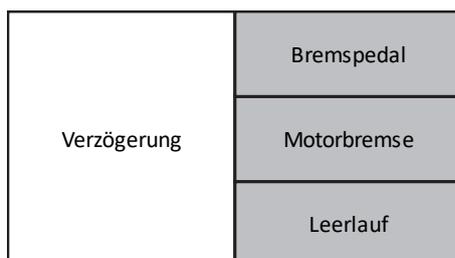


Abbildung 26: Überarbeitete Aufteilung der Dimension Verzögerung in Komponenten  
Quelle: Eigene Darstellung

Der Vorschlag von Experte B, die Rekuperation als dritte Komponente der Dimension Verzögerung hinzuzufügen, ist nicht sinnvoll, da sich das Messmodell neben Elektrofahrzeugen auf Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren konzentriert, die i. d. R. keine Rekuperation haben. Die Rekuperation kann bei der Anpassung des Messmodells an Elektroautos als zusätzliche Komponente aufgenommen werden. Für zukünftige Forschung mit Elektrofahrzeugen empfiehlt sich die Rekuperation als vierte Komponente, wie in Abbildung 27 aufgezeigt, hinzuzufügen.

Verzögerung	Bremspedal
	Motorbremse
	Leerlauf
	Rekuperation

Abbildung 27: Überarbeitete Aufteilung der Dimension Verzögerung in Komponenten mit Erweiterung für Elektrofahrzeuge  
Quelle: Eigene Darstellung

Die Bereitstellung von Echtzeit-Informationen für eine geeignete Verzögerung ist schwieriger als für eine geeignete Beschleunigung. Experte C weist darauf hin, dass das Bremsen oft der einzige Weg ist, einen Unfall zu vermeiden. Es gibt keine für Echtzeit-Feedback geeignete Messgröße für die Dimension Verzögerung (s. Abschnitt 5.4.5). Die Messung des Winkels des Bremspedals (Dogan et al. 2011) kann für die aktive Verzögerung verwendet werden. Sind die Winkel des Fahrpedals und des Bremspedals null, handelt es sich um eine passive Verzögerung. Wird zusätzlich zwischen Leerlauf und Nicht-Leerlauf (Motorbremse) unterschieden, ist das messbar. Ferner sind zusätzliche Informationen über die Umgebung, wie eine bevorstehende Ampel oder ein Verkehrshindernis, notwendig, um den Fahrer entsprechend Feedback geben zu können.

Die Experten stimmen mit der Aufteilung der Dimension Verzögerung in eine aktive und passive Komponente überein. Die passive Komponente wird weiter untergliedert in die Komponenten Motorbremsung und Leerlauf.

#### 5.7.3.2.6 Geschwindigkeitseinhaltung

Die Benennung der Dimension **Geschwindigkeitseinhaltung** war für die Experten irreführend. Der Begriff Geschwindigkeitseinhaltung beinhaltet nur eine Beschränkung der Reisegeschwindigkeit. Die Definition des Begriffs Geschwindigkeitseinhaltung, welcher im englischen als „speeding“ verwendet wird, ist „*the offence of driving faster than the legal limit*“ (Soanes/Hawker 2006, 1242). Der Begriff Geschwindigkeitseinhaltung lässt somit keine optimale Geschwindigkeit zu, welche nach Experten A eine Überschreitung der zulässigen Geschwindigkeit vorsehen kann. Der Vorschlag von Experte A ist die Umbenennung der Dimension in Geschwindigkeit. Diese würde den Fokus von der Einhaltung der gesetzlichen zulässigen Geschwindigkeit auf den absoluten Geschwindigkeitsgrad verschieben. Daraus würde eine Änderung der Messung der Dimension zur gegenwärtigen Geschwindigkeit resultieren. Die Messung des Energieverbrauchs erfolgt indirekt über die Geschwindigkeit. Grundsätzlich gilt: je höher die Geschwindigkeit, desto höher der Energieverbrauch. Wie bereits erwähnt, erklärt Experte A, dass Geschwindigkeitsüberschreitungen keinen Einfluss auf den Energieverbrauch hätten, die Höhe der absoluten Geschwindigkeit hingegen schon. Eine Umbenennung der Dimension Geschwindigkeitseinhaltung zu Geschwindigkeit ist sinnvoll.

Die Berücksichtigung der Geschwindigkeit ohne die Dimension Geschwindigkeitseinhaltung ermöglicht das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in die Dimension aufzunehmen, wie die

Experten A und C vorschlagen. Konstante Geschwindigkeit enthält den Begriff des „cruising“. Die Verschiebung des Fokus auf die Geschwindigkeit würde es ermöglichen, den Aspekt des Fahrens mit konstanter Geschwindigkeit mit dem Fahren in Stop-and-go-Weise zu vergleichen.

Der Vorschlag, eine zusätzliche Aufteilung in zu langsam, zu schnell und konstant fahrende Personen vorzunehmen, wie vom Experten D vorgeschlagen, könnte aufgenommen werden. In Abbildung 28 ist der Expertenvorschlag visualisiert.

Geschwindigkeit	Konstant
	Zu schnell
	Zu langsam

Abbildung 28: Expertenvorschlag zur Unterteilung der Geschwindigkeit  
Quelle: Eigene Darstellung

Die Dimension Geschwindigkeitseinhaltung wird im Allgemeinen über den Tachometer mit der Ist-Geschwindigkeit angezeigt (Kircher et al. 2014) oder von GPS-Sensoren (Beusen et al. 2009; Helmbrecht et al. 2014). Diese Messung der Dimension Geschwindigkeitseinhaltung ist seit Jahren unverändert und die Anzeige über den Tacho hat sich bewährt.

Um zu schnelles oder zu langsames Fahren zu messen, könnte die Differenz zwischen der aktuellen Geschwindigkeit und einer kraftstoffeffizienten Geschwindigkeit berechnet werden. Für eine energieeffiziente Geschwindigkeit kann die gesetzlich zulässige Geschwindigkeit (Andrieu/Saint Pierre 2014), 50-70 km/h (Ericsson 2001) oder 60-70 km/h (Hiraoka et al. 2009) herangezogen werden.

Es ist sinnvoll, die Dimension Geschwindigkeitseinhaltung in Geschwindigkeit umzubenennen und den Fokus auf die Geschwindigkeitsmessung zu setzen, anstatt auf die Einhaltung der gesetzlich zulässigen Geschwindigkeit. Um die verschiedenen Aspekte der Geschwindigkeit, mit konstanter Geschwindigkeit, zu schnelles und zu langsames Fahren, aufzunehmen, könnten diese als Komponenten der Dimension aufgenommen werden. Der Vorschlag erfordert allerdings eine Validierung und ist nicht im verfeinerten Messmodell enthalten. Die Messung der Geschwindigkeit ist sowohl in der Theorie als auch in der Praxis erforscht und etabliert. Jedoch ist die Definition einer konkreten Messgröße für eine gleichmäßige Fahrgeschwindigkeit, für zu langsames oder zu schnelles Fahren nicht vorhanden.

#### 5.7.3.2.7 Empfehlungen für zusätzliche Dimensionen

Die Experten betrachten die sechs Dimensionen als relevante Einflussfaktoren für das Konstrukt energiebewusstes Fahren (Frage 15-20) und stimmen mit der Unterscheidung in sechs Dimensionen im Messmodell überein (Frage 35-38). Zusätzlich empfehlen die Experten neun Messgrößen.

Experte B empfiehlt (i) eine Verbrauchskarte, welche den Energieverbrauch als eine Funktion der Motordrehzahl und Motorlast berechnet. Jedoch ist die Verbrauchskarte ein zusätzliches Feedback, das nicht teil des Messmodells für energiebewusstes Fahren wäre und hier nicht weiter verfolgt wird.

Experte C schlägt vor, das Modell um (ii) die Querb beschleunigung zu erweitern. Sie hängt mit der Routenwahl zusammen und gehört nicht zur primären Fahraufgabe. Deshalb wird der Vorschlag hier nicht weiter betrachtet.

Die Empfehlung von Experte D, die Beschleunigung im Sinne von (iii) unterhalb der gesetzlich zulässigen Geschwindigkeit als zusätzliche Dimension aufzunehmen, erscheint logisch. Jedoch ist es sinnvoller, die neue Dimension Geschwindigkeit hinzuzufügen, um die Aspekte des Fahrens unter- und oberhalb der zulässigen Geschwindigkeit sowie das Wählen eines höheren Ganges berücksichtigen zu können.

Des Weiteren wird vorgeschlagen, (iv) Hilfsfunktionen einzuführen, um tertiäre Verbraucher wie die Klimaanlage zu berücksichtigen. Es ist bekannt, dass durch sie zusätzlicher Energieverbrauch verursacht wird, welcher als konstanter Nebenverbrauch bezeichnet wird (Neumann et al. 2015; Sivak/Schoettle 2012). Es hängt nicht mit der primären Fahraufgabe zusammen und ist nicht Teil der Untersuchung.

Der Vorschlag von Experte D, (v) Fahren mit konstanter Geschwindigkeit im Sinne des Fahrens im neutralen Gang und nicht-gedrückter Pedale zu definieren, erscheint sinnvoll. Der Aspekt ist nicht auf dem gleichen Niveau wie die anderen sechs Dimension anzusetzen, sondern als eine Ergänzung der Komponente passiv der Dimension Verzögerung zu betrachten.

Experte E schlägt vor, den (vi) Fahrzeugtyp zu berücksichtigen, z. B. ist der Unterschied der verbrauchten Energie bei kleinen Elektroautos gegenüber großen Autos mit Verbrennungsmotor signifikant und spiegelt das Energiebewusstsein des Fahrers wider. Der Typ des Fahrzeugs hat keinen Einfluss auf die primäre Fahraufgabe, weshalb er nicht im Messmodell enthalten ist. Darüber hinaus soll das Modell ein allgemeines theoretisches Messmodell für energiebewusstes Fahren darstellen, das auf verschiedene Fahrzeugtypen angewendet werden kann.

Experte E schlägt vor, (vii) die Existenz von Personenkraftwagen und die persönliche Beziehung zu ihnen als Messgröße für energiebewusstes Fahren hinzuzuziehen. Jedoch ist diese Abhängigkeit situationsbedingt. Situationsbedingte Einflüsse werden hier als Moderator des energiebewusstes Fahrens berücksichtigt.

Der Vorschlag von Experte A, (viii) reibungsloses Fahren mit konstanter Geschwindigkeit zu berücksichtigen, erscheint sinnvoll. Jedoch ist der Aspekt nicht auf dem gleichen Niveau wie die bereits bestehenden sechs Dimensionen zu sehen, sondern als eine Ergänzung zur neuen Dimension Geschwindigkeit zu betrachten.

Außerdem schlägt Experte A vor, (ix) Start-Stopp-Strategien als einen Aspekt der Dimension Geschwindigkeit zu übernehmen. Wie bereits diskutiert kann der Vorschlag direkt in die Dimension übernommen werden, so dass keine weitere Ergänzung des Messmodells notwendig ist.

Experte E schlägt vor die Dimensionen Beschleunigung und Verzögerung in eine Dimension Beschleunigung zusammenzuführen, welche sowohl positive als auch negative Beschleunigung enthält. Die Unterscheidung der Dimensionen wird jedoch als notwendig erachtet, weil sich die Auswirkungen der Komponenten im Wesentlichen voneinander unterscheiden.

Dem Messmodell ist weder eine zusätzliche Dimension hinzuzufügen, noch sollten Dimensionen weggelassen werden. Hingegen sind die Aspekte der Komponenten in den einzelnen Dimensionen anzupassen.

### **5.7.3.3 Sonstige Anmerkungen zur Validierung des Messmodells**

Bei dem Modell können Missverständnisse bezüglich der Einflussfaktoren und den konkreten Messgrößen entstehen. Experte B merkt an, dass die Verbindungen auf den Energieverbrauch hinweisen, jedoch die Quellen der Verbindung Indikatoren oder indirekte Messgrößen für den Energieverbrauch seien und somit gerichtet sind. Ihr Einfluss und ihre Eigenschaft, Indikatoren zu sein, ist unzweifelhaft, da die Fragen des Pre-Fragebogens über den Einfluss der Dimensionen auf das energiebewusste Fahren (Fragen 15-20) hohe Zustimmungen der Experten erhielten. Da hier ein Messmodell für energiebewusstes Fahren aufgestellt wird, ist die Bedeutung der Verbindung neu zu definieren. Die Verbindungen symbolisieren, dass es möglich ist, das energiebewusste Fahren durch die Dimension, d. h. den Einflussfaktor zu messen, welcher beispielsweise durch eine konkrete Messgröße herangezogen wird. Eine Verbindung ist eine Verbindung zwischen den Dimensionen, welche über den Pfeil die Einflussrichtung der Verbindung angibt. Nicht die Verbindung verfügt über Eigenschaften, sondern die Dimension selbst. Beispielsweise besitzt die Dimension Geschwindigkeit die Eigenschaft eine Strecke pro Zeiteinheit abzubilden. Die Eigenschaft wirkt sich auf die Dimension des energiebewussten Fahrens aus und wird durch die Verbindung verdeutlicht.

Die Vorschläge, das Messmodell um das Fahrerwissen (Experte A) und die Persönlichkeit des Fahrers (Experte B) zu erweitern, sind für das Messmodell nicht sinnvoll, da die Einflussfaktoren nicht mit der primären Fahraufgabe zusammenhängen.

### **5.7.4 Synthese der Anregungen zu einem validierten Messmodell**

Nachdem die einzelnen Anregungen der Experten diskutiert wurden, kann mit der Synthese der Anregungen und den Erkenntnissen aus der Literaturrecherche begonnen werden. Das ursprüngliche Messmodell wird mit den diskutierten Verbesserungen in einer weiteren Iteration geschärft.

Zur Beantwortung der Forschungsfrage 1.1 sind sechs beeinflussende Dimensionen für energiebewusstes Fahren identifiziert worden, die durch das menschliche Verhalten verändert wer-

den können: antizipatives Fahren, Gangschaltung, Geschwindigkeitseinhaltung, Beschleunigung, Verzögerung und Motordrehzahl. Darüber hinaus sind Messgrößen für die Dimensionen identifiziert worden und die Forschungsfrage 1.2 wurde beantwortet.

Die Ergebnisse der Forschungsfragen 1.1 und 1.2 sind in Tabelle 12 zusammengefasst. Die Anmerkung „keine Angabe“ bedeutet, dass in der Literatur keine präzisen Echtzeit-Messgrößen vorhanden sind.

Beeinflussende Dimension	Art	Messgröße
<b>Beschleunigung</b>	Dimension	Winkel des Gaspedals
<b>Verzögerung</b>	Dimension	Siehe Komponenten der Dimension Verzögerung
<b>Verzögerung: Aktiv - Bremspedal</b>	Komponente	Winkel des Bremspedals
<b>Verzögerung: Passiv - Motorbremse</b>	Komponente	k. A.
<b>Verzögerung: Passiv - Leerlauf</b>	Komponente	k. A.
<b>Motordrehzahl</b>	Dimension	RPM auf dem Motordrehzahlmesser
<b>Gangschaltung</b>	Dimension	Eingelegter/Ausgewählter Gang
<b>Geschwindigkeit</b>	Dimension	Aktuelle Geschwindigkeit in Strecke pro Zeitraum auf dem Tachometer i. d. R. km/h in Europa
<b>Geschwindigkeit: Konstant/gleichmäßig</b>	Komponente	k. A.
<b>Geschwindigkeit: Zu langsam</b>	Komponente	k. A.
<b>Geschwindigkeit: Zu schnell</b>	Komponente	k. A.
<b>Antizipatives Fahren</b>	Dimension	k. A.

Tabelle 12: Energiebewusstes Fahren beeinflussende Dimensionen und Messgrößen  
Quelle: Eigene Darstellung, k. A. = keine Angabe

Ferner werden die Abhängigkeiten der Dimensionen untereinander identifiziert und somit die Forschungsfrage 1.3 beantwortet.

Die Motordrehzahl ist mit der Gangschaltung verbunden. Die Dimensionen können einen nicht optimalen Energieverbrauch verursachen, wie beim Fahren mit hoher Drehzahl.

Geschwindigkeitseinhaltung, Beschleunigung und Verzögerung können zusammen gruppiert werden, weil der Fahrer die Dimensionen direkt steuert. Im Gegensatz zum ursprünglichen Modell (vgl. Unterkapitel 5.5 Abbildung 22) besteht die Dimension Beschleunigung nur aus der Beschleunigungsphase, in der durch ein zu stark gedrücktes Gaspedal ein notwendiger (optimaler) und zusätzlicher, nicht notwendiger Energieverbrauch entsteht. Die Unterteilung der Verzögerung ist nach der Auswertung dreigeteilt in Motorbremsung, Leerlauf und (aktives) Abbremsen. Der durch aktive Verzögerung verursachte Energieverbrauch könnte durch eine rechtzeitige Bremsung durch den Motor (Motorbremsung) vermieden werden. Aktives Bremsen beeinflusst den Energieverlust. Die passive Verzögerung (Leerlauf oder Motorbremse) hat nur Einfluss auf den Energieverbrauch selbst. Der Einfluss des Leerlaufs auf den Energieverbrauch wird nur übernommen. Die ursprüngliche Dimension Geschwindigkeitseinhaltung wird in Geschwindigkeit umbenannt und beeinflusst den Energieverbrauch.

Die Literaturrecherche ergab, dass antizipatives Fahren die verbleibenden fünf Dimensionen sowie den Energieverbrauch und den Energieverlust beeinflusst.

Bezüglich der Forschungsfrage 1.4 gibt es nicht eine einzige energiebewusste Fahrmaßnahme, wie die Literaturübersicht zeigt. Stattdessen erklären die sechs Dimensionen antizipatives Fahren, Geschwindigkeitseinhaltung, Gangschalten, Beschleunigung, Verzögerung und Motordrehzahl das Konstrukt energiebewusstes Fahren. Die Ergebnisse der Forschungsfragen 1.1 bis 1.3 sind in dem Messmodell für energiebewusstes Fahren synthetisiert.

Die Experteninterviews belegen, dass die Motordrehzahl keine geeignete Regelgröße ist, sondern auf der gleichen Ebene wie die verbleibenden vier Dimensionen anzuordnen ist. Selbst wenn das antizipative Fahrverhalten alle anderen Dimensionen beeinflusst, ist die Messung vage und spiegelt mehr das Verhalten als die Eingaben des Fahrers wider. Daher wird die Dimension des antizipativen Fahrens weggelassen.

Schließlich wird das Konstrukt energiebewusstes Fahren von fünf Dimensionen erklärt und in Energieverbrauch und Energieverlust unterteilt. In Abbildung 29 sind die Untersuchungsergebnisse zusammengefasst.

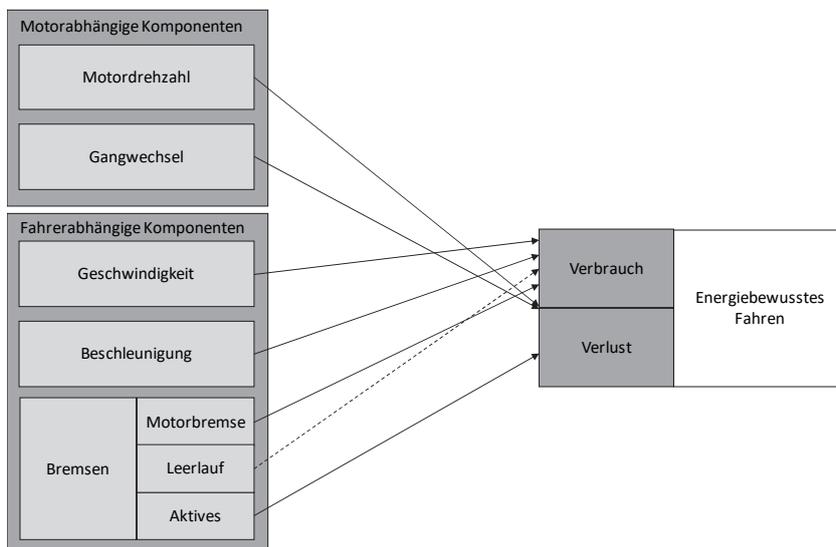


Abbildung 29: Messmodell nach Validierung durch Experten  
Quelle: Eigene Darstellung

### 5.7.5 Zusammenstellung des validierten Messmodells

Die fünf Dimensionen werden in einem Messmodell für das Eco-Driving synthetisiert. Die Dimensionen lassen sich in zwei Kategorien unterscheiden: fahrerabhängige und motorabhängige. Die **fahrerabhängige** Kategorie enthält die Dimensionen Geschwindigkeit, Beschleunigung, Verzögerung und Gangschaltung, welche der Fahrer während der Fahrt aktiv beeinflussen kann. Allerdings ist der Umfang der Entscheidungen des Fahrers durch die Umwelt begrenzt. Die Entscheidung für die absolute Geschwindigkeit oder fürs Bremsen hängt i. d. R. nicht nur vom Fahrer ab, sondern auch von Faktoren wie Verkehrsdichte, Wetterbedingungen oder Geschwindigkeitsbegrenzungen. Die **motorabhängige** Kategorie enthält die Dimensionen Motordrehzahl und Gangschaltung; beide hängen vom jeweiligen Motor des Fahrzeugs ab. Der Fahrer kann die Dimensionen nur indirekt durch die Wahl der fahrerabhängigen Dimensionen beeinflussen.

Eine Sonderrolle stellt die Gangschaltung dar. Die Gangschaltung wird als fahrer- und motorabhängige Kategorie betrachtet, weil der Fahrer den gewählten Gang direkt steuern kann, aber seine Entscheidung wird durch die Motordrehzahl bestimmt, um Schäden am Motor zu vermeiden. Hingegen ist bei einem Automatikgetriebe keine Abhängigkeit auf die Wahl des Gangs durch den Fahrer gegeben.

Neben den fahrerabhängigen Komponenten Geschwindigkeit, Beschleunigung, Verzögerung und Gangschaltung, die mit der primären Fahraufgabe zusammenhängen, kann der Fahrer den Energieverbrauch durch weitere Komponenten beeinflussen, die nicht mit der primären Fahraufgabe zusammenhängen. Diese Dimension liegt jedoch außerhalb des gewählten Forschungsschwerpunktes dieser Arbeit.

Alle identifizierten Dimensionen der Kategorien sind der Fahraufgabe unmittelbar zuzuordnen und beeinflussen den Energieverbrauch. Die Abweichungen der Ist- und Optimalwerte der fünf Dimensionen können als Proxys für Eco-Driving verwendet werden. Es ermöglicht eine Analyse der Qualität des Eco-Drivings. Die Eco-Driving-Qualität steigt, je niedriger die Differenz zwischen den Werten ist. Die Differenz kann zusätzlich für die Messung des Energieverbrauchs als Gesamtmaßstab für das Eco-Driving angewendet werden.

## 5.8 Zusammenfassung

Es wurde ein Messmodell für das energiebewusste Fahren entwickelt, welches zunächst sechs Dimensionen – Geschwindigkeit, Gangschaltung, Beschleunigung, Verzögerung, Motordrehzahl und antizipatives Fahren – zur Messung des Konstrukts energiebewusstes Fahren enthielt und dann auf fünf reduziert wurde, da die Messung der Dimension antizipatives Fahren nicht möglich und daher im Modell nicht enthalten ist. In Abbildung 30 ist das validierte Messmodell zur Verdeutlichung der Zusammenhänge dargestellt.

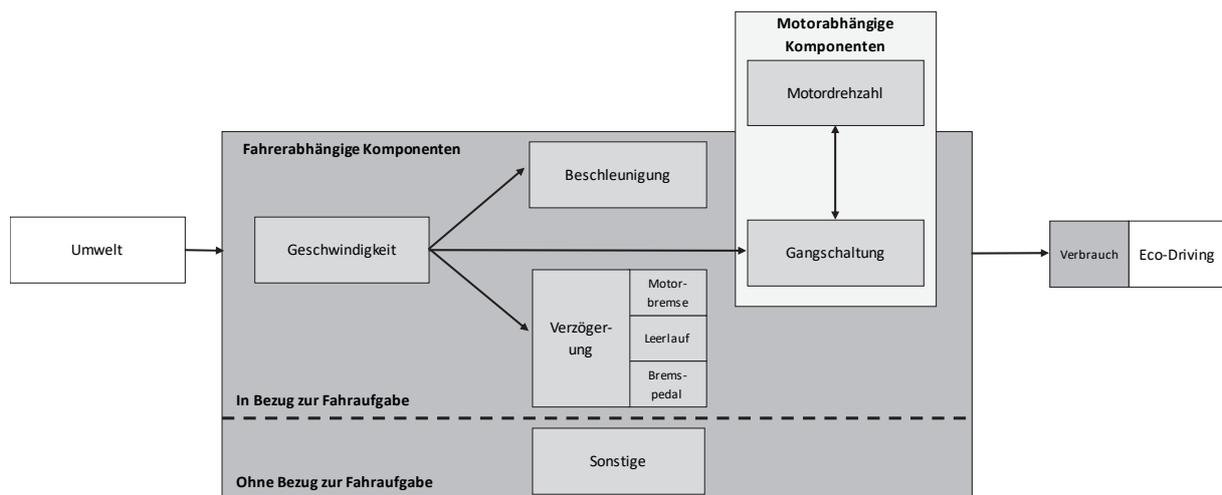


Abbildung 30: Validiertes Messmodell  
Quelle: In Anlehnung an Gottlieb/Böhm (2018)

Ähnlich ist es bei der Dimension Motordrehzahl, welche verschiedene „optimale“ Werte ergab. Diese sind auf die Abhängigkeit von Motordrehzahl und Umwelteinflüssen zurückzuführen. Die Motordrehzahl kann jedoch bei einem bestimmten Fahrzeug konkret gemessen werden und

wird im Messmodell beibehalten. Die Anordnung der Dimension Motordrehzahl als abhängige Komponente vom Motor ist bisher nur in den Interviews vorgekommen und auf einen Experten zurückzuführen. Es bedarf somit weiterer Forschung um diese Art der Anordnung zu validieren.

Das vorgestellte Messmodell ist auf Messgrößen beschränkt, die durch menschliches Verhalten beeinflusst werden können und fokussiert auf die primäre Fahraufgabe. Sekundäre oder tertiäre Fahraufgaben, die einen Einfluss auf den Energieverbrauch haben, wie die Nutzung von Klimaanlage, Radio oder Multimedia, bedürfen einer genaueren Untersuchung in einer weiteren Forschungsarbeit. Nicht näher betrachtet wurden nicht-menschliche Einflussfaktoren wie Luftwiderstandskoeffizient oder Reifendruck.

Das Messmodell wurde mittels Experteninterviews validiert. Allerdings ist die Stichprobengröße ( $N = 5$ ) klein. Vier von fünf Experten sind deutscher Staatsbürgerschaft und arbeiten an renommierten deutschen Universitäten in den Bereichen Automobil- und Transportforschung.

Das Kapitel 5 trägt mit einem synthetisierten und validierten Messmodell zur Theorie bei. Das Modell veranschaulicht die Zusammenhänge und Abhängigkeiten zwischen den sechs Dimensionen des Konstrukts energiebewusstes Fahren. Die Arbeit erweitert die wirtschaftsinformatische Forschung auf dem Gebiet der Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI), genauer gesagt der Gestaltung des Eco-Feedbacks. Eco-Feedback-Experimente können mit zusätzlichen und präziseren Dimensionen erweitert werden. Die Ergebnisse können auch für die Bewertung der verschiedenen Designs von Eco-Feedback und Eco-Driving verwendet werden. Mit diesem Modell können Praktiker spezifischere Eco-Feedback-Systeme für eine verbesserte Benutzerleistung und -erfahrung implementieren.

Nachdem ein Modell zur Messung des energiebewussten Fahrens entwickelt worden ist, kann im nächsten Schritt mit der Vorbereitung der Experimente im Fahrsimulator begonnen werden. Zur Durchführung des Fahrsimulatorexperimentes wird ein Erhebungsinstrument benötigt, welches die Messung des Energiebewusstseins der Probanden ermöglicht. Dieses wird in Kapitel 6 entwickelt und validiert.

Ferner müssen zwei Szenarien ausgewählt werden, welche dazu geeignet sind, die Probanden in motivierte und nicht-motivierte Gruppen zu trennen. Des Weiteren ist die Umsetzbarkeit im Fahrsimulator zu prüfen. Es wird in Abschnitt 7.1 untersucht, inwieweit das entwickelte Messmodell für energiebewusstes Fahren im Fahrsimulator umgesetzt werden kann.

In Abschnitt 7.2 wird untersucht, inwieweit eine Messung des Energieverbrauchs im Fahrsimulator möglich ist und welche Anforderungen an die Fahrsimulationssoftware zur Messung des Energieverbrauchs zu stellen sind.

Zusätzlich ist eine Fahrszene zu entwickeln und zu validieren, welche die Messung des Energieverbrauchs in realitätsnahen Szenarien ermöglicht, was in Kapitel 8 vorgenommen wird. Einer Fahrszene werden dabei eine oder mehrere Fahrsituationen zugeordnet.

## 6 Erhebungsinstrument zur Messung des Energiebewusstseins

In den letzten Jahrzehnten hat sich die Psychologie eingehend mit Motivationsforschung beschäftigt (Maslow 1943, 1970; Amabile et al. 1994; Barbuto 2001a, 2005; Barbuto et al. 2010; Deci 1975, 1971, 1972b; Deci/Ryan 1985b). Die Motivationsforschung wird in verschiedenen Forschungsbereichen verwendet, unter anderem in der Wirtschaftsinformatik (Ajzen 1991; Fishbein/Ajzen 2010; Gottlieb et al. 2016). Es wurden unterschiedliche Erhebungsinstrumente zur Messung der Motivation im Allgemeinen entwickelt und angewendet (Bandura/Cervone 1986; Barbuto/Scholl 1998; Pelletier et al. 1997; Touré-Tillery/Fishbach 2014; Deci et al. 1994; Deci/Ryan 1985b). Keines dieser Erhebungsinstrumente ist konkret auf Energiebewusstsein und Energieverbrauch als Eco-Feedback ausgerichtet. Eco-Feedback wird mit Informationssystemen aufbereitet, die hier als Energiefeedbacksysteme bezeichnet werden und sich auf den Kontext Fahren und Fahrzeuge beziehen.

Aus den Studien von Fogg ist bekannt, dass ein Energiefeedbacksystem als Informationstechnologie menschliches Verhalten beeinflussen können (Fogg 2009c, 2009b, 2009a, 2002; Fogg/Nass 1997; Moraveji et al. 2011). Diese Arbeit konzentriert sich auf den Schritt, die Motivation zur Benutzung von Energiefeedbacksystemen in Fahrzeugen mit einem Erhebungsinstrument zu messen. Das Energiebewusstsein und die intrinsische und/oder extrinsische Motivation zur Verwendung des Energiefeedbacksystems werden gemessen.

Das Erhebungsinstrument ist für die Betrachtung der Forschungsfragen 2 und 3 notwendig, um motivierte von nicht-motivierten Benutzern unterscheiden zu können. Ferner ist näher zu definieren, was unter einem motivierten und einem nicht-motivierten Benutzer zu verstehen ist.

### 6.1 Methodisches Vorgehen

Das Vorgehen ist in drei Schritte unterteilt: (1) Literaturrecherche, um ein tiefergehendes Verständnis von bereits vorhandenen Methoden und Einflussfaktoren zur Messung von Motivation zu gewinnen, (2) Erstellung eines Erhebungsinstrumentes und (3) die Validierung des Erhebungsinstrumentes. Die Validierung erfolgt explorativ für eine Analyse der generellen Eignung des Modells.

Die Literaturrecherche schafft einen Überblick über die Einflussfaktoren und Methoden, die zur Messung von Motivation herangezogen werden können. Die Literaturrecherche folgt in Anlehnung an Cooper (1988), Webster/Watson (2002) sowie vom Brocke et al. (2009). Es werden die Datenbanken *Google Scholar*, *Google Books*, *EBSCOhost* und *ScienceDirect* verwendet. Um die Vielzahl von Treffern bei Google Scholar einschränken zu können, wird die Suche auf die ersten 200 Treffer begrenzt. Die gefundenen Beiträge werden in der Reihenfolge (1) Titel und (2) Abstrakt auf Relevanz geprüft. Die verwendeten Schlüsselwörter sind *motiv\**, *intrinsic\**, *extrinsic\**, *car\**, *influence\**, *energy\**, *behavior\** und *predict\**. Das Schlüsselwort *car\** ist zusätzlich aufgeführt, um insbesondere Motivationstheorien aufzufinden, die im Kontext dieser Arbeit stehen.

Die Top Ten der gelisteten Psychologie Journale werden mithilfe des Journal Citation Reports (University of Massachusetts Amherst 2015), SCImago Journal & Country Rank (SCImago 2013) und Reuters Bericht über den Impaktfaktor von Psychologie Journalen (Reuters 2013) ausgewählt. Die zu berücksichtigenden Journale sind: *Trends in Cognitive Sciences (TiCS)*, *Annual Review of Psychology (ARoP)*, *Psychological Bulletin (PB)*, *Personality and Social Psychology Review (PSR)*, *Annual Review of Clinical Psychology (ARoCP)*, *Psychological Review (PReW)*, *Personnel Psychology (PP)*, *Neuroscience and Biobehavioral Reviews (NBR)*, *Journal of Applied Psychology (JAP)* und *Journal of Personality and Social Psychology (JPSP)*. Darüber hinaus sind weitere Journale identifiziert worden, welche für die Domäne relevant sind: *Journal of Abnormal and Social Psychology (JASP)*, *Psychological Reports (PRep)*, *Harvard Business Review (HBR)*, *Organizational Behavior and Human Performance (OBHP)*, *Contemporary Educational Psychology (CEP)*, *European Journal of Social Psychology (EJSP)*, *Academy of Management Review (AMR)* und *MIS Quarterly (MISQ)*.

Für die Definition des Suchraumes wird die bekannte Taxonomie nach Cooper (1988) herangezogen. Der (1) **Fokus** soll den Stand der Forschung näher untersuchen. Das (2) **Ziel** ist es, zentrale Herausforderungen für diese Forschung zu identifizieren. In Anlehnung an Cooper (1988) wird ein integrierender Ansatz gewählt, welcher sich in die bekannten drei Schritte, welche im Unterabschnitt 2.1.1 vorgestellt wurden, gliedert. Zusätzlich sollen zentrale Herausforderungen identifiziert werden, um auf mögliche Schwierigkeiten bei der Erstellung des Erhebungsinstrumentes eingehen zu können. Die (3) **Perspektive** der Forschungsarbeit wird als neutrale Repräsentation gewählt. Der (4) **Umfang** soll sowohl die aktuellen, hochrangigen Journale aus dem Bereich der Informationssysteme als auch aus der Psychologie abbilden. Der Umfang ist als umfassend mit ausgewählter Zitierung in der Taxonomie einzuordnen. Der (5) **Aufbau** ist als historisch anzusehen, weil die Thematik der Motivationsforschung auf den Erkenntnissen der Psychologie basiert. Die (6) **Zielgruppe** sind spezielle und allgemeine Wissenschaftler sowie die Allgemeinheit. Der Überblick über die Literatur aus der Psychologie wird für die Wirtschaftsinformatik aufbereitet. In Tabelle 13 ist die Einordnung der Literatursuche nach Cooper (1988) aufgezeigt.

Ausprägung	Kategorie			
(1) Fokus	Forschungsergebnisse	Forschungsmethoden	Theorien	Praxis/Anwendungen
(2) Ziel	integrierend		kritisierend	identifizierend von zentralen Herausforderungen
(3) Perspektive	neutrale Repräsentation		positionsbeziehend	
(4) Umfang	vollumfassend	umfassend mit ausgewählter Zitierung	repräsentativ	zentral/entscheidend
(5) Aufbau	historisch	konzeptuell		methodologisch
(6) Zielgruppe	spezielle Wissenschaftler	allgemeine Wissenschaftler	Praktiker/ Entscheidungsträger	Allgemeinheit

Tabelle 13: Taxonomie der Literaturrecherche – Erhebungsinstrument  
Quelle: In Anlehnung an Cooper (1988)

Mit dem Aufkommen der Instinkttheorie von James (1890) gewann die Motivationsforschung an Bedeutung. Literatur wird deshalb ab dem Erscheinungsjahr 1890 gesucht.

Die Instinkttheorien werden im Einzelnen im Unterabschnitt 6.2.1.1 untersucht. Das Untersuchungsergebnis ist eine Liste von Beiträgen zum Thema Motivation. Tabelle 14 zeigt die verwendeten Beiträge, Zeitschriften, Journale der Literatursuche und den abgedeckten Zeitraum, welcher teilweise durch die Restriktionen seitens der Datenbankprovider bedingt ist.

Journal	Suchwörter	Datenbank	Suchfelder	Abdeckung
Trends in Cognitive Sciences*	intrinsic, intrinsically, extrinsic, extrinsically, motivation, motivating, nonmotivated, non-motivated, motivational, intention, predict, predicted, predicting, energy, energization, behavior, behave, car, vehicle, influence, influenced, influencing	Science Direct	a. F.	Ab 1997
Annual Review of Psychology*		EBSCOhost (Business Source Premier)	a. F.	1950 bis 2005
Psychological Bulletin*		EBSCOhost	a. F.	Ab 1904
Personality and Social Psychology Review*		EBSCOhost (Business Source Premier)	a. F.	1977 bis 2006
Personnel Psychology*		EBSCOhost (Business Source Premier)	a. F.	1965 bis 2014
Neuroscience and Biobehavioral Reviews*		Science Direct	a. F.	Ab 1995
Journal of Applied Psychology*		EBSCOhost (PsycArticles)	a. F.	Ab 1917
Journal of Personality and Social Psychology*		EBSCOhost (PsycArticles)	a. F.	Ab 1965
Annual Review of Clinical Psychology*		Annual Reviews	a. F.	Ab 2005
Psychological Review*		EBSCOhost (PsycArticles)	a. F.	Ab 1894
American Psychologist*		EBSCOhost (PsycArticles)	a. F.	Ab 1946
Journal of Comparative Neurology and Psychology		Wiley Online Library	a. F.	1891 bis 2005
Journal of Abnormal and Social Psychology		EBSCOhost (PsycArticles)	a. F.	Ab 1906
Harvard Business Review		EBSCOhost (Business Source Premier)	a. F.	Ab 1922
Organizational Behavior and Human Performance		Science Direct	a. F.	1966 bis 1984
Academic Press		Science Direct	a. F.	k. E.
Psychological Reports		AmSci	a. F.	1955 bis 1975
European Journal of Social Psychology		Wiley Online Library	a. F.	1971 bis 2005
Contemporary Educational Psychology		Science Direct	a. F.	Ab 1976
Academy of Management Review		EBSCOhost (Business Source Premier)	a. F.	Ab 1976
MIS Quarterly	EBSCOhost (Business Source Premier)	a. F.	Ab 1977	

Tabelle 14: Details der Literatursuche – Erhebungsinstrument

Quelle: Eigene Darstellung, k. E. = keine Einschränkung, a. F. = alle Felder/“all fields“, \* TOP Journale Psychologie

Zunächst sind die Einflussfaktoren zur Messung der Motivation (motivationale Einflussfaktoren) für ein allgemeines Verständnis aus der Literatur abzuleiten.

Motivationale Einflussfaktoren werden in intrinsische und extrinsische Faktoren unterschieden. Die Literaturrecherche zu motivationalen Einflussfaktoren enthält die Aufarbeitung von 200 Journalen, 45 Büchern, sechs Konferenzen und 26 Webseiten. Die durchschnittliche Relevanz der geprüften Werke gemessen an der subjektiven Eignung, welche mittels einer Skala zwischen 0 (nicht relevant) bis 5 (sehr relevant) ermittelt wurde, ergab einen Wert von 3,98. Die Einteilung in der Skala erfolgte anhand der Vorkommen der Schlüsselwörter in Titel, Abstrakt und Text. Bei Abdeckung aller Bereiche erhielt die Publikation den Wert Fünf. Es kann vorkommen, dass beispielsweise beim Wort *energy* ein Treffer erzielt wurde, die Quelle aber keinerlei Relevanz aufgrund der Thematik hatte, dann wurde diese Publikation mit dem Wert Null belegt und aussortiert.

Aus den motivationalen Einflussfaktoren und dem Wissen über die Messung von Motivation wird ein Erhebungsinstrument entwickelt. Als Erhebungsinstrument ist eine Umfrage mit einem Fragebogen. Denkbar sind auch andere Messmethoden, welche in Abschnitt 6.4 betrachtet werden. Die als relevant ermittelte Literatur wird in ein einem ersten Erhebungsinstrument zusammengefasst und mit alltäglichen Fragen zum Energiebewusstsein validiert.

## 6.2 Motivationale Einflussfaktoren

Motivationsforschung kann im Kern in zwei Bereiche aufgeteilt werden: Inhaltstheorien und Prozesstheorien. Während die Inhaltstheorien die Bedürfnisse des Menschen und deren Veränderungen im Laufe der Zeit erforschen, beschäftigen sich die Prozesstheorien mit der Entstehung der Motivation. Die Theorien basieren auf dem inzwischen verworfenen instinktiven Denkansatz (James 1890; McDougall 1908), der Triebreduktions- und Anreiztheorie (Woodworth 1917; Hull 1943; Watson 1913; Skinner 1938) sowie der Erregungstheorie (Harlow 1953a; Hebb 1955; Zuckerman 1979).

### 6.2.1 Motivationstheorien im Vergleich

Basierend auf der Theorie von Maslow (1943) zur Motivation des Menschen<sup>4</sup> fasst McClelland (1961) diese als Streben nach Macht, Leistung und Zugehörigkeit zusammen. Zusätzlich sieht Alderfer (1969) die Grundbedürfnisse des Menschen in dem Bestreben nach einer sicheren Existenz, einer stabilen Beziehung und der Möglichkeit sich sowohl beruflich als auch persönlich weiterzuentwickeln. Deci/Ryan (1985b) bekunden in ihrer Selbstbestimmungstheorie, dass das Gefühl kompetent zu sein und autonom zu handeln maßgeblich an der Motivation des menschlichen Handelns beteiligt ist. Das Gefühl sozialer Einbindung ist ein wichtiger Faktor, um die Motivationsstärke zu steuern (Deci/Ryan 1985b).

Die Literatursuche unterscheidet bis auf wenige Ausnahmen zwischen intrinsischer und extrinsischer Motivation.

Maslow (1954, 81) beschreibt die intrinsische Motivation als „physiologische Bedürfnisse“ und Alderfer (1969, 145) als „Existenz-Bedürfnisse“. Andere Psychologen wie Kohlberg und Bandura beschrieben intrinsische Motivation als „Moral“ (Kohlberg 1973, 79), „Selbstbewertung“ (Bandura 1986, 28), „Selbstregulierung der Motivation“ (Bandura 1986, 28) oder „persönliche Standards“ (Bandura 1999, 33).

Während des zwanzigsten Jahrhunderts wurden mehrere Motivationstheorien entwickelt. Jede der Theorien erklärt nur bestimmte Aspekte der Motivation. Die Ideen und Konzepte wurden in neuere Theorien integriert (Fiske 2008). Einige bekannte Modelle wie das Technologie-Akzeptanz-Modell aus der Wirtschaftsinformatik basieren auf Motivationstheorien und werden bis heute genutzt und weiterentwickelt.

#### 6.2.1.1 Instinkttheorien

In den frühen 1900er Jahren wurde versucht unter Berücksichtigung der Evolutionstheorie von Darwin (Darwin 1859) Verhaltensweisen mit Instinkten zu erklären. Unter Instinkten sind angeborene, typische feste Verhaltensmuster als Reaktion auf bestimmte Reize zu verstehen (Wehmeier/Hornby 2017). Die Motivation und das Verhalten werden durch evolutionsbedingte Instinkte gesteuert.

James (1890) und McDougall (1908) haben versucht für ein vollumfassendes Verständnis alle Instinkte, die menschliches Verhalten steuern, aufzulisten (Myers 2014). Eine so große Anzahl

---

<sup>4</sup> Siehe Abschnitt 2.2.3 für eine detaillierte Betrachtung

an Instinkten wie der Mensch besitzt kein anderes Säugetier (James 1890). Beispielhaft seien einige ausgewählte Instinkte als Einflussfaktoren auf das Verhalten genannt: Bindung, Angst, Ekel, Gier, Wut, Liebe und Schüchternheit (James 1890).

Neben den Instinkten nennt James (1890) Emotionen und Gewohnheiten als weitere Faktoren. **Gewohnheiten** sind neutral (James 1890). Sind Gewohnheiten im menschlichen Verhalten etabliert, ist es schwierig, sie zu verändern. **Emotion** ist eine „objektgerichtete, unwillkürlich ausgelöste affektive Reaktion, die mit zeitlich befristeten Veränderungen des Erlebens und Verhaltens“ (Rothermund/Eder 2011, 166) einhergeht. Emotionen sind nicht die Konsequenzen der gelebten Erfahrungen, sondern ihre Ursache.

James (1890) diskutiert Lust und Schmerz als *Quelle des Handelns*. Er betont, dass Schmerz ein *extremer Verzögerer* und Vergnügen ein *extremer Verstärker* ist (Elliot/Covington 2001, 75). Elliot/Covington (2001) definieren Motivation als Verhalten, das von einem positiven/wünschenswerten Ereignis oder einer Möglichkeit „initiiert oder geleitet“ wird (Elliot/Covington 2001, 74). Demgegenüber steht die Theorie der Vermeidungsmotivation, bei der das Verhalten durch ein negatives/nicht erwünschtes Ereignis oder seine Möglichkeit „initiiert oder geleitet wird“ (Elliot/Covington 2001, 74).

Freud (1915) entwickelte Theorien, welche im Gegensatz zu den Studien von James (1890) und McDougall (1908) über bewusste Erfahrungen auf die Aufdeckung von Verhaltensweisen, die unbekannt Gründe hatten und somit der Bewusstseinswahrnehmung der Person selbst unbekannt sind, basieren. Freud (1915) nimmt an, dass Menschen wie Tiere kontinuierlich nach Lust suchen und Schmerzen vermeiden. Seine Theorien sehen Energie als Grund der Motivation an. Die Denkweise von Freud wurde später als psychodynamischer Ansatz bezeichnet (Hockenbury/Hockenbury 2010). Freuds Arbeit ist somit ein Übergang vom biologischen Ansatz zur psychodynamischen Perspektive. Freuds Theorie wird den Instinkttheorien zugeordnet.

#### 6.2.1.2 *Triebreduktionstheorie*

Woodworth (1917) führte die Theorie über Triebe und Mechanismen ein. Die Erkenntnisse der Triebreduktionstheorie sind auf Richter (1927) zurückzuführen (Heckhausen 2009).

Die Triebreduktionstheorie, Triebtheorie oder Anreiztheorie (Heckhausen 2009) besagt, dass das Verhalten durch biologische Anreize („Triebe“) motiviert wird, um die Homöostase zu bewahren. Homöostase bedeutet, dass der Körper den internen Status überwacht und pflegt und Spannungen auftreten, wenn die Bedürfnisse nicht ausreichend erfüllt sind (Heckhausen 2009). Folglich ist Homöostase eine optimale intrinsische Balance der Bedürfnisse (Heckhausen 2009). Ein Trieb zur Wiederherstellung des Gleichgewichts wird ausgelöst, wenn ein Ungleichgewicht von homöostatischen Mechanismen vom menschlichen Individuum erkannt wird (Heckhausen 2009). Ein Trieb, auch als Anreiz bezeichnet (Heckhausen 2009), stellt die Motivation dar, das Gleichgewicht der Bedürfnisse wiederherzustellen, wie zum Beispiel Hunger und Durst zu stillen (Heckhausen 2009).

Verhaltensweisen sind durch physiologische Triebe motiviert (Hull 1943). Intrinsisch motivierte Tätigkeiten haben eine Verringerung der Spannungen zur Folge. Wenn eine Aktion einen

Trieb reduziert, wird das Verhalten wiederholt, wenn der gleiche Bedarfszustand wieder eintritt (Hockenbury/Hockenbury 2010).

Wird die Triebtheorie auf Benutzer von Energieverbrauchsfeedbacksystemen im Fahrzeug angewendet, kann eine gesunde Umwelt als biologisches Bedürfnis angesehen werden und folglich kann die Verwendung eines Energieverbrauchsfeedbacksystems, das zu einem proaktiven, effizienten und umweltfreundlichen Fahrverhalten führt, erklärt werden.

Die Verstärkungstheorie („*Reinforcement Theory*“) von Skinner (1953) besagt, dass externe Anreize, welche positiv oder negativ sein können, ein Verhalten verstärken oder vermindern (Skinner 1953). Die Theorie der Verstärkung von Skinner (1953) umfasst einen Operanten und einen verstärkenden oder aversiven Stimulus, als Folge des Handelns. Eine **positive Verstärkung** ist beispielsweise eine energieeffiziente Fahrweise durch schnelles Hochschalten (Operant) durch einen monetären Anreiz (Stimulus) wie einen Rabatt beim nächsten Tanken zu verstärken. Eine **negative Verstärkung** bedeutet beispielsweise eine nicht-energieeffiziente Fahrweise, die durch Fahren in einem zu niedrigen Gang (Operant) hervorgerufen wird, durch einen Anreiz (Stimulus) wie ein lautes Motorengeräusch zu beeinflussen. Sowohl die positive als auch die negative Verstärkung beeinflussen das Verhalten und erzeugen eine energieeffizientere Fahrweise.

Skinner (1953) unterscheidet zwischen primären und sekundären Verstärkungsreizen. Der **primäre** oder natürliche Verstärker unterscheidet sich von Spezies zu Spezies und muss vor der eigentlichen Verstärkung nicht erlebt werden. Nahrung, Wasser oder sexuelle Kontakte sind Verstärker für Tiere und Menschen (Hockenbury/Hockenbury 2010). Im Gegensatz dazu ist der **sekundäre** oder konditionierte Verstärker ein Reiz, der für die Grundbedürfnisse wesentlich ist. Das Beispiel für einen sekundären Verstärker ist Geld als monetärer Anreiz (Stern 1992).

Anders als bei negativen und positiven Verstärkungen, die die Wahrscheinlichkeit eines Verhaltens in der Zukunft erhöhen, erzeugt die Bestrafung einen entgegengesetzten Effekt, welcher sich in einer verminderten Wahrscheinlichkeit eines sich wiederholenden Verhaltens zeigt. Wesentlich bei der Bestrafung ist im Gegensatz zur negativen Verstärkung, dass eine Vergünstigung weggenommen wird (Skinner 1971, 65).

Skinner (1953) identifizierte zwei Arten von Bestrafungen: positive und negative. Bestrafung durch Anwendung oder **positive Bestrafung** beinhaltet eine Antwort, die von der Darstellung eines aversiven Stimulus gefolgt wird. Dies bedeutet, dass zu den eigentlichen Aufgaben weitere Aufgaben hinzukommen. Eine positive Bestrafung wäre beispielsweise, dass bei einer nicht-energieeffizienten Fahrweise (Operant) das Getriebe irreparabel beschädigt wird und wegen der nicht-energieeffizienten Fahrweise die Garantie verfällt. Bestrafung durch Entfernung oder **negative Bestrafung** impliziert den Rückzug eines Verstärkungsreizes nach einem Verhalten. Die Bestrafung wird durch die Wirkung bestimmt, die sie produziert (Skinner 1971, 65). Eine negative Bestrafung wäre beispielsweise, dass aufgrund der nicht-energieeffizienten Fahrweise ein Strafmandat wegen zu schnellen Fahrens ausgestellt wird (Operant) und zusätzlich das Fahrzeug weggenommen werden würde (Verlust des Stimulus der Verstärkung, hier eigenes Fahrzeug).

Die Triebreduktionstheorie kann unterschiedliche „Geben“- und „Nehmen“-Motivationen des menschlichen Verhaltens erklären (Hockenbury/Hockenbury 2010, 321). Für die Anwendung der Theorien auf die Benutzung von Energieverbrauchsfeedbacksystemen im Fahrzeug bedeutet dies, dass je nach spezifischer Situation ein Verhalten durch ein Energieverbrauchsfeedbacksystem nicht vollständig erklärt werden kann. Beispielhaft sei der Fall gegeben: Am Morgen ist der Nutzer eines Energieverbrauchsfeedbacksystems motiviert energieeffizient zu fahren und tut dieses entsprechend. Jedoch ist die gleiche Person mittags nicht motiviert energieeffizient zu fahren. Die Gründe können unterschiedlich sein, zum Beispiel schnell nach Hause zu wollen und dafür eine nicht energieeffiziente Fahrweise bewusst in Kauf zu nehmen.

### **6.2.1.3 Erregungstheorie**

Harlow (1953a) zeigte, dass Rhesusaffen Stunden damit verbringen können, ein kompliziertes Schloss zu öffnen, auch wenn es keinen Anreiz oder eine Belohnung gibt (Harlow 1953a, 1953b; Butler/Harlow 1954). Mehrere Experimente bewiesen das Bedürfnis etwas zu tun und sich zu beschäftigen (Butler/Harlow 1954).

Hebb (1955) formulierte die Erregungstheorie und schloss, dass die Menschen motiviert sind, ein optimales Erregungsniveau zu bewahren, das weder zu hoch noch zu niedrig ist. Das optimale Erregungsniveau kann nicht als ein einfaches Konstrukt definiert werden, da es sich von Person zu Person, von Situation zu Situation und von Zeit zu Zeit unterscheidet (Hockenbury/Hockenbury 2010, 321).

Die Erregungstheorie – auch als *Arousal Theory* bezeichnet – besagt, dass Menschen getrieben sind, ein optimales Maß an physiologischer Erregung zu erhalten (Zuckerman 1979). Wenn das Erregungsniveau, auch als Erregungsstufe bezeichnet, unter eine individuelle Schwelle sinkt, wird dem Menschen langweilig und der Drang zur Erhöhung des Erregungsniveaus steigt (Zuckerman 1979; Hebb 1955).

Zuckerman (1979) zeigte, dass sogenannte Sensationssucher ein völlig anderes optimales Erregungsniveau haben als „normale“ Menschen. Sensationssucher gehen höhere Risiken ein, wie das Fahren mit überhöhter Geschwindigkeit ohne offensichtlichen Grund (Zuckerman 1979, 2007).

Yerkes/Dodson (1908) stellten fest, dass ein erhöhtes Erregungsniveau die Leistung eines Individuums verbessert, während ein zu hohes Erregungsniveau die Leistung beeinträchtigt. Es wird somit teilweise ein höheres Erregungsniveau benötigt, um ein Verhalten zu beenden oder eine Aktion zu beginnen (Yerkes/Dodson 1908). Bei einer für das Individuum trivialen Aufgabe ist das Erregungsniveau niedrig. Eine übertriebene Erregung kann die Leistung sowohl in positiver als auch in negativer Weise beeinflussen und hängt vom individuellen Selbst ab (Yerkes/Dodson 1908).

Nach Prüfung der Erregungstheorie ist eine eindeutige Identifizierung von Einflussfaktoren nicht möglich. Die Faktoren unterscheiden sich von Situation zu Situation, Person zu Person und Zeit zu Zeit. Dennoch beeinflusst die Erregung eines Individuums die Motivation. Um die Motivation der Benutzer von Energieverbrauchsfeedbacksystemen zu messen, ist es wichtig zu

wissen, dass es einige Variablen wie die Erregung gibt, die nicht direkt gemessen werden können, aber einflussreiche Faktoren sind. Folglich verbleibt eine unbekannte und bisher nicht messbare Größe, welche einen Einfluss haben könnte.

#### 6.2.1.4 *Inhaltstheorien*

Ende 1950 wurde erkannt, dass psychologische und kognitive Faktoren eine große Bedeutung für die Motivation haben (Sheldon 2008). Die Arbeit von Sheldon (2008) basiert auf den Inhaltstheorien und fokussiert sich auf die Beziehung zwischen der Person als Individuum und seinen Zielen oder Motiven. Die Inhaltstheorien behandeln die Fragen, *was* menschliche Bedürfnisse sind und *warum* sich diese im Verlauf der Zeit ändern.

Ausgehend von der Arbeitsmotivation versuchen Inhaltstheorien zu erklären, welche Motivatoren es gibt und wie diese beeinflusst oder verwendet werden können, um die Bedürfnisse eines Mitarbeiters zu verstehen (Becker o. J.,-b). Trotz der Tatsache, dass sie meist im Arbeitsumfeld eingesetzt werden, sind sie auch die Basis für weitere Untersuchungen zur Motivation bei Lernprozessen in anderen Bereichen. Ein Lernprozess ist das Eco-Driving.

Humanistische Theorien untersuchen die Persönlichkeit, die auf dem Potenzial des Individuums für eine gesunde persönliche Entwicklung basiert (Myers 2014). Die bekanntesten Psychologen des humanistischen Ansatzes sind Rogers und Maslow (Maslow 1970; Rogers 1951, 1961; Maslow 1943). Sie versuchen herauszufinden, was menschliche Bedürfnisse sind und wie sie mit Motivation korrelieren. Die Konzepte von Rogers (1951) und Maslow (1943) gehören zu den Inhaltstheorien. Die Inhaltstheorien gehen im Wesentlichen auf die folgenden Theorien zurück (o. A. o. J.,; Müsseler 2011; Becker o. J.,-a, o. J.,-b; Rothermund/Eder 2011, 89-164):

- Maslowsche Bedürfnispyramide (*Hierarchy of Needs*) (Maslow 1943),
- Herzbergs *Zwei-Faktoren-Theorie der Motivation* (Herzberg et al. 1959) und McGregor's *Theorie X und Y* (McGregor 1960),
- *Theory of Big Three* (McClelland 1961),
- Theorie von Existenz (Existence), Beziehung (Relatedness) und Wachstum (Growth) als *ERG-Theorie* bezeichnet von Alderfer (1969),
- *Self-Determination Theory* (SDT) (Deci et al. 1989; Deci/Ryan 1985a; Deci/Ryan 1985b) und
- Hockenbury/Hockenbury (2010).

Die **Bedürfnispyramide** besteht aus fünf hierarchischen Klassen, die sich von den grundlegenden bis zu den hochkomplexen Bedürfnissen gliedern (Maslow 1943):

1. Physiologie,
2. Sicherheit,
3. Zugehörigkeit und Liebe,
4. Wertschätzung sowie
5. Selbstverwirklichung.

Rogers (1951) und Maslow (1943) betrachteten menschliche Bedürfnisse als die treibende Energie eines Menschen. Die Menschen streben demnach nach positivem Selbstverständnis und

persönlichem Potenzial. Und die Menschen sind motiviert ihre Bedürfnisse auf jeder Klasse der Hierarchie zu befriedigen (Maslow 1943). Sobald niedrigere Bedürfnisse erfüllt sind, streben die Menschen nach höheren Bedürfnissen (Maslow 1943). Nach der Theorie von Maslow ist das Hauptziel eines Individuums, die Selbstverwirklichung zu erreichen, was er später als die volle Nutzung und Ausbeutung von Talenten, Fähigkeiten, Möglichkeiten usw. bezeichnet. Somit leisten die Menschen das, was sie maximal in der Lage sind zu tun, sprich sie geben das „Beste“ (Maslow 1954, 150). Trotz der Tatsache, dass das maslowsche Konzept der Selbstverwirklichung schwer zu überprüfen ist, kann die Abhängigkeit der Klassen die Frage beantworten, warum Anwender von Energieverbrauchsfeedbacksystemen entweder den Regeln und Empfehlungen folgen oder nicht. Infolgedessen ist die Selbstverwirklichungstheorie zu berücksichtigen, wenn versucht wird die Motivation der Benutzer von Energieverbrauchsfeedbacksystemen im Fahrzeug zu messen.

Rogers beschreibt die Selbstverwirklichung als *Tendenz und Streben den erlebenden Organismus zu verwirklichen, zu erhalten und zu stärken* (Rogers 1961). Selbstverwirklichung ist erst möglich, wenn eine Person alle Ziele, Begierden oder Wünsche erreicht hat (Rogers 1961). Ein weiterer Ansatz der Selbstverwirklichung ist die *ERG-Theorie* (Alderfer 1969).

Sowohl Herzbergs **Zwei-Faktor-Theorie** als auch McGregors **Theorie X und Y** untersuchen die Arbeits- und Managementpsychologie (Herzberg et al. 1959; McGregor 1960). Die Zwei-Faktor-Theorie beschreibt die Vorstellung, dass zwei Faktoren am Arbeitsplatz zur Arbeitszufriedenheit führen (Herzberg et al. 1959). Der *erste Faktor* besteht aus Hygienefaktoren (dissatisfier), die als extrinsische Motivationsfaktoren definiert werden können. Diese stehen im Zusammenhang mit der Arbeitsumgebung und gehen über die Dimension der Art der Arbeit selbst hinaus. Hygienefaktoren können kurzfristig die Arbeitsmotivation erhöhen und sind beispielsweise durch Unternehmenspolitik, fachliche Kompetenz des Vorgesetzten, Beziehung zu Vorgesetzten, Kollegen und Mitarbeitern, Arbeitsbedingungen und Gehalt beeinflusst (Gawel 1997; Herzberg et al. 1959). Einzelpersonen werden nicht wesentlich motiviert, wenn die Hygienefaktoren als ausreichend oder gut angesehen werden (Herzberg et al. 1959). Aber werden die Faktoren für Einzelpersonen nicht ausreichend erfüllt, so entsteht Unzufriedenheit. Die Unzufriedenheit wird durch externe Faktoren im Arbeitsumfeld hervorgerufen. Der *zweite Faktor* besteht aus Motivationsfaktoren, die zu langfristiger Zufriedenheit führen (Gawel 1997; Herzberg et al. 1959). Die Zufriedenheit wird dann intrinsisch motiviert, beispielsweise durch die Chance, eine höhere Position im Unternehmen zu erreichen, Verantwortungsgefühl, Kompetenz und Autonomie zu erringen. Herzberg et al. (1959) zufolge führt eine Erfüllung der intrinsischen Bedürfnisse zu einer positiven Arbeitsmotivation und Leistung.

Auf der Grundlage von Maslows Bedürfnispyramide ist die Theorie der Bedürfnisse entwickelt worden, welche als die **Theorie der großen drei Bedürfnisse** bekannt ist: gelernte, motivationale und erworbene Bedürfnisse (McClelland 1961). McClelland (1961) bekundet, dass alle Individuen drei motivierende Faktoren besitzen, unabhängig vom Geschlecht, Kultur oder Alter. Nach McClelland (1961) werden die drei Bedürfnisse gelernt und geprägt von der Lebenserfahrung. Dies ist der Grund, warum die Theorie auch Lerntheorie (*Learned Needs Theory*) genannt wird (McClelland 1961). Jeder Mensch hat seine eigenen Bedürfnisse: Leistungsmotiva-

tion (Need for Achievement); soziale Anschlussmotivation (Need for Affiliation) und Machtmotivation (Need for Power) (Müsseler 2011, 203ff; McClelland 1961). McClelland (1961) erklärt, dass ein Individuum einen oder mehrere dominante Faktoren als Motivatoren hat.

Die Anwendung der Bedürfnistheorie für die Messung der Motivation der Benutzung von Energieverbrauchsfeedbacksystemen ist grundsätzlich möglich, jedoch komplex, da die Theorie aus der Arbeitsmotivation stammt und zusätzlich sehr variabel ist. Ist eine Person motiviert energieeffizient zu fahren, braucht die Person eine Herausforderung durch eine erfüllbare Aufgabe.

Im Jahre 1985 entwickelten Deci und Ryan die **Selbstbestimmungstheorie** (*Self-Determination Theory*, kurz: SDT) und nahmen an, dass die Menschen nicht nur unterschiedliche Mengen, sondern auch verschiedene Arten von Motivation besitzen (Ryan/Deci 2000a, 54). Motivation variiert in der Ebene (Stärke der Motivation) sowie in der Orientierung (Art von Motivation). Die Orientierung beeinflusst die zugrunde liegenden Einstellungen und Ziele, die zum Handeln führen. Deci und Ryan unterscheiden zwischen intrinsischer sowie extrinsischer Motivation. Und sie untersuchten die Bedürfnisse, die ein Individuum hat, um Verhaltensweisen ohne „Verstärkung für ihre Erhaltung“ zu zeigen (Deci/Ryan 1985b, 5). Deci und Ryan (1985b) folgten der Definition der intrinsischen Motivation von White (1959), die das Tätigsein für die inhärenten Befriedigungen und nicht für die Konsequenzen (Ryan/Deci 2000a, 56) in den Vordergrund stellt. In der SDT unterscheiden Deci und Ryan zwischen verschiedenen Motivationsarten, die auf den unterschiedlichen Gründen oder Zielen eines Individuums beruhen (Ryan/Deci 2000a, 55). Sie bezeichnen die intrinsische Motivation als den Prototypen der autonomen Aktivität (Ryan/Deci 2000b). Eine autonome Leistung ist der mächtigste und effizienteste Weg, um ein Verhalten zu erreichen und zu pflegen (Ryan/Deci 2000b).

Ryan/Deci (2000b) identifizieren drei menschliche Bedürfnisse als starke Determinanten der intrinsischen und extrinsischen Motivation: Autonomie, Kompetenz und Verbundenheit/Beziehung. *Autonomie* steht für das Bedürfnis das eigene Verhalten und die Ziele selbst zu bestimmen, zu kontrollieren und zu organisieren, damit diese mit den eigenen Interessen und Werten übereinstimmen (Hockenbury/Hockenbury 2010). *Kompetenz* steht für das Bedürfnis nach Lernen und der Lösung anspruchsvoller Aufgaben (Hockenbury/Hockenbury 2010). *Verbundenheit* steht für das Bedürfnis, sich verbunden zu fühlen und ein Gefühl von Zugehörigkeit, Sicherheit und Intimität zu erleben (Hockenbury/Hockenbury 2010).

Die SDT teilt sich in zwei Untertheorien: *Cognitive Evaluation Theory* und *Organismic Integration Theory* (deutsch: organismische Integrationstheorie).

Die **Cognitive Evaluation Theory** setzt sich mit den Einflussfaktoren auf die intrinsische Motivation auseinander (Deci/Ryan 1985b). Um intrinsisch motiviert zu sein, muss ein Individuum in seinem Verhalten autonom sein (Ryan/Deci 2000b, 71). Es bedarf ein intrinsisches Interesse um für die Aktivität ein Gefühl der Kompetenz im eigenen Tun zu erhalten (Ryan/Deci 2000b, 71). Das Gefühl kompetent zu sein, wird nicht durch die intrinsische Motivation gegeben, sondern durch das Empfinden des Menschen, in seinem Verhalten autonom zu sein (Ryan/Deci 2000b, 71).

Extrinsische Belohnungen können dazu führen, dass die intrinsische Motivation in den Hintergrund rückt (Calder/Staw 1975a; Deci 1971; Deci/Cascio 1972; Kruglanski et al. 1972; Lepper et al. 1973; Notz 1975b). Es findet eine Verschiebung von der intrinsischen zur extrinsischen Motivation statt. Die intrinsische Motivation wird vermindert oder ist gar nicht mehr vorhanden. Je mehr Belohnungen ein Individuum für eine (intrinsisch motivierte) Aktivität erhält, desto mehr verliert das Individuum sein Interesse (Ryan/Deci 2000a, 59). Die Folge ist eine geringere Motivation für das Ziel (Ryan/Deci 2000a, 59). Dennoch wird das Verhalten in der Häufigkeit zunehmen, wenn auch mit einer verminderten Motivation, vorausgesetzt die Belohnung ist entsprechend gewählt (Skinner 1953). Im Allgemeinen verringern folgende Faktoren die intrinsische Motivation: greifbare Belohnungen, Bedrohungen, Fristen, Richtlinien, Druckausübungen und auferlegte Ziele (Ryan/Deci 2000a, 59).

Die **organismische Integrationstheorie** setzt sich mit den Einflussfaktoren auf die verschiedenen Formen der extrinsischen Motivation auseinander, um die Hemmnisse sowie Förderer der Internalisierung und Integration des Verhaltens zu verstehen (Ryan/Deci 2000b, 72). Die Internalisierung wird als Prozess der Einnahme eines Wertes oder einer Regulierung bezeichnet (Ryan/Deci 2000a, 60). Die Integration ist der Prozess, durch den die Individuen die Regulierung in ihre eigenen Werte umwandeln (Ryan/Deci 2000a, 60).

Ursprünglich wurde nur zwischen Motivation und Amotivation (keine Motivation) unterschieden (Bandura/Cervone 1986). Die Amotivation ist ein Zustand, der Menschen das Gefühl gibt keine Handlungsabsicht zu haben. Das Gegenteil ist die intrinsische Motivation, welche ein autonomes und selbstbestimmtes Handeln besitzt. Deci und Ryan kennen vier Arten von extrinsischer Motivation: externe Regulierung, introjezierte Regulierung, identifizierte Regulierung und integrierte Regulierung (Ryan/Deci 2000b).

- a) Die *externe Regulierung* ist ein Zustand und repräsentiert die am wenigsten autonome Form der extrinsischen Motivation (Ryan/Deci 2000b). Das Verhalten erfolgt nur um eine externe Nachfrage zu befriedigen (Ryan/Deci 2000b).
- b) Die *introjezierte Regulierung* bezeichnet die Motivation eine Tätigkeit auszuüben, um Schuldgefühle oder Angst zu vermeiden (Ryan/Deci 2000b, 72). Alternativ kann sie zu Ego-Verbesserungen oder zum Erlangen von Stolz genutzt werden (Ryan/Deci 2000b, 72). Die Regulierung wird in der Motivationsform der Orientierung kontrollierend zugeordnet (Ryan/Deci 2000b, 72).
- c) Die *identifizierte Regulierung* beschreibt die Übernahme von Regeln Dritter (Ryan/Deci 2000b, 72-73). Für Energieverbrauchsfeedbacksysteme wäre es beispielhaft ein Individuum zu veranlassen energieeffizient zu fahren, indem es den Mehrwert dieses Verhaltens erkennt.
- d) Die *integrierte Regulierung* ist die am meisten selbstbestimmte Regulierungsebene der extrinsischen Motivation und wird der autonomen Orientierung zugeordnet (Ryan/Deci 2000b, 72-73). Integration liegt vor, wenn eine identifizierte Regulierung vollständig dem Selbst des Individuums entspringt (Ryan/Deci 2000b, 72-73). Die Regeln folgen einer autonomen Orientierung und werden vom Individuum ausgewertet sowie in Übereinstimmung mit den Werten und Bedürfnissen Dritter gebracht (Ryan/Deci 2000b, 72-73). Je mehr die Gründe für ein Verhalten verinnerlicht werden und sich mit dem Ziel

identifiziert wird, desto mehr werden die extrinsisch motivierten Handlungen als autonomes Handeln angesehen (Ryan/Deci 2000b, 72-73). Trotz des integrierten Verhaltens und der Ähnlichkeiten mit intrinsischer Motivation (autonom und ohne Kontroll-Orientierung) wird es als extrinsisch angesehen, auch wenn es vom Willen und vom Wert selbst motiviert ist (Ryan/Deci 2000a, 62). Ein Verhalten kann an jedem Punkt der Skala angenommen werden. Es muss nicht in jeder Phase der Internalisierung vorkommen.

Die einzelnen Regulierungsebenen sind in Tabelle 15 zusammengefasst dargestellt.

Motivationsform	Amotivation		Extrinsische Motivation			Intrinsische Motivation
Regulationsebene	Keine Regulierung	Externe Regulierung	Introjierte Regulierung	Identifizierte Regulierung	Integrierte Regulierung	Intrinsische Regulierung
Orientierung	Unpersönlich	Kontroll-Orientierung			Autonomie-Orientierung	
Verhaltensqualität	Nicht-selbstbestimmt					Selbstbestimmt

Tabelle 15: Motivationsformen und Regulationsebenen der Theorie der organismischen Integration sowie die Orientierungen der Theorie der Kausalitätsorientierungen

Quelle: Vollmeyer/Brunstein (2005, 45)

Nach der *Goal Setting Theory* führt ein schwieriges Ziel zu einer erhöhten Handlungsbereitschaft (Locke 1968). Motivation und Leistung sind hoch, wenn Individuen spezifische Ziele setzen, die anspruchsvoll sind, unter der Bedingung, dass das Individuum kompetent genug ist, das Ziel zu erreichen und Feedback zur erbrachten Leistung gegeben wird (Locke 1968). Fogg (2009b) verwendet anstelle des Begriffs Kompetenz die Begrifflichkeit des Besitzens der Fähigkeit, eine Veränderung herbeiführen zu können. Die SDT und ihr Zusammenwirken mit der organismischen Integrationstheorie ist in Abbildung 31 dargestellt.

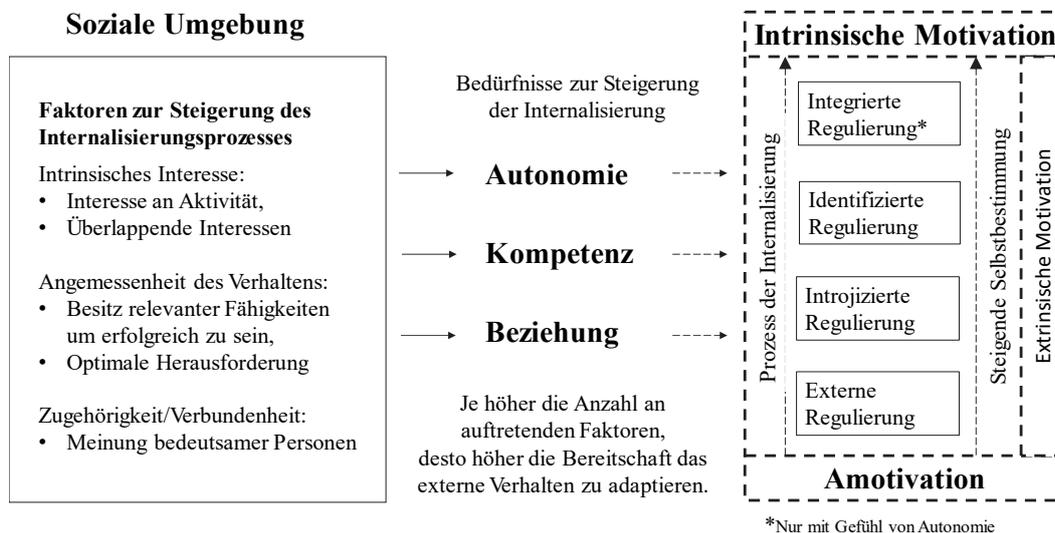


Abbildung 31: SDT und das Zusammenwirken mit der organismischen Integrationstheorie

Quelle: In Anlehnung an Deci/Ryan (1985b)

### 6.2.1.5 Prozesstheorien

Im Unterabschnitt 6.2.1.4 sind die Inhaltstheorien nähergehend untersucht worden. Diese beschäftigen sich mit der Frage *was* Motivation ist. Im Gegensatz dazu behandeln Prozesstheorien, den Ablauf der Motivation, d. h. die Frage *wie* Motivation auftritt.

Die *Equity Theory* (1963), auch als Theorie zum Gleichheitsprinzip der Gerechtigkeit bezeichnet (Adams/Rosenbaum 1962; Adams 1963), besagt, dass eine Person in einer Austauschbeziehung mit einer anderen Person steht, wenn diese die gleichen Bedenken über das Ergebnis („Output“) und die Eingaben („Input“) haben (Adams 1963). Eingaben („Input“) sind Umstände, die der Situation wie Intellekt, Anstrengung und Training hinzugefügt werden. Während Ergebnisse („Output“) alle Kompensationen sind, die eine Person bekommt, wie Zufriedenheit, Unabhängigkeit und Belohnungen (Adams 1963). Adams deutet daraus, dass allgemeine Gerechtigkeit der gewünschte Zustand eines jeden Menschen ist (Adams 1963). Mehrere Studien stützen die Theorie von Adams (Lawler 1968; Pritchard 1969; Goodman/Friedman 1971).

Die *Cognitive Evaluation Theory* von Deci/Ryan (1985b) und das Gleichheitsprinzip der Gerechtigkeit von Adams/Rosenbaum (1962) sind begrifflich und inhaltlich ähnlich (Deci 1972b). Die Cognitive Evaluation Theory erklärt den Effekt von externen Konsequenzen auf die intrinsische Motivation.

Die *Erwartungstheorie* (Expectancy Theory) von Vroom (1964) beschreibt die Dynamik der Motivation und beschäftigt sich mit der partizipativen Entscheidungsfindung.

Die Motivation, sich in einer bestimmten Weise zu verhalten, wird durch die Erwartung eines Individuums bestimmt, dass das Verhalten zu einem bestimmten Ergebnis (Erwartung) führen wird, multipliziert mit dem Glauben der Person, dass sie eine Belohnung erhalten wird (Instrumentalität), multipliziert mit dem Wert der Belohnung für die Person (Valenz). Daraus ergibt sich die Formel 6.1.

$$\text{Motivation} = \text{Erwartung} \times \text{Instrumentalität} \times \text{Valenz} \quad 6.1$$

Die Theorie korreliert mit dem Path-Goal-Ansatz von Mahoney/Jones (1957). Der Weg (Path) wird nur betrachtet, wenn ein gewünschtes Ziel (Goal) erreicht werden kann. Das menschliche Verhalten richtet sich nach der subjektiven Wahrscheinlichkeit (Vroom 1964).

Die Erwartungstheorie wurde für die Arbeitsmotivation entwickelt und validiert einen Teil des Motivationsprozesses, die Entscheidung für oder gegen eine Aktionsalternative. Porter und Lawler nutzten die Theorie von Vroom als Grundlage, um ein eigenes Erwartungsmodell zu entwickeln (Porter/Lawler 1968). Sie kategorisieren Vroom's Instrumentalität in intrinsischen und extrinsischen Belohnungen. Intrinsische Belohnungen sind positive Gefühle, wie Zufriedenheit oder Sinn für Leistung, und extrinsische Belohnungen kommen von außerhalb der Person, wie Zahlung oder Provision (Porter/Lawler 1968).

Die Zielsetzungstheorie (*Goal Setting Theory*) von Locke (1968) beschreibt das Verhältnis zwischen bewussten Zielen, Intentionen und Leistung. Es wurden drei Faktoren, die die Motivation beeinflussen, identifiziert. Diese sind: (1) hochgesteckte Ziele fördern ein höheres Leistungsniveau und tragen somit zu einem besseren Ergebnis bei als einfache Ziele (Locke 1968, 157), unabhängig davon, ob das Ziel von einem Individuum selbst festgelegt oder akzeptiert und in-

tegriert wird (Deci/Ryan 1985b). Locke (1968) stellte fest, dass (2) konkrete Ziele besser geeignet sind als nicht spezifizierte, um die Motivation zu erhöhen. Als letzter Faktor wird (3) die Verhaltensabsicht genannt (Locke 1968, 157), welche das Wahlverhalten beeinflusst (Mossholder 1980).

Die Selbstwirksamkeitstheorie (*Self-Efficacy Theory*, kurz: SET) von Bandura (1977), welche sich mit der Stärke des eigenen Glaubens an die eigene Fähigkeit und Aufgaben zu erfüllen sowie Ziele zu erreichen beschäftigt (Ormrod 2006).

Ziele und Vorgaben beeinflussen das Verhalten signifikant (Loock et al. 2013). Die Zielsetzung kann das Verbrauchsverhalten über die einmalige Entscheidung hinaus beeinflussen (Loock et al. 2013, 1327). Feedback zu den gesteckten Zielen erhöht die Motivation (Loock et al. 2013, 1327), während Feedback bei nicht erreichbaren Zielen ein Individuum demotivieren oder entmutigen kann (Loock et al. 2013, 1327). Weiterhin haben Loock et al. (2013) herausgefunden, dass es besser ist, wenn das Individuum sich eigene Ziele setzt. Ein externes Ziel wird nicht so integriert wie ein internes Ziel und konkrete sowie realistische Ziele sind ebenfalls besser geeignet, um ein Verhalten zu ändern (Mento et al. 1987).

Für die Nutzung von Energieverbrauchsfeedbacksystemen bedeutet dies, dass ein selbstbestimmtes Ziel die Wahrscheinlichkeit ihrer Nutzung erhöht. Ehrgeizige Ziele verstärken die Motivation. Positives Feedback des Feedbacksystems erhöht ebenfalls die Motivation.

Die Theorie von Ajzen/Fishbein (1975) des überlegten Handelns (*Theory of Reasoned Action*, kurz: TRA) (1975) und die Theorie von Ajzen (1991) des geplanten Verhaltens (*Theory of Planned Behavior*, kurz: TPB) werden im Unterabschnitt 6.2.2 separat erklärt. Die Theorien stellen einen wesentlichen Bestandteil der Entwicklung der Theorien im Bereich der Wirtschaftsinformatik dar. In Tabelle 16 sind die Theorien zusammengefasst und um die Theorien aus der Wirtschaftsinformatik, welche im Unterabschnitt 6.2.2 behandelt werden, ergänzt.

<b>Autor</b>	<b>Theorie Zuordnung</b>	<b>Intrinsisch</b>	<b>Extrinsisch</b>
<b>James (1890)</b>	<i>Inherent Instincts</i>	Instinkt / Annäherungsvermeidung	n. a.
<b>Woodworth (1917)</b>	<i>Homeostasis</i>	Biologische Bedürfnisse	n. a.
<b>Hull (1943)</b>	<i>Homeostasis</i>	Innere Triebe	n. a.
<b>Watson (1913)</b>	<i>Behaviorism</i>	n. a.	Extrinsische Ziele
<b>Harlow (1953a)</b>	<i>Rhesus Monkeys</i>	Innere Triebe	n. a.
<b>Freud (1905) zitiert in Pawlowsky (2000, 642)</b>	<i>Life / Death Instinct</i>	Intrinsisch	n. a.
<b>Skinner (1938)</b>	<i>Reinforcement Theory</i>	Innere Triebe	n. a.
<b>Hebb (1955)</b>	<i>Arousal Thesis</i>	Triebtheorie	n. a.
<b>McDougall (1908)</b>	<i>Inherent Instincts</i>	Intrinsisch	n. a.
<b>Zuckerman (1979)</b>	<i>Sensation Seeker</i>	Sensationssucher	n. a.
<b>Maslow (1954)</b>	<i>Hierarchy of Needs</i>	Wertschätzung, Selbstaktualisierung, physiologisches Bedürfnis	Sicherheit, Liebe
<b>Adams (1963)</b>	<i>Equity Theory</i>	Persönliche Standards	Input vs. Output
<b>Perugini/Conner (2000)</b>	<i>Model of Goal-Directed Behavior</i>	Eigenschaften, PBC, pos. antizipative Emotionen, neg. antizipative Emotionen	Subjektive Normen

<b>Autor</b>	<b>Theorie Zuordnung</b>	<b>Intrinsisch</b>	<b>Extrinsisch</b>
<b>Herzberg et al. (1959)</b>	<i>Two-Factor Theory</i>	Satisfiers	Hygienefaktoren
<b>Vroom (1964)</b>	<i>Expectancy Theory</i>	Erwartung und Wertigkeit	Instrumentalität
<b>Perugini/Conner (2000)</b>	<i>Extended Model of Goal-Directed Behavior</i>	Eigenschaften, PBC, pos. antizipative Emotionen, neg. antizipative Emotionen, GPF, GD	Subjektive Normen
<b>McGregor (1960)</b>	<i>Theorie X und Y</i>	Theorie Y	Theorie X
<b>Locke (1968)</b>	<i>Zielsetzungstheorie</i>	Harte und spezifische Ziele	Harte und spezifische Ziele
<b>Davis et al. (1989a)</b>	<i>Technologie-Akzeptanz-Modell</i>	Wahrgenommene Nützlichkeit, wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit	Externe Variablen
<b>McClelland (1961)</b>	<i>Learned Needs Theory</i>	Achievement	Power, Affiliation
<b>Porter/Lawler (1968)</b>	<i>Expectancy Theory</i>	Erwartungen, intrinsische Instrumentalität und Wertigkeit	Extrinsische Instrumentalität
<b>Venkatesh/Davis (2000)</b>	<i>Technologie-Akzeptanz-Modell 2</i>	Wahrgenommene Nützlichkeit, wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit, Output Qualität, Job Relevanz, Erfahrung	Freiwilligkeit, subjektive Normen, Image
<b>Alderfer (1969)</b>	<i>ERG Theory</i>	Existenz und Wachstum	Verbundenheit
<b>Ajzen/Fishbein (1975)</b>	<i>Theory of Reasoned Action</i>	Eigenschaften	Subjektive Normen
<b>Venkatesh et al. (2003)</b>	<i>Unified Theory of Acceptance and Use of Technology</i>	Performance Erwartung, Bemühungserwartung	Sozialer Einfluss, Erleichterungsfaktoren
<b>Deci/Ryan (1985a)</b>	<i>Self-Determination Theory</i>	Zielvorstellung, Kompetenz und Beziehung	Externe Regulierung, Introjektion, Identifikation und Integration
<b>Ajzen (1991)</b>	<i>Theorie des geplanten Verhaltens</i>	Eigenschaften, PBC	Eigenschaften, PBC
<b>Venkatesh/Bala (2008)</b>	<i>Technologie-Akzeptanz-Modell 3</i>	S. TAM 2 + Vorgänger und Erweiterung	S. TAM 2
<b>Venkatesh et al. (2012b)</b>	<i>Extending the Unified Theory of Acceptance and Use of Technology</i>	S. UTAUT + Anpassungen	S. UTAUT + Anpassungen

Tabelle 16: Kategorisierung der Autoren nach intrinsischer und extrinsischer Motivation

Quelle: Eigene Darstellung, Hinweis: PBC= Perceived Behavioral Control, GPF = Goal feasibility, GD = Goal desires, n. a. = nicht anwendbar

Zusammenfassend lässt sich festhalten: Adams (1963) zeigte, dass das Gerechtigkeitsgefühl mitbestimmend für die Entwicklung des Verhaltens ist. Vroom (1964) und Porter/Lawler (1968) beschreiben Motivation mit einer mathematischen Formel. Locke (1968) hingegen zeigt, dass ambitionierte und spezifizierte Ziele zu hoher Motivation führen. Spätere Untersuchungen (Seligman/Darley 1977; Becker 1978) stützen Lockes Theorie und stellen fest, dass Feedback die Motivation zusätzlich fördert. Die Theorie des überlegten Handelns von Ajzen/Fishbein (1975) ist die Grundlage für die Technologie Akzeptanz Modelle (TAM), welche im Unterabschnitt 6.2.2. eingehend behandelt werden.

### 6.2.2 Theorien aus der Wirtschaftsinformatik

Die Technologie Akzeptanz Modelle, welche Anwendung in der Wirtschaftsinformatik finden, basieren auf Theorien aus der Motivationsforschung und sind aus der Psychologie adaptiert

worden. Im vorherigen Unterabschnitt wurde bereits auf die Theorien TRA und TPB hingewiesen.

Die **Theory of Reasoned Action** (TRA) soll ein besseres Verständnis für die Vorhersage des Verhaltens erreichen (Ajzen/Fishbein 1975). Auf der Grundlage von Lern-, Erwartungs- und Attributionstheorien stellten Ajzen/Fishbein (1975) fest, dass die Verhaltensabsicht (BI) gleich der Ergebnisse der Haltung (A) plus der subjektiven Norm zu einem Verhalten (SN) ist, wie die Formel 6.2 verdeutlicht.

$$BI = A + SN \quad 6.2$$

Die Haltung korreliert mit dem resultierenden Verhalten (Vroom 1964; Porter/Lawler 1968). Die Erwartungstheorien beziehen sich nur auf das Ergebnis und nicht auf die Bewertung der Selbstleistung des jeweiligen Verhaltens. Vroom (1964) und Porter/Lawler (1968) gehen jedoch nicht auf die Bedeutung der subjektiven Norm ein. Ajzen/Fishbein (1975) schließen die Lücke der sozialen Norm und fügen die Bedeutung des sozialen Umfelds hinzu. Die soziale Meinung entscheidet über das zielgerichtete Verhalten.

McClelland (1961) beschreibt eine ähnliche Struktur, in welcher eine Person wahrgenommen und akzeptiert werden muss, um ein bestimmtes Verhalten aufzuzeigen. Eine negative Meinung Dritter über das Verhalten einer Person führt zu einem Vermeiden des Verhaltens (McClelland 1961). Deci/Ryan (1985b) charakterisieren die Bedeutung des sozialen Umfelds. Die Gesamtkorrelation zwischen den Einstellungen und den subjektiven Normen resultieren in der Verhaltensabsicht (Sheppard et al. 1988).

Basierend auf den Erkenntnissen der TRA fügt die **Theory of Planned Behavior** (TPB) von Ajzen (1991) das Konzept der wahrgenommenen Verhaltenssteuerung (*Perceived Behavioral Control*, kurz: PBC) hinzu. Die wahrgenommene Kontrolle wird über das eigene Verhalten bestimmt – auch als Kontrollüberzeugung bezeichnet. Basierend auf der SET von Bandura (1977), welche aus der Social-Cognitive-Theorie von Holt/Brown (1931) stammt, belegen Ajzen/Fishbein (1975), dass ein Individuum über die wahrgenommene Leichtigkeit oder Schwierigkeit der Durchführung eines bestimmten Verhaltens hinweg zusätzlich durch die Intention und das resultierende Verhalten beeinflusst wird. Fishbein/Cappella (2006) legen dar, dass die Selbstwirksamkeit und die wahrgenommene Verhaltenssteuerung das gleiche Konstrukt sind.

Aus der TPB leiten sich das Modell des zielgerichteten Verhaltens (**Model of Goal-directed Behavior**, kurz: MGB) und dessen erweitertes Modell des zielgerichteten Verhaltens (**Extended Model of Goal-directed Behavior**, kurz: EMGB) ab. Bei genauerer Betrachtung wird unter Verwendung von Ajzens Definitionen der TPB zusätzlich das *Verlangen* ins *Modell des zielgerichteten Verhaltens* (MGB) eingeführt (Perugini/Conner 2000, 707). Das Verlangen stellt den Motivationszustand dar, in dem Beurteilungen und Handlungsgründe in eine Motivation überführt werden (Perugini/Conner 2000, 707). Sie bekunden, dass Haltungen, positiv/negativ erwartete Emotionen sowohl das Verhalten selbst als auch wahrgenommene Verhaltenssteuerung sowie vergangenes Verhalten ein Verlangen auslösen, dass den Willen beeinflusst

(Perugini/Conner 2000). Ergänzend schlagen Perugini/Conner (2000) eine Erweiterung des MBG vor, welche als das *erweiterte Modell des zielgerichteten Verhaltens (Extended Model of Goal-directed Behavior*, kurz: EMGB) bezeichnet wird. Zielwahrnehmungsfähigkeit und Durchführbarkeit werden als Einflussfaktoren des Verhaltens dem MBG hinzugefügt (Perugini/Conner 2000). Looock et al. (2013) nutzen das EMGB, um die Rolle der Zielsetzung und der Vorgaben für energieeffizientes Verhalten in Informationssystemen zu untersuchen. Feedbacksysteme wirken von außen mit Informationen auf die Person ein. Dadurch kann eine Verhaltensveränderung eintreten.

Die Technologie Akzeptanz Modelle finden in der Wirtschaftsinformatik eine starke Beachtung und sind bis heute in zahlreichen Beiträgen zur Akzeptanz von Informationstechnologien zu finden. Im Jahre 1986 wurde die Theorie der Technologieakzeptanz veröffentlicht (Davis 1986). Das Technologie Akzeptanz Modell ist eine Testmethode der praktischen Benutzerakzeptanz, die es Systemdesignern und Programmierern ermöglicht, neue Computersysteme vor der Umsetzung zu evaluieren (Davis 1986, 7). Das Modell wurde 1989 validiert (Davis et al. 1989b). Bagozzi et al. (1992) bestätigten die Theorie. Die Aspekte Nützlichkeit und Benutzerfreundlichkeit werden durch externe Faktoren, wie das soziale Umfeld, beeinflusst. Diese sind entscheidend für die Bereitschaft der Nutzer zur Verwendung von Technologien und bestimmen die Motivation, eine Technologie zu nutzen. Das TAM wurde um weitere Faktoren, die die wahrgenommene Nützlichkeit beeinflussen, erweitert (Venkatesh 2000). Zur Erweiterung und Konkretisierung des TAM wird die subjektive Norm aus der TRA hinzugefügt und mit den Items Erlebnis, Freiwilligkeit, Arbeitsrelevanz, wahrgenommene Ausgabequalität und erwarteter Ergebnisdemonstration gruppiert. Dieses Modell ist als *Technologie Akzeptanz Modell 2 (TAM2)* bekannt. Die Akzeptanzmodelle werden im **Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT)** Modell vereinheitlicht (Venkatesh et al. 2003). Das Modell besteht aus vier Determinanten der Intention und Nutzung: Leistungserwartung, Anstrengungserwartung, sozialer Einfluss und Erleichterung der Bedingungen (Venkatesh et al. 2003, 425). Die Determinanten werden von den Moderatoren Geschlecht, Alter, Erfahrung und Freiwilligkeit des Gebrauchs beeinflusst (Venkatesh et al. 2003). Venkatesh/Bala (2008) erweiterten das TAM2 zum *Technologie Akzeptanz Modell 3 (TAM3)*. TAM3 untersucht die zweite Variable vom TAM und zeigt sechs Determinanten der wahrgenommenen Benutzerfreundlichkeit: Computer-Selbstwirksamkeit (*computer self-efficacy*), Wahrnehmung der externen Kontrolle (*perception of external control*), *Computer playfulness*, objektive Verwendbarkeit (*objective usability*), erfahrenes Vergnügen (*perceived enjoyment*) und Computerangst (*computer anxiety*). **Computer-Selbstwirksamkeit** ist per Definition der Grad, zu dem ein Einzelner meint, dass er oder sie die Fähigkeit hat, eine bestimmte Aufgabe mit einem Computer auszuführen. Die **Wahrnehmung der externen Kontrolle** ist die für ein Individuum tatsächlich verfügbare Unterstützung durch ein Computersystem oder verfügbaren Ressourcen, die bei Bedarf Hilfe leisten könnten, um das System zu nutzen (Venkatesh/Bala 2008). **Computer playfulness** repräsentiert die intrinsische Motivation in Verbindung mit der Nutzung eines neuen Systems (Venkatesh/Bala 2008, 278). Computer playfulness ist in dieser Arbeit nicht übersetzt worden, da playfulness eine Verspieltheit oder Munterkeit ist und nicht der Bedeutung nach Venkatesh/Bala (2008) entspricht. Webster/Martocchio (1992, 204) beschreiben Computer playfulness als den Grad der kognitiven Spontanität bei Mikrocomputer-Interaktionen. Die **objektive Verwendbarkeit** wird durch einen Vergleich von Systemen auf der Grundlage der

tatsächlichen Ebene (und nicht der Erwartungen) der Anstrengungen, die erforderlich sind, um bestimmte Aufgaben zu erfüllen, beschrieben (Venkatesh 2000, 350-351). Die Determinanten **erfahrenes Vergnügen** und **Computerangst** sind selbsterklärend. Inzwischen wurde das UTAUT vom *Consumer Acceptance and User of Information Technology* als UTAUT2 bezeichneten Modell abgelöst (Venkatesh et al. 2012a), welches das UTAUT Modell erweitert. Die vier Grundeinflüsse Performance Expectancy, Social Influence, Facilitating Conditions werden um die Einflüsse hedonistische Motivation, „Price Value“ und „Habit“ erweitert. Die Moderatoren werden auf Alter, Geschlecht und Erfahrung beschränkt. Die Komponente „Use Behavior“ wird mit der Komponente der Verhaltensintention vereinigt.

Davis (1986) und Venkatesh et al. (2012a) haben eine Vielzahl von Theorien aufgestellt, die in verschiedenen Bereichen validiert wurden. Energieverbrauchsfeedbacksysteme sind technische Geräte in Fahrzeugen. Allerdings konzentrieren sich die Akzeptanzmodelle auf die Vorhersage des Verhaltens oder der Akzeptanz von Technologie und nicht auf die Messung der Motivation selbst.

### 6.2.3 Intrinsische und extrinsische Motivation

Die **intrinsische Motivation** kann mit Belohnungen verringert werden (de Charms 1968). Die Belohnungen sind extrinsisch. Die Reduktion von extrinsischen Belohnungen führt zu einer Steigerung der intrinsischen Motivation (Notz 1975b, 885). Deci (1972a) hat in einem Laborexperiment Studierende an einem Projekt arbeiten lassen, das eine monetäre Belohnung versprach. Er teilte die Studierenden in zwei Gruppen: eine bekam abhängig von der Leistung eine monetäre Belohnung, die andere eine Belohnung unabhängig von der Leistung (Kontrollgruppe). Deci (1972a) stellte die These auf, dass die Zeit, die jemand für eine Aufgabe aufwendet, ein Indikator für intrinsische Motivation ist. Die Zeit dient als Messgröße für den Einfluss von Leistungsmotivation. Diejenige Gruppe mit monetärer Belohnung verbrachte weniger Zeit mit dem Projekt als die unbezahlte Kontrollgruppe. Im Gegensatz zum Experiment von Notz zeigt das Experiment von Deci, dass nicht-kontingente monetäre Belohnungen keinen signifikanten Einfluss auf die intrinsische Motivation haben.

Die **extrinsische Motivation** kann nahezu um jede intrinsische Motivation ergänzt werden. Die vier Regulierungsebenen der Motivation plus die Amotivation nach Deci/Ryan (1985b) werden insgesamt als Selbstregulierungs-Kontinuum gesehen. Je stärker eine spezifische Aufgabe integriert ist, desto kleiner ist der Grad zwischen Selbstbestimmung und externer Motivation (de Charms 1968; Ryan/Deci 2000b) und desto höher ist die innere Energie für die Ausführung der Handlung.

### 6.2.4 Zusammenfassung

Es gibt eine Vielzahl an psychologischen Theorien zur Motivation. In den letzten Jahren fanden Theorien wie TAM, TAM 2 oder UTAUT immer mehr Beachtung in der Wirtschaftsinformatik. Die Theorien besagen, dass die Haltung eines Individuums der Hauptgrund für seine Verhaltensabsicht ist und dies von der wahrgenommenen Nützlichkeit und Benutzerfreundlichkeit der Technologie beeinflusst wird. In Abbildung 32 ist der Zusammenhang zwischen Psychologie (blau) und Wirtschaftsinformatik (rot) in seiner historischen Entwicklung dargestellt.

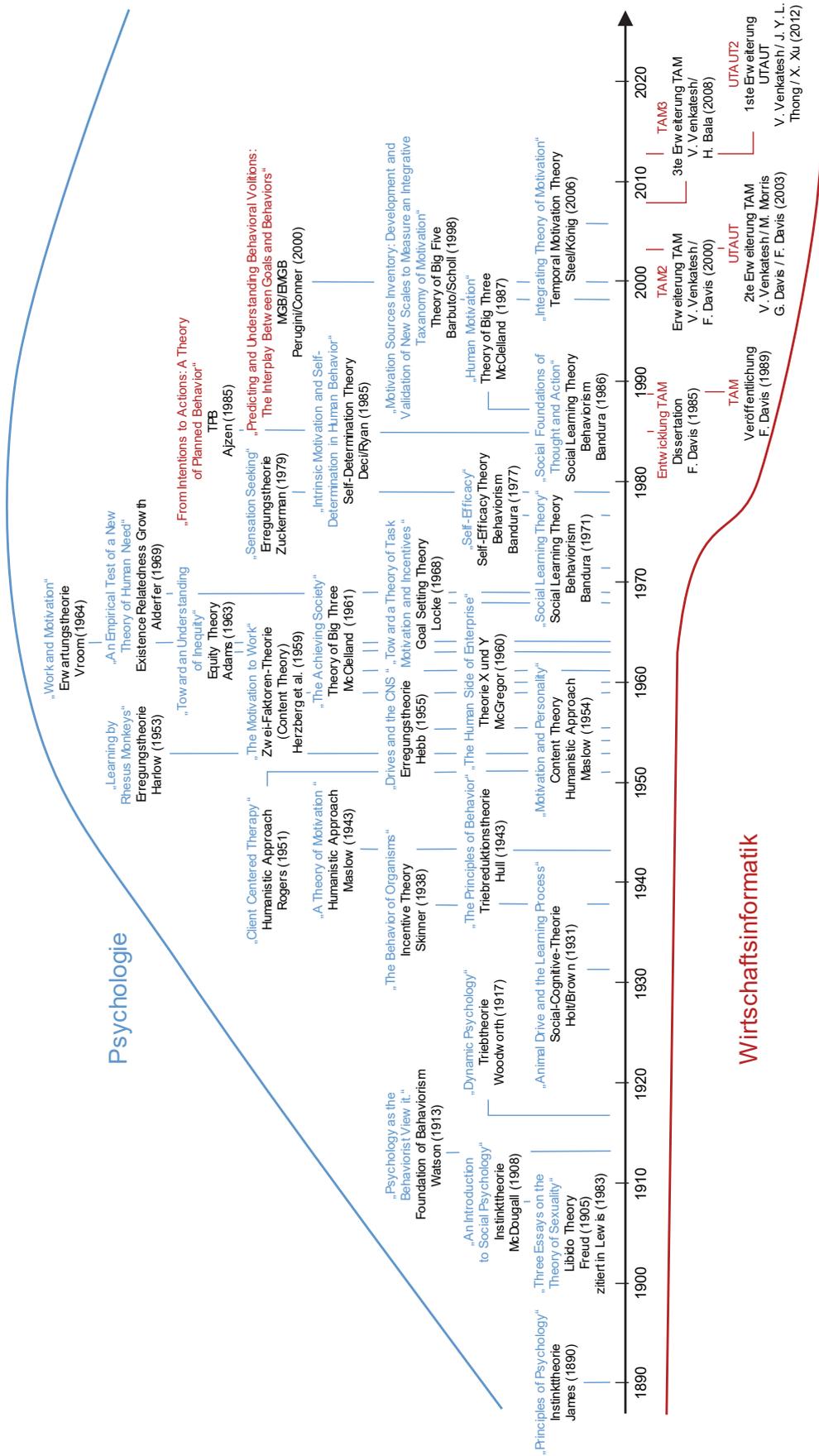


Abbildung 32: Historische Entwicklung der Motivationstheorien  
Quelle: Eigene Darstellung

Es konnten elf Faktoren aus verschiedenen Bereichen der Motivationstheorien identifiziert sowie nach internen und externen Einflüssen kategorisiert werden. Für das energieeffiziente Fahren sind die Zielsetzungstheorie (Locke 1968; Mossholder 1980) und die Verstärkungstheorie von Skinner (1971) vielversprechend. Deshalb wird der gewählte Ansatz von Loock et al. (2013) weiterverfolgt.

Energieverbrauchsfeedbacksysteme ermöglichen es dem Nutzer Informationen über sein Verhalten zu geben, damit dieser sein Ziel einer energieeffizienten Fahrweise erreichen kann. Es bleibt herauszufinden, inwieweit die Motivation bei der Nutzung dieser Systeme eine Rolle spielt.

### **6.3 Messung von Motivation**

Aufgrund der Vielzahl von Motivationstheorien ist eine Einschränkung notwendig, um die Messergebnisse miteinander vergleichen zu können.

Zum Auffinden relevanter Beiträge sind demgemäß folgende Anforderungen aufgestellt worden: Analyse der Motivation zur Nutzung von Energieverbrauchsfeedback oder allgemeine Messung der Motivation, ein Top-Ranking aufzuweisen, Abdeckung der Bereiche Psychologie und Wirtschaftsinformatik im Bereich der Informationssysteme.

Die Literaturrecherche führte zu insgesamt 160 Beiträgen. In den meisten Beiträgen wurde als Erhebungsinstrument ein Fragebogen verwendet. In anderen wurden Experimente verwendet, um die Korrelation zwischen intrinsischer und extrinsischer Motivation zu zeigen. Deci führte beispielsweise Experimente durch, um festzustellen, ob extrinsische Belohnungen die intrinsische Motivation beeinflussen. Das Ergebnis zeigte, dass Belohnungen kurzzeitig die Leistung erhöhen, jedoch unmittelbar danach ein Abfall der intrinsischen Motivation festzustellen ist (Deci 1971, 1972a, 1972b).

In der Literatur wurden insgesamt 17 verschiedene Messinstrumente zur Messung von Motivation gefunden, welche sich in eine von vier Kategorien einordnen lassen: Arbeitsmotivation, Lernmotivation, Glaubensmotivation (Religion) und Akzeptanz von Technologie.

Barbuto/Scholl (1998) stellten eine Zusammenfassung von den üblichen motivationalen Messmethoden basierend auf 14 verschiedenen Motivationstheorien vor. 13 weitere Messinstrumente, welche auf der Selbstbestimmungstheorie von Deci/Ryan (1985b) basieren, wurden mit Umfragebögen ermittelt. Diese messen die Autonomie, die wahrgenommene Kompetenz und den Bezug zum jeweiligen Thema. Insgesamt konnten 55 verschiedene auf der Selbstbestimmungstheorie basierende Beiträge gefunden werden.

Durchgehend zeigt sich ein steigendes Interesse der Motivationsforschungen an Energiethemen. Erste Theorien beschäftigen sich mit Energieeffizienz und dessen psychologischer Erklärung. Als Beispiele seien genannt: Stern (2011), der die Korrelation zwischen Klimawandel und psychologischen Faktoren erforscht, sowie Loock et al. (2013), welche die Rolle der Informationssysteme in energieeffizienten Haushalten untersuchen. Zusammen mit der stetig steigenden CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre steigt das Interesse an der Frage, mit welchem

Interaktionskanal Energiebewusstsein am stärksten beeinflusst werden kann. Daher wird ein Erhebungsinstrument benötigt, das den Zusammenhang zwischen der Motivation zur Nutzung eines Energieverbrauchsfeedbacksystems und Energiebewusstsein misst. Es stellt sich somit die Forschungsfrage:

**Forschungsfrage 1.5: Wie muss der Prototyp eines passenden Erhebungsinstruments zur Feststellung der Motivation von Nutzern zur Verwendung von Energieverbrauchsfeedbacksystemen gestaltet werden?**

Zur Beantwortung werden die einzelnen Erhebungsinstrumente eingehender untersucht.

### **6.3.1 General Causality Orientation Scale**

Der *General Causality Orientation Scale* (GCOS) misst mit einer 7er-Likert-Skala die allgemeine (nicht persönliche) Kausalität (Motivationsorientierungen). Die Kausalitätsorientierungstheorie stellt eine Perspektive auf die allgemeinen Motivationsorientierungen des Individuums dar, die dem domänenspezifischen Ansatz der Selbstregulierungs-Fragebögen komplementär ist (Deci 2015). Deci's Website (Deci 2017a) zeigt drei allgemeine Anwendungen auf, welche von Deci/Ryan (1985a) und Hodgins et al. (1996) durchgeführt wurden sowie eine Validierung von Vallerand et al. (1987). Darüber hinaus misst der GCOS die Autonomieorientierung und die kontrollierte Orientierung.

Die **Motivationsorientierung** beschreibt das Maß, in dem eine Person meint, dass die gewünschten Ergebnisse durch eigene Leistung hervorgebracht werden können (Deci 2017a).

Die **Autonomieorientierung** beurteilt das Ausmaß, in dem eine Person auf Aspekte der Umwelt ausgerichtet ist, seine intrinsische Motivation stimuliert, optimal anspruchsvoll ist und Feedback gibt (Deci 2017a).

Die **kontrollierte Orientierung** misst, ob und wie eine Person darauf ausgerichtet ist, durch Belohnungen, Fristen, Strukturen, Ego-Engagements und Richtlinien andere zu kontrollieren (Deci 2017a).

### **6.3.2 Fragebogen zur wahrgenommenen Autonomieunterstützung**

Der Fragebogen zur wahrgenommenen Autonomieunterstützung (*Perceived Autonomy Support*, kurz: PAS) besteht aus fünf Fragebögen, die beurteilen, ob ein bestimmter sozialer Kontext eine autonome oder eine kontrollierende Unterstützung darstellt: *Health Care Climate Questionnaire* (HCCQ), Lernklima-Fragebogen (*Learning Climate Questionnaire*, kurz: LCQ), Arbeitsklima-Fragebogen (*Work Climate Questionnaire*, kurz: WCQ), Sportklima-Fragebogen (*Sport Climate Questionnaire*, kurz: SCQ) und wahrgenommene Eltern-Autonomie-Unterstützungsskala (*Perceived Parental Autonomy Support Scale*, kurz: P-PASS). Die Fragebögen zum Klima (HCCQ, LCQ, WCQ und SCQ) liefern eine Punktzahl auf einer 7er-Likert-Skala, die anzeigt, inwieweit Gesundheitsdienstleister, Ausbilder, Manager oder Coaches als Autonomie-

unterstützung empfunden werden. Höhere Durchschnittswerte sind ein höheres Maß an wahrgenommener Autonomieunterstützung (Deci 2015). Der Alpha-Koeffizient der internen Konsistenz liegt über 0,90 (Deci 2015).

### 6.3.3 Fragebogen zur Selbstregulierung

Der Fragebogen zur Selbstregulierung (*Self-Regulation Questionnaires*, kurz: SRQ) besteht, ähnlich wie die PAS, aus fünf Fragebögen, welche die Motivation eines Individuums für ein bestimmtes Verhalten oder Domänenverhalten dahingehend bestimmen, ob es autonom oder kontrolliert ist (Deci 2015).

Die SDT unterscheidet vier Arten von Verhaltensregeln, die so definiert sind, dass die Regulierung einer extrinsisch motivierten Aktivität verinnerlicht und integriert wurde. Der Fragebogen misst mit einer 7er-Likert-Skala die Arten der Regulierung, indem er separat jede Art mit zwölf Fragen erfasst. Die vier Arten der extrinsischen Motivation wurden in Unterabschnitt 6.2.1.4 erörtert. Höhere Durchschnittswerte spiegeln einen höheren Grad der gemessenen Selbstregulierung wieder. Außerdem ist eine Unterskala, definiert als der Relatively Autonomy Index (RAI), hinzugefügt worden. Die Gewichtung ist in Formel 6.3 dargestellt:

$$(Intrinsic \times 2) + (Identified \times 1) + (Introjected \times (-1)) + (External \times (-2)) \quad 6.3$$

Die Literaturrecherche ergab 18 Beiträge, die den SRQ verwenden und zusätzlich die folgenden Fragebögen/Kriterien einschließen: der akademische SRQ (*Self-Regulation Questionnaire academic*, kurz: SRQ-A), Gesundheit mit den Fragebögen *Treatment Motivation Questionnaire* (TMQ) und *Treatment Self-Regulation Questionnaire* (TSRQ), Lernen (*Self-Regulation Questionnaire Learning*, kurz: SRQ-L) sowie Religion (*Self-Regulation Questionnaire Religion*, kurz: SRQ-R). Die Fragebögen zu Freundschaft und Übung sind nicht verwendet worden.

Ein weiterer Einflussfaktor ist das Bedürfnis nach Kompetenz (Deci/Ryan 1985b). Die wahrgenommene Kompetenzskala (*Perceived Competence Scale*, kurz: PCS) beurteilt, wie sich kompetente Personen in Bezug auf ein bestimmtes Verhalten wahrnehmen. Der Fragebogen wird oft zusammen mit dem SRQ verwendet, da er zwei von drei Faktoren von Decis SDT umfasst. Die wahrgenommene Kompetenzskala ist ein kurzer Fragebogen mit vier Fragen, welche mit einer 7er-Likert-Skala gemessen werden. Williams/Deci (1996) und Williams et al. (1998a) verwenden die wahrgenommene Kompetenzskala zusammen mit dem *Self-Regulation Questionnaire Learning* und *Health Care Climate Questionnaire*.

### 6.3.4 Aspirations Index

Der Aspirations Index (AI) beurteilt die intrinsischen und extrinsischen Lebensziele und bezeichnet sie auch als Aspirationen. Williams et al. (2000), Kasser/Ryan (1996) und Ryan et al. (1999) verwenden den Fragebogen, um persönliche zielorientierte Werte, „life goals“ (Williams et al. 2000), zu bewerten. Sie stellen sieben Ziel-Kategorien als Messgröße auf: Wohlstand, Ruhm, Image, persönliche Weiterentwicklung, Beziehung, Gemeinschaft und Gesundheit mit den drei spezifischen Zielen: Wichtigkeit, Wahrscheinlichkeit und Erlangung. Kasser/Ryan (1996) ordnen sechs der häufigsten genutzten Ziel-Kategorien zwei Faktoren zu:

**extrinsisch** – Ruhm, Image und persönliche Weiterentwicklung sowie **intrinsisch** – Beziehung, Gemeinschaft und Gesundheit. Der Aspirations Index besteht insgesamt aus 105 Fragen, welche mit einer 7er-Likert-Skala gemessen werden (Kasser/Ryan 1996; Williams et al. 2000).

### **6.3.5 Basic Psychological Needs Scales**

Die Basic Psychological Needs Scales (BPNS) beurteilt, wie Menschen Befriedigung hinsichtlich der Selbstbestimmung nach der SDT erfahren, d. h. inwiefern die drei Bedürfnisse der Motivation Kompetenz, Beziehung und Autonomie erfüllt sind (Deci/Ryan 2000; Leone 2011; Gagné 2003). Die Fragen decken alle drei Bedürfnisse ab und sind auf einer allgemeinen Ebene anzusiedeln. Die BPNS umfasst 21 Fragen, wobei sieben der Autonomie, sechs der Kompetenz und acht der Beziehung zugeordnet werden (Deci/Ryan 2000; Leone 2011; Gagné 2003). Es wird für die Messung eine 7er-Likert-Skala verwendet. Die Werte werden abschließend gemittelt und ergeben jeweils einen Skalenwert für die drei genannten Bedürfnisse. Der BPNS ist der Mittelwert aus den summierten Mittelwerten der drei Bedürfnisse.

### **6.3.6 Selbstbestimmungsskala**

Die Selbstbestimmungsskala (*Self-Determination Scale*, kurz: SDS) analysiert, in welchem Umfang Erwachsene dazu neigen, selbstbestimmt zu sein (Deci 2015). Die Bezeichnung der Skala wurde zum besseren Verständnis in „Perceived Choice and Awareness of Self Scale“ umbenannt (Deci 2017b). Die Skala misst mit zehn Fragen bestehend aus zwei Fünf-Punkt-Subskalen die individuellen Unterschiede in wahrgenommener Wahl und Selbstbewusstsein (Deci 2017b).

Thrash/Elliot (2002), Sheldon et al. (1996), Sheldon (1995) und Elliot/McGregor (2001) nutzten den Fragebogen, um allgemeine Informationen über die Selbstbestimmung der Völker zu erhalten.

### **6.3.7 Subjektive Vitalitätsskala**

Die subjektive Vitalitätsskala (*Subjective-Vitality Scale*, kurz: SVS) misst die Vitalität eines Individuums. Es gibt zwei Versionen (Ryan/Frederick 1997). Die eine Version bezieht sich auf individuelle Unterschiede und die andere adressiert die subjektive Vitalität (Ryan/Frederick 1997). Der ursprüngliche Fragebogen weist sieben Fragen auf (Ryan/Frederick 1997).

### **6.3.8 Skala der Wahrnehmung von Eltern**

Die Skala der Wahrnehmung von Eltern (*Perceptions of Parents Scales*, kurz: POPS) bestimmt den Grad an Unterstützung von Kindern durch ihre Eltern. Die SDT betrachtet es als einen optimalen Elternkontext (Grolnick et al. 1997; Deci 2017c). Es gibt zusätzlich eine Kind-Version von Grolnick et al. (1991) und eine College-Student-Skala, um Information über ältere Kinder zu erhalten (Deci 2017c).

### **6.3.9 Problem in School/Work Scale**

Die Skalen Problem in der Schule (*Problem in School*, kurz: PIS) und Problem bei der Arbeit (*Problem in Work*, kurz: PAW) messen, ob Individuen sich von einer Autoritätsperson in ihrer Autonomie unterstützen oder kontrollieren lassen (Deci 2015). Die Problem-in-der-Schule-

Skala misst die Autonomie und die Unterstützung durch den Lehrer und die Problem-in-der-Arbeits-Skala misst dies entsprechend für Manager (Deci 2015).

Reeve et al. (1999), Deci et al. (1981b) und Deci et al. (1989) verwenden die beiden Skalen für die Messung der Motivationsorientierung (Deci 2015).

### 6.3.10 Theorie des geplanten Verhaltens

Die Fragebögen zur Theorie des geplanten Verhaltens zeigen die Haltung gegenüber einer Handlung und die Wahrnehmung eines Verhaltens. Eine detaillierte Definition von TPB findet sich im Unterabschnitt 6.2.2. Godin/Kok (1996) fanden 58 Anwendungsfälle in gesundheitsbezogenen Verhaltensweisen. Zum Beispiel untersuchten Boissonneault/Godin (1990) die Vorhersage der Absicht, nur in abgegrenzten Arbeitsplatzgebieten zu rauchen, und Parker et al. (1995) nutzte die TPB, um Motive des schlechten Fahrverhaltens, ähnlich wie hier, zu untersuchen.

### 6.3.11 Technologie-Akzeptanz-Modelle

Die Technologie-Akzeptanz-Modelle wurden mehrfach diskutiert und weiterentwickelt, wie in Abschnitt 6.2.2 erörtert (Bagozzi 2007; Benbasat/Barki 2007; Chau 1996; Venkatesh/Bala 2008). Bagozzi et al. (1992) nutzten das TAM, um zu verstehen, wie stark das Lernen mit dem Computer und dessen Benutzung akzeptiert wird. Yousafzai et al. (2007) haben eine Metaanalyse von TAM durchgeführt und identifizierten siebzehn webbasierte Umfragen im Zeitraum von 1998 bis 2003, zum Beispiel eine Forschung über Studierende auf Online-Handelssystemen (Loh/Ong 1998), einer Untersuchung der Internetnutzung (Teo et al. 1999) und Messung der Akzeptanz eines Tech-Tafelsystems (Yi/Hwang 2003). Venkatesh/Davis (2000) haben vier Längsversuche durchgeführt, um zu überprüfen, ob fensterbasierte Systeme und Assistenzsysteme in der Arbeitsumgebung aufgenommen werden. Williams et al. (2015, 455) haben zusammengefasst 155 Beiträge unter Verwendung des UTAUT im Zeitraum von 2004 bis 2011 untersucht, einschließlich Kourouthanassis et al. (2010) und Venkatesh et al. (2008). Im Jahr 2011 haben Behrend et al. (2011) in einer Studie die Adoption und Nutzung von Cloud-Computing in Community Colleges auf der Grundlage von TAM3 untersucht.

### 6.3.12 Motivation Sources Inventory

Barbuto/Scholl (1998) fassen 14 verschiedene Motivationstheorien zusammen. Und sie kategorisieren diese in fünf Gruppen: *Intrinsic Process Motivation*, *Instrumental Motivation*, *External Self-Concept-Based Motivation*, *Internal Self-Concept-Based Motivation* und *Goal Internalization Motivation*. Der ursprüngliche *Motivation Sources Inventory* (MSI) Fragebogen besitzt 60 Fragen und weist ein Cronbach's Alpha > 0,8 auf (Barbuto/Scholl 1998). Sie sind zwei von wenigen Autoren, die den Alpha-Wert im Beitrag angeben.

- a) Barbuto/Scholl (1998, 1012) beschreiben die **Intrinsic Process Motivation** als Einflüsse, die zu einer Handlung führen, als Spaß an der Sache haben („for the sheer fun“). Die *Instrumental Motivation* ist der Grund des Verhaltens, wenn ein Individuum gewisse extrinsische greifbare Ergebnisse erwartet (Barbuto/Scholl 1998, 1012).

Barbuto/Scholl (1998) bekunden, dass die *External Self-Concept Motivation* auf Meinungen von Dritten beruht, speziell die Suche nach der Bejahung von Merkmalen, dem Bedürfnis nach Kompetenz und Werten.

- b) Hingegen wird die **Internal Self-Concept Based Motivation** durch interne vom Individuum stammende Standards von Merkmalen, Kompetenzen und Werten festgelegt (Barbuto/Scholl 1998, 1013). Diese korrelieren stark mit den Theorien des Bedürfnisses nach Leistung von McClelland (1961), der intrinsischen Motivation von Deci (1975), den Motivationsfaktoren von Herzberg et al. (1959) und der Internal Self-Concept Motivation von Bandura (1986).
- c) Die **Goal Internalization Motivation** wurde von Deci (1975) als interne Valenz für das Ergebnis, von Kelman (1958) als internalisierte Werte und von Maslow (1954) in seiner Selbstverwirklichungstheorie erforscht.
- d) Die Theorien von Locke (1966), Looock et al. (2013) und Mento et al. (1987) fallen ebenfalls unter die **Goal Internalization Motivation**.
- e) Nach den Ergebnissen der Literaturrecherche kann die **Instrumental Motivation** von Vroom (1964) und Porter/Lawler (1968) hinzugefügt werden.
- f) Feedback passt in die **External Self-Concept Based Motivation** von Locke (1968), Mento et al. (1987) und Skinner (1953). Das Gleiche gilt für Theorien von Ajzen (1991) und Venkatesh et al. (2003).
- g) Darüber hinaus kann die Selbstwirksamkeit von Venkatesh/Bala (2008) der **Internal-Self-Concept Based Motivation** hinzugefügt werden.

Insgesamt fanden sich 15 Beiträge, welche den MSI von Barbuto/Scholl (1998) verwendeten. Tabelle 17 stellt den Beitrag von Barbuto/Scholl (1998) dar.

Gruppe	Cronbach's Alpha	Autoren mit Bezug
<b>Intrinsic Process Motivation</b>	0,92	Kohlberg (1973),Kegan (1982), Loevinger (1976),Piaget (1972), Alderfer (1969), Murray (1964), Maslow (1954), Bandura (1986), Deci (1975), Staw (1976)
<b>Instrumental Motivation</b>	0,83	Etzioni (1961); Barnard (1938); (Piaget 1972); Kohlberg (1973); Kegan (1982); Loevinger (1976); McClelland (1961); Murray (1964); Maslow (1954); Alderfer (1969); Bandura (1986); Deci (1975); Staw (1976); Katz/Kahn (1978)
<b>External Self-Concept</b>	0,85	Etzioni (1961); Barnard (1938); Ashford/Mael (1989); Kegan (1982); Kohlberg (1973); McClelland (1961); (Murray 1964); Maslow (1954); Alderfer (1969); Katz/Kahn (1978)
<b>Internal Self- Concept</b>	0,90	McClelland (1961); Deci (1975); (Piaget 1972); Kohlberg (1973); Kegan (1982); Loevinger (1976); Maslow (1954); Herzberg et al. (1959); Alderfer (1969); Bandura (1986); Staw (1976); Katz/Kahn (1978)
<b>Goal Internalization</b>	0,88	Kelman (1958); Etzioni (1961); Deci (1975); Piaget (1972); Kohlberg (1973); Kegan (1982); Loevinger (1976); Maslow (1954); Katz/Kahn (1978)

Tabelle 17: Übersicht der Nutzung des Motivation Sources Inventory

Quelle: Barbuto/Scholl (1998), Hinweis: Eine Umfrage mit einem Cronbach's Alpha von 0,70 oder höher wird als verlässlich betrachtet (Cronbach 1951)

Zur Beantwortung der Forschungsfrage 1.5 wurde die Literatur nach bisherigen Erhebungsinstrumenten analysiert. Es konnte kein spezifisches Erhebungsinstrument zur Messung der Motivation zur Nutzung von Energieverbrauchsfeedbacksystemen identifiziert werden.

#### 6.4 Messung der Bereitschaft zur Nutzung von Energieverbrauchsfeedbacksystemen

Eine große Anzahl an Beiträgen behandelt das Thema der Motivation (Bandura/Cervone 1986; Barbuto/Scholl 1998; Barbuto et al. 2010; Becker 1978; Calder/Staw 1975a; Cristea et al. 2012;

Davis et al. 1992; Deci 1971; Deci/Cascio 1972; Deci et al. 1998; Deci/Ryan 1985b; Fogg 2009b; Gollner 2014; Maslow 1970; Ryan/Deci 2000b; Ryan et al. 1997; Ryan et al. 1983; Williams et al. 1996; Zhang 2008).

312 von 478 Forschungsarbeiten verwendeten Fragebögen. Fragebögen bieten die Möglichkeit einer quantitativen Analyse mittels großer Stichproben, sind heterogen und ortunabhängig einsetzbar. In der Literatur wird eine 7er-Likert-Skala zur Messung von Attributen präferiert und bei der Erstellung herangezogen. Tabelle 18 fasst die identifizierten Evaluierungsmethoden zusammen.

Erhebungsinstrument	Anzahl Experiment	Anzahl Fragebogen
Aspiration Index (AI)	0	3
Basic Psychology Needs Scale (BPNS)	0	7
General Causality Orientation Scale (GCOS)	0	3
Health Care Climate Questionnaire (HCCQ)	0	7
Intrinsic Motivation Inventory (IMI)	8	0
Learning Climate Questionnaire (LCQ)	0	2
Motivation Sources Inventory (MSI)	0	15
Perceived Parental Autonomy Support Scale (P-PASS)	0	3
Problem at Work (PAW)	0	1
Problem in School (PIS)	0	2
Perceptions of Parents Scales (POPS)	0	3
Sport Climate Questionnaire (SCS)	0	3
Self-Determination Scale (SDS)	0	4
Self-Regulation Questionnaires Academic (SRQ-A)	0	9
Self-Regulation Questionnaires Learning (SRQ-L)	0	2
Self-Regulation Questionnaires Religion (SRQ-R)	0	2
TAM <sup>5</sup>	127	17
TAM 2	4	0
TAM 3	1	0
Treatment Motivation Questionnaire (TMQ)	0	3
Theory of Planned Behavior (TPB) <sup>6</sup>	0	58
Treatment Self-Regulation Questionnaire (TSRQ)	0	2
UTAUT <sup>7</sup>	0	155
Work Climate Questionnaire (WCQ)	0	1
Work Preference Inventory (WPI) <sup>8</sup>	0	1
Sonstige	17	8
<b>Summe</b>	<b>166</b>	<b>312</b>

Tabelle 18: Anzahl identifizierter Evaluierungsmethoden

Quelle: Eigene Darstellung

Erkennen (awareness) ist als ein Teil des Bewusstseins (consciousness) anzusehen und zugleich eine Vorstufe. Erkennen wird definiert als „*knowledge or perception of a situation or fact*“ (Soanes/Hawker 2006, 59), während Bewusstsein als „*state of being aware of [something] and responsive to surroundings*“ verstanden wird (Soanes/Hawker 2006, 206). Es handelt sich um einen Zustand, der aus dem Erkennen folgt.

De Haan/Kuckartz (1996) fügen den Begriff „Environment“ hinzu, d. h. sie betrachten den von der Umwelt gegebenen Rahmen und definieren Umweltbewusstsein als Komposition von Umweltschutz, der Haltung gegenüber der Umwelt und dem Umweltverhalten; sie lassen sich in Handlungsbereitschaft und tatsächliches Verhalten unterteilen.

<sup>5</sup> Zusammenfassung s. Yousafzai et al. (2007),  $n = 127$ , Fokus Experiment (benutzt Fragebogen)

<sup>6</sup> S. Godin/Kok (1996)

<sup>7</sup> Zusammenfassung s. Williams et al. (2015),  $n = 174$  davon nutzten 10 Experimente und 155 Frageböge

<sup>8</sup> S. Amabile et al. (1994)

Schoembs (2003) bestätigt diese Theorie und zeigt, dass sich Energiebewusstsein aus Wissen und Bereitschaft zu Handeln zusammensetzt. Ewers et al. (2001) fügten der Komposition die Begrifflichkeit der Umweltmoral hinzu. In diesem Fall kann Umweltbewusstsein als Synonym für Energiebewusstsein gesehen werden.

Energieverbrauchsfeedbacksysteme liefern Wissen (Informationen), welche es dem Menschen ermöglichen, den eigenen Einfluss auf die Umwelt zu erkennen und entsprechend dieser Erkenntnis zu handeln. Festzuhalten ist, dass die Information zu einer Handlung befähigt, dies aber vom tatsächlichen Verhalten zu unterscheiden ist. Das Handeln des Einzelnen ist entscheidend für das energieeffiziente Fahren (Veränderung).

#### **6.4.1 Erstellung des Erhebungsinstrumentes**

Für die Erstellung des Erhebungsinstrumentes<sup>9</sup> werden zuerst die zu messenden Attribute festgelegt. Diese sind die Fokussierung auf das Interesse (Deci/Ryan 1985b), die wahrgenommene Autonomie (Deci/Ryan 1985b; Venkatesh/Davis 2000; Venkatesh et al. 2003) sowie die Kompetenz (Maslow 1954; Herzberg et al. 1959; McClelland 1961; Bandura 1977; Deci/Ryan 1985b; Venkatesh/Davis 2000) und die soziale Norm zur Nutzung von Energieverbrauchsfeedbacksystemen (Ajzen/Fishbein 1975; Deci/Ryan 1985b; Maslow 1954; McClelland 1961; Venkatesh/Davis 2000).

Des Weiteren werden die Erwartungen und die Zielsetzung zum Energiesparen erhoben (Locke 1965, 1966, 1968; Looock et al. 2013; Mento et al. 1987; Vroom 1964; Porter/Lawler 1968).

Außerdem werden die externen Einflussfaktoren auf die Motivation abgefragt: das soziale Umfeld (Locke 1968; Ajzen/Fishbein 1975; Deci/Ryan 1985b; Davis et al. 1989a; Ajzen 1991; Venkatesh/Davis 2000; Venkatesh et al. 2003; Venkatesh/Bala 2008) und speziell dessen Reaktionen auf das Verhalten (Skinner 1953; Locke 1968; Mento et al. 1987).

Die Basis für das Erhebungsinstrument ist das Motivation Sources Inventory (MSI) von Barbuto/Scholl (1998), das den motivationalen Einfluss von Belohnungen, eigenen Werten und selbstgesetzten Zielen misst. Weiterhin werden die Selbstregulierungs- sowie die Wahrgenommene-Kompetenz-Skala, aus der Selbstbestimmungstheorie (SDT) von Deci/Ryan (1985b) einbezogen.

Das Erhebungsinstrument teilt sich in acht Teile mit 52 aus der Literatur abgeleiteten Fragen: (1) demografische Daten, (2) Energiebewusstsein, (3) internes Selbstverständnis, (4) wahrgenommene Kompetenz, (5) wahrgenommene Autonomie, (6) instrumentelle Motivation, (7) externes Selbstverständnis und (8) Internalisierung von Zielen. Die (1) demografischen Daten bilden eine erste Gruppe von insgesamt drei Gruppen des Erhebungsinstrumentes. Eine zweite Gruppe ist die Messung des (2) Energiebewusstseins und die dritte Gruppe besteht aus den Teilen (3) bis (8). Der Umfragebogen für die Messung der Motivation zur Nutzung von Energieverbrauchsfeedbacksystemen befindet sich in Anhang B.2.

---

<sup>9</sup> Siehe Gottlieb et al. (2016)

- 1) Die (1) **demografischen Daten** umfassen Fragen nach dem Geschlecht, Alter und der Fahrerfahrung. Die Ermittlung des Geschlechts dient der Untersuchung eines möglichen geschlechtsspezifischen Unterschiedes. Das Alter wird für die Feststellung möglicher altersbedingter Unterschiede erfasst und um eine spätere Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Die Fahrerfahrung wird mit zwei Messgrößen bestimmt: in gefahrenen Kilometern pro Jahr und den Jahren, in welchen der Fahrer in Besitz der Fahrerlaubnis ist.
- 2) In der zweiten Gruppe, der Ermittlung des (2) **Energiebewusstseins**, werden Fragen herangezogen, welche das Energiebewusstsein reflektieren sollen. Diese Fragen basieren auf De Haan/Kuckartz (1996), Ewers et al. (2001) und Schoembs (2003). Insgesamt wurden zur Ermittlung des Energiebewusstseins sechs Fragen zu Alltagssituationen wie allgemeines Wissen zum Energiesparen (zwei Fragen), Wasserverbrauch, des Energieverbrauchs der elektronischen Geräte, des zukünftigen Energieverbrauchs und dem selbstwahrgenommenen bewussten Energieverbrauch identifiziert und in den Fragebogen aufgenommen.
- 3) In der dritten Gruppe des Erhebungsinstrumentes werden die Motivationstheorien mit Bezug auf intrinsische und extrinsische Motivationsfragebögen untersucht. Die Fragebögen von Barbuto/Scholl (1998), Deci/Ryan (1985b) und Levesque et al. (2007) decken die benötigten Aspekte ab. Die intrinsische und extrinsische Motivation wird jeweils in drei Bereiche gegliedert. Die *intrinsische Motivation* teilt sich in das (3) **interne Selbstverständnis**, welches mit sechs Fragen aus dem MSI gemessen wird. Es wird gemessen, wie stark eine Aktivität eigene Standards berücksichtigt (interne Kausalität). Der zweite Bereich ist die (4) **wahrgenommene Kompetenz**, welche mit vier Fragen aus dem SDT gemessen wird. Der dritte Bereich ist die (5) **wahrgenommene Autonomie**, welche mit zwölf Fragen aus dem SDT gemessen wird, wie das Empfinden zur Kompetenz und Autonomie hinsichtlich der Motivation, des Wohlbefindens und der Performanz im Umgang mit Energieverbrauchsfeedbacksystemen. Die *extrinsische Motivation* teilt sich in drei Bereiche. Der erste Bereich ist die (6) **instrumentelle Motivation**, welche mit sechs Fragen aus dem MSI bewertet wird, und meint Belohnungen, das soziale Umfeld und die externe Rückmeldung zur eigenen Person (jeweils zwei Fragen). Der zweite Bereich bewertet das (7) **externe Selbstverständnis** mit sechs Fragen aus dem MSI, die den Grad des externen Einflusses von Bezugspersonen wie Eltern oder Vorbildern bewerten (jeweils drei Fragen). Der dritte Bereich, die (8) **Internalisierung von Zielen** misst mit sechs Fragen aus dem MSI, inwieweit die individuellen Ziele mit der eigenen Wertorientierung konsistent sind. In Anhang C befindet sich der entwickelte Umfragebogen zum Energieverbrauchsfeedback.

#### 6.4.2 Ergebnisse des Pretests

Nach der Entwicklung des Erhebungsinstrumentes kann ein Pretest durchgeführt werden, um explorativ die 52 Fragen zu testen. Ab einem Cronbach's Alpha von größer als 0,5 ist der Wert akzeptabel und ab 0,7 ist die interne Konsistenz gegeben (Hossiep 2014, 359; Cronbach 1951).

Am 26. August 2015 haben 49 Personen am Pretest teilgenommen. Davon haben 30 Personen den Umfragebogen vollständig beantwortet. Die Teilnehmer sind Studierende zwischen 20 und 30 Jahren, 20 Frauen und 29 Männer, welche mittels Facebook und privater Einladungen auf

die online durchgeführte Umfrage hingewiesen wurden. Der Fragebogen hat ein durchschnittliches Cronbach's Alpha von 0,74. Das Energiebewusstsein weist ein Cronbach's Alpha von 0,54 auf.

Das Ergebnis zeigt ein generelles Interesse an Energieeffizienz, so gaben 31 von 49 Personen einen Wert von 5 oder höher an. Je höher die gefahrenen Kilometer, desto höher ist die Motivation zur Benutzung einer Energieverbrauchsanzeige im Fahrzeug, um Energie zu sparen (Pearson Korrelation 0,296). Dies bedeutet, dass das Energiebewusstsein mit gefahrenen Kilometern steigt. Es gibt eine signifikante Korrelation zwischen dem Energiebewusstsein und dem internen Selbstverständnis (Pearson Korrelation 0,317). Je energiesparender gefahren wird, desto ausgeprägter ist das Energiebewusstsein der Person. Den Ergebnissen ist nicht zu entnehmen, welche extrinsischen Motivatoren, wie Feedback anhand von Interaktionskanälen, zu einem positiven oder negativen Effekt führen.

### 6.4.3 Diskussion des Pretests

Die 52 Fragen können zu einer langen Durchführungszeit geführt haben und damit zu einer hohen Abbruchquote; so waren nur 30 von 49 Fragebögen vollständig. Dies kann zu verzerrten Ergebnissen führen und ist bei der Validierung zu berücksichtigen.

Ferner könnte der Fragebogen ins Deutsche übersetzt und validiert werden, um mögliche Verzerrungen aufgrund der Sprache ausschließen zu können. Eine Übertragbarkeit der englischen Fragen aus dem MSI und SDT wäre somit auch zu validieren. Signifikante sprachliche Probleme wurden im Pretest nicht erkannt und deshalb konnte mit dem englischen Umfragebogen weitergearbeitet werden.

Es wird vorausgesetzt, dass eine Person mit einer hohen Motivation zum Energiesparen auch ein hohes Energiebewusstsein besitzt. Aus der ersten Evaluierung des Erhebungsinstrumentes geht hervor, dass ein verbessertes Energiebewusstsein möglich ist. Motivationsforschung bietet Grund zur Annahme, dass maßgeblich intrinsische Ideale und Wertvorstellungen die entscheidenden Intentionen zum Energiesparen sind. Da das Energiebewusstsein mit den gefahrenen Kilometern steigt, ist es notwendig herauszufinden, welche Informationskanäle genutzt werden können, um das Energiebewusstsein positiv zu beeinflussen. In weiteren Schritten werden Experimente genutzt, um die interne Validität zu erhöhen und geeignete Energieverbrauchsfeedbacksysteme zu identifizieren. Unabhängig davon könnte in einem weiteren Schritt herausgefunden werden, ob es möglich ist Typen von Energiebewusstsein (Kunden) zu identifizieren und somit kundenorientierte Energieverbrauchsfeedbacksysteme zu gestalten.

Die bisherige Stichprobengröße ist mit  $N = 49$  als zu klein anzusehen, um geeignete Aussagen über die Reliabilität des Erhebungsinstrumentes treffen zu können. Bühner (2012, 51) versteht unter der Reliabilität:

*„Die Reliabilität ist ein Wert, der zwischen null und eins liegt und die Messgenauigkeit eines Tests angibt. Ein Wert von eins bedeutet, dass eine Messung perfekt genau ist. Ein Wert von null bedeutet, dass keine Messung im eigentlichen Sinne vorliegt.“*

Die Stichprobengröße ist für eine bessere Aussagekraft zu erhöhen.

Für eine verlässliche Aussage ist das Cronbach's Alpha auf mindestens 0,7 zu erhöhen (Cronbach 1951).

Zusätzlich ist eine Durchführung von Faktoranalysen sinnvoll. Es werden zwei Arten unterschieden: die exploratorische und konfirmatorische Faktoranalyse (Bühner 2012, 296). Die exploratorische, als *Exploratory Factor Analysis* (EFA) bezeichnet, ist notwendig, um den Umfragebogen auf entscheidende Faktoren (Fragen) hin zu analysieren, welche einen Einfluss auf das jeweilige Konstrukt haben. Die konfirmatorische, als *Confirmatory Factor Analysis* (CFA) bezeichnet, wird herangezogen, um die Struktur des Modells zu überprüfen (Bühner 2012, 296). Dazu sind die Fallzahlen auf mindestens  $N = 100$  zu erhöhen (Bühner 2012, 370).

Zuerst wird im Abschnitt 6.5 die Validierung des Erhebungsinstrumentes durchgeführt, um dann den Fragebogen für ein Laborexperiment im Fahrsimulator zur Beantwortung der Forschungsfragen 2 und 3 zu verwenden.

## 6.5 Validierung des Erhebungsinstrumentes: Energiebewusstseinskala

Die Validierung der entwickelten Skala erfordert eine initiale Definition von Motivationstheorien und Bewusstseinskonzepten, wie sie in den Abschnitten 6.2 und 6.3 durchgeführt wurde.

### 6.5.1 Methodisches Vorgehen

Zur Validierung des erstellten Fragebogens von Gottlieb et al. (2016) wird ein zweistufiger Ansatz gewählt, um einen zweigliedrigen Fragebogen zu entwickeln: (i) Reliabilitätstest der Motivationsskala von Gottlieb et al. (2016) und (ii) Untersuchung der Energiebewusstseinskala in drei Phasen.

- 1) In der **ersten Phase** werden die Fragen zur Messung von Energiebewusstsein reflektiert. Dazu wurde der Fragebogen von sechs auf 37 Energiebewusstseinsfragen erweitert und ist in sechs Konstrukte unterteilt worden: Verhalten, Bewusstsein und Haltung, die jeweils in allgemein sowie spezifisch gegliedert wurden. Diese Konstrukte wurden mit sechs Experten vom Lehrstuhl mittels des sogenannten card sorting (Davis 1986; Davis et al. 1989b; Moore/Benbasat 1991) validiert. Unabhängig davon sind die 37 Fragen mit  $N = 134$  Studierenden und Mitarbeitern der Technischen Universität München mit den zugrunde liegenden Konstrukten analysiert worden. Zur Einhaltung der Konformität mit dem Motivationsteil ist eine 7er-Likert-Skala verwendet worden.
- 2) In der **zweiten Phase** wird eine exploratorische Faktoranalyse (EFA) mit einer Hauptkomponentenanalyse (Principal Component Analysis, kurz: PCA) und einer orthogonalen Rotation und das Varimax-mit-Eigenwert-größer-als-Eins-Kriterium angewendet, um die Korrelation zwischen den Fragen (Items) zu erklären und die Dimensionen zu reduzieren (Bühner 2012, 380; Cudeck 2000, 265-296). Für die Auswertung wird der Kaiser-Meyer-Olkin-Koeffizient (KMO) angewendet. Ein KMO von kleiner als 0,5 ist für eine Auswertung nicht heranzuziehen (Bühner 2012, 347). Für die Verwendung der Fragen wird die *Measures of Sampling Adequacy* (MSA) herangezogen. Dieser Koeffizient muss größer gleich 0,5 sein (Bühner 2012, 356).
- 3) In der **dritten Phase** ist eine CFA mit der Maximum-Likelihood-Methode durchgeführt worden, um die Zuverlässigkeit und Gültigkeit der Grundgesamtheit zu prüfen (Hoyle

2000, 465-497). Eine 7er-Likert-Skala wird zur Messung des Konstrukts herangezogen. Abschließend wird eine Reliabilitäts- und Gültigkeitsprüfung durchgeführt.

Die Motivationsskala basiert auf den Erkenntnissen von Gottlieb et al. (2016), welche auf den Motivationstheorien von Deci/Ryan (1985b) und den Fragebögen von Barbuto/Scholl (1998) mit dem MSI sowie Deci et al. (1989) basiert. Die Fragen sind bereits validiert und eine weitere Validierung dieses Teils des Fragebogens ist nicht notwendig (Barbuto/Scholl 1998; Deci et al. 1989; Deci/Ryan 1985b; Williams/Deci 1996; Black/Deci 2000).

Die Befragung fand in der Zeit vom 21. bis 26. Februar 2016 statt und wurde mit LimeSurvey durchgeführt. Als Anreiz wurde ein Notenbonus verwendet.

Der Fragebogen enthält einen Teil über Energiebewusstsein (nicht validiert) und einen über die Motivation zur Nutzung von Energieverbrauchsfeedbacksystemen (validiert).

### 6.5.2 Ergebnisse

Der entwickelte Fragebogen misst das Energiebewusstsein und die Motivation von Nutzern für die Anwendung eines Energieverbrauchsfeedbacks im Fahrzeug.

Für die Reliabilitätsprüfung der Skala beträgt die Stichprobengröße  $N = 134$ . Es wurden 248 Personen per E-Mail angeschrieben. Die Probanden waren zwischen 17 und 37 Jahren alt ( $M = 20,43$ ). Es nahmen 29 weibliche und 105 männliche Personen teil. Die Teilnehmer waren im Mittel 3,12 Jahre im Besitz einer Fahrerlaubnis. Im Durchschnitt fahren die Teilnehmer ca. 10.058 km im Jahr, das Minimum lag bei 0 km und das Maximum bei 40.000 km. 47,8 % der Teilnehmer fahren weniger als 5000 km und 20 % fahren mehr als 10.000 km im Jahr. Aufgrund der gefahrenen Kilometer im Jahr und der durchschnittlichen Zeitspanne, seitdem die Fahrer eine Fahrerlaubnis besitzen, muss die Fahrerfahrung als gering angesehen werden. Jedoch fahren 40 % der Teilnehmer einmal oder zweimal in der Woche mit dem Fahrzeug. Bei 5000 km im Jahr entspricht dies einer Fahrleistung zwischen 25 km (bei 200 Tagen) und 50 km (bei 100 Tagen). Die einfache Entfernung vom Marienplatz in München zum Campus in Garching beträgt 19 km.

Bei der Durchführung war auffällig, dass die Teilnehmer bei der Frage 8 häufig nachfragten. Aufgrund einer fehlenden Einteilung nach Kohlendioxid-Klassen war eine Beantwortung der „neuen“ Frage nicht möglich. Die Frage wird daher für die Auswertung nicht herangezogen. Ausreißer wurde keine identifiziert.

Die **Motivationsskala** weist mit einem Cronbach's Alpha von 0,886 eine hohe Reliabilität auf (Bühner 2012). Es wurde keine Frage aus dem motivationalen Teil entfernt, um die Vollständigkeit der Motivationstheorien nicht zu gefährden (Locke 1965, 1966, 1968; Deci/Cascio 1972; Ajzen/Fishbein 1977; Ajzen 1991; Ajzen/Driver 1992; Ajzen 2005; McClelland 1961).

Die **Energiebewusstseinskala** überprüft mit einer EFA in neun iterativen Schritten und einer CFA die Gültigkeit sowie die Reliabilität.

Insgesamt besteht der Fragebogen aus 91 Fragen, davon waren die Fragen mit den Nummern 49 und 66 Kontrollfragen, um sicherzustellen, dass die Teilnehmer den Fragebogen gewissenhaft ausfüllten und die Antworten verwertbar sind. Ohne die demografischen Daten umfasst der Fragebogen 77 Fragen. Die Energiebewusstseinskala basiert auf dem ersten Teil mit 37 Fragen, welche in der Literatur auch als Items bezeichnet werden (Bühner 2012). Vor der Durchführung der EFA wurden die Fragen 8, 9, 11, 14, 15, 17, 18, 30, 36, 37 umcodiert (negative Itemcodierung), um einen auswertbaren Antwortstil zu erhalten.

Die maximale Anzahl an Iterationen für Konvergenz wird auf 25 festgelegt (Bühner 2012, 313,351). Die Anforderungsprüfung der EFA wird mit dem Kaiser-Meyer-Olkin-Kriterium (KMO) durchgeführt. Der KMO beträgt 0,711 und ist als gut anzusehen (Bühner 2012, 347).

In der **ersten Iteration** weisen die Fragen 7 und 26 einen MSA von  $< 0,5$  auf. Die Hauptkomponentenanalyse ergibt insgesamt zwölf Komponenten, die das Eigenwert-größer-eins-Kriterium erfüllen. Diese Komponenten erklären bereits 67,928 % des Modells für eine Energiebewusstseinskala. Die Fragen mit einem niedrigen MSA sowie mit Doppel- und Mehrfachladungen werden genauer untersucht.

Die Fragen 5, 7, 11, 13, 17, 18, 25, 27, 29, 30, 31 und 32 weisen eine Doppel- oder Mehrfachladung auf. Die Frage 7 hat eine 7er-Likert-Skala, jedoch handelt es sich um eine Wissensfrage, bei der eine von sieben Ankreuzmöglichkeiten korrekt ist. Es handelt sich somit um eine nominale Ausprägung, die keine Reihenfolge besitzt. Da dies zu einer Verzerrung führen könnte, wird die Frage 7 entfernt. Der MSA, der Frage 26, ist zu niedrig und diese wird ebenfalls entfernt (Bühner 2012, 356).

Die weiteren Doppel- oder Mehrfachladungen werden auf signifikante Ladungen untersucht. Bei einer Stichprobengröße von  $N = 134$  muss der Wert über 0,512 liegen (Bühner 2012, 371). Die Fragen 11, 25 und 30 luden in zwei und die Fragen 27, 31 und 32 luden in drei Komponenten nicht signifikant und werden entfernt. Die Frage 31 besitzt zusätzlich eine positive und eine negative Ladung, daher wird deren Itempolung überprüft (Bühner 2012, 350). Die Itempolung ließ keinen logischen Fehler erkennen. Bei der Frage 5 ist der Ladungswert mit 0,531 in einer Komponente oberhalb und in der anderen mit 0,457 unterhalb des Grenzwertes. Die Frage wird somit beibehalten. Die Fragen 17 und 18 luden jeweils einmal oberhalb und einmal unterhalb des Signifikanzwertes und werden beibehalten. Die Fragen 13 und 29 liegen in zwei Komponenten unterhalb des Signifikanzwertes und auf einer Komponente oberhalb. Sie werden beibehalten.

Keiner der Kommunalitäten der Hauptkomponentenanalyse hat einen Extraktionswert von kleiner als 0,5. Er gibt somit keinen Indiz für die Entfernung (Bühner 2012).

In der **zweiten Iteration** erhöht sich der KMO auf 0,720. Es wird das Eigenwert-größer-eins-Kriterium angewendet. Die Anzahl der Komponenten verringerte sich auf zehn. Die Komponenten erklären 70,005 % des Modells. Die Rotation konnte jedoch nicht in 25 Iterationen konvergieren und wird auf 50 erhöht.

Die Fragen 5, 9, 12, 13, 15, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 28 und 29 weisen Doppel- oder Mehrfachladungen auf. Die Fragen 12, 15, 18 und 28 weisen in allen Ladungen einen Wert kleiner als der Signifikanzwert auf und werden entfernt. Die Fragen 5, 9, 13, 17, 19, 20, 23 und 29 weisen eine Ladung über dem Signifikanzwert auf. Die anderen Ladungen sind jeweils unter dem Grenzwert. Daher werden diese Fragen beibehalten. Die Frage 22 ist in beiden Komponenten signifikant. Eine genaue Zuordnung ist nicht möglich. Daher werden die Auswirkungen auf den KMO des Modells überprüft; bei der Beibehaltung ergibt sich ein KMO von 0,702 und bei der Entfernung von Frage 22 ein KMO von 0,685. Die Frage 22 wird daher beibehalten.

Bei der **dritten Iteration** ergibt sich ein KMO von 0,702. Die Frage 10 ( $MSA = 0,437$ ) und Frage 26 ( $MSA = 0,360$ ) weisen zu niedrige Werte auf und werden entfernt. Nach dem Eigenwert-größer-eins-Kriterium erklären neun Komponenten 69,763 % des Modells. Die Fragen 5, 13, 17, 19, 21, und 29 weisen Doppel- oder Mehrfachladungen auf. Die Fragen weisen jeweils in einer Komponente eine ausreichend hohe Ladung auf. Aufgrund der Möglichkeit einer eindeutigen Zuordnung zu einer Komponente werden sie beibehalten.

In der **vierten Iteration** verringert sich der KMO auf 0,722. Es erklären acht Komponenten 69,139 % des Modells. Alle MSA-Werte sind  $> 0,5$ . Die rotierte Komponentenmatrix weist Doppel- und Mehrfachladungen bei den Fragen 1, 5, 13, 17, 19, 20, 22, 23, 24 und 29 auf. Einzig die Frage 8 weist eine negative Itempolung auf. Die Kommunalität beträgt 0,446. Es handelt sich bei der Frage 8 um eine spezifische Wissensfrage, welche nicht als zwingend notwendig erscheint. Die Frage 8 wird aufgrund der Kommunalität  $< 0,5$  entfernt.

In der **fünften Iteration** beträgt der KMO 0,729. Das Modell erklärt mit sieben Komponenten 66,835 % des Modells. Alle MSA-Werte sind größer als 0,5. Die Fragen 1, 4, 5, 13, 17, 19 und 29 weisen Doppel- oder Mehrfachladungen auf. Frage 4 weist zusätzlich eine negative und eine positive Itempolung auf sowie eine Kommunalität von 0,478. Zusätzlich weist die Frage 16 eine Kommunalität von 0,446 auf. Beide Fragen werden daher entfernt.

In der **sechsten Iteration** beträgt der KMO 0,734. Das Modell erklärt mit sieben Komponenten 70,961 % des Modells. Keine Frage weist einen MSA von kleiner als 0,5 auf. Die Fragen 5, 17, 19 und 29 weisen Doppel- oder Mehrfachladungen auf. Die Komponente kann jedoch eindeutig zugeordnet werden. Die Kommunalitäten sind größer als 0,5. Fraglich weisen die Komponenten 5, 6 und 7 jeweils nur zwei Fragen auf. Daher werden die Screeplots der Eigenwerte nach Faktoren genauer betrachtet (Bühner 2012, 320 ff.). Der „Knick“ liegt bei 5. Daher wird eine weitere Faktoranalyse mit fester Komponentenanzahl 5 durchgeführt.

Bei fünf festen Komponenten beträgt der KMO 0,734. Es werden 60,227 % des Modells erklärt. Alle MSA Werte sind größer als 0,5. Keine der Komponenten besitzt weniger als vier Fragen. Die Fragen 9, 19, 29, 36 und 37 weisen Doppel- oder Mehrfachladungen auf. Die Fragen 9, 19 und 29 lassen sich durch eine ausreichend hohe Ladung jeweils eindeutig einer Komponente zuordnen. Die Fragen 36 und 37 lassen sich nicht eindeutig zuordnen und werden daher entfernt. Die Fragen 6, 9 und 36 weisen Kommunalitäten von  $< 0,5$  auf und werden daher ebenfalls entfernt.

In der **siebten Iteration** mit fünf festen Komponenten beträgt der KMO 0,738. Es werden 67,539 % des Modells erklärt. Die Fragen 13 und 29 besitzen Doppelladungen lassen sich jedoch eindeutig zuordnen. Ein Herausnehmen der Fragen verschlechtert den KMO auf 0,712. Die Fragen bleiben somit im Modell. Alle Kommunalitäten der Fragen sind größer als 0,5. Es entstehen somit fünf Komponenten.

- 1) Die *Komponente 1* enthält die Fragen 13, 22, 23, 24 und 29, welche sich mit der Umwelt und dem eigenen Verhalten oder Denken über Energieeffizienz beschäftigen, daher wird diese Komponente „Eco Denken“ genannt.
- 2) Die *Komponente 2* enthält die Fragen 1, 2, 3 und 5. Die Fragen befassen sich mit dem Energiebewusstsein im Allgemeinen und zielen auf Wissensfragen ab. Deshalb wird diese Komponente „Eco Wissen“ genannt.
- 3) Die *Komponente 3* enthält die Fragen 33, 34 und 35, welche Verbräuche erheben. Die Komponente wird demgemäß „Eco Verbrauch“ genannt.
- 4) Die *Komponente 4* enthält die Fragen 19, 20 und 21. Diese beschäftigen sich mit spezifischem Energieverhalten oder Eigenschaften des Verhaltens im Zusammenhang mit Fahrzeugen und wird folglich „Eco Fahren“ genannt.
- 5) Die *Komponente 5* enthält die Fragen 14 und 17, welche mit dem Energieverhalten im Allgemeinen zu tun haben. Die Komponente wird als „Eco Sein“ bezeichnet. Komponenten mit zwei Fragen haben eine geringe Reliabilität (Bühner 2012, 367-268).

Es liegen nun Erkenntnisse über die Struktur vor und es ist zu analysieren, ob die Fragen auf dem entsprechenden Faktor (in diesem Fall Komponente) laden (Bühner 2012, 321). Für die Prüfung wird eine konfirmatorische Faktorenanalyse (CFA) durchgeführt. Die CFA bewertet die Inhaltsvalidität des Kriteriums und des Konstrukts (Konvergenz, Divergenz und Faktor). Des Weiteren erlaubt die CFA die Überprüfung von Kovarianzen und Korrelationen zwischen den Fragen (Bühner 2012, 380).

Es wird ein dreistufiger Ansatz verwendet. Auf der ersten Stufe wird das Messmodell aufgestellt, auf der zweiten werden die Strukturgleichungen und abschließend die Identifikationsgleichungen gelöst (Bühner 2012, 383). Die Stufen zwei und drei werden iterativ durchlaufen, um die Diskrepanz zwischen sogenannter modellimplizierter und empirischer Kovarianz zu minimieren (Bühner 2012, 383).

Die erste Analyse der CFA zeigt, dass die Kovarianzen zwischen den einzelnen Komponenten weniger als 0,3 aufweisen, bis auf eine Kovarianz mit dem Wert von 0,51 zwischen Eco Denken und Eco Verbrauch.

Zusätzlich wird der Mardia-Test verwendet, um zu erkennen, ob die Beantwortung der Fragen univariant oder multivariant normalverteilt ist (Bühner 2012, 441-448). Die multivariante fällt mit der Kurtosis von 32,465 hoch aus und der z-Wert weist eine Verletzung der multivarianten Normalverteilung auf (Bühner 2012, 448). Die Betrachtung zeigt, dass die Fragen 24 (Schiefe = -1,538, critical ratio = -7,268) und 29 (Schiefe = -1,138, critical ratio = -5,378) linksschief verteilt sind. Der Grenzwert für den critical ratio liegt bei 1,96 (Bühner 2012, 448). Außerdem sind die Werte der Fragen 17, 21, 33, 13, 22 und 23 größer als der Grenzwert von 1,96 ( $\alpha = 0,05$ ). Nach Bühner (2012) ist in diesem Fall die Bollen-Stine-Bootstrap-Korrektur

vorzunehmen. Die Bollen-Stine-Bootstrap-Korrektur wird entlang der Maximum-Likelihood-Methode durchgeführt, die für Datensätze mit moderaten Stichprobengrößen angewendet werden kann (Bollen/Stine 1992). Die Anzahl der Bootstrap-Stichproben wurde auf 1000 erhöht (Bühner 2012, 441). Die Stichprobengröße kann die Ergebnisse der Bollen-Stine-Bootstrap-Korrektur leicht variieren lassen (Bühner 2012, 442). Der Modelltest weist einen  $\chi^2[df = 109] = 256,480$  mit einem p-Wert von 0,000 auf. Die Bollen-Stine-Bootstrap-Korrektur hat einen p-Wert von 0,001 und der Modell-Fit ist bei 1000 Bootstramps-Proben besser, somit verbessert sich der p-Wert. Die Frage 14 weist mit 0,35 eine zu niedrige Ladung auf. Die Entfernung führt dazu, dass die gesamte Komponente Eco Sein nicht mehr sinnvoll ist. Vor der Entfernung dieser Frage wurden die Kovarianzen der einzelnen Fragen zueinander betrachtet. Eine sehr hohe Kovarianz weist e1 und e3 mit 35,725 auf. Für eine Spezifizierung des Modells wird eine zusätzliche Verbindung zwischen e1 und e3 eingefügt.

In der **ersten Iteration** ist der Modelltest mit einem  $\chi^2[df = 83] = 163,410$  signifikant ( $p = 0,000$ ). Die Bollen-Stine-Bootstrap-Korrektur hat einen p-Wert von 0,007. Der Modell-Fit ist bei 994 Bootstramps-Proben besser, somit verbessert sich der p-Wert. Im nächsten Schritt werden die Modifikationsindizes mit Werten größer als 3,84 eingehender betrachtet, um weitere mögliche Kovarianzen zu identifizieren, welche zu einer signifikanten Verbesserung des Modells führen (Bühner 2012, 454). Eine Kovarianz liegt zwischen e7 und e9 mit 5,724 vor.

In der **zweiten Iteration** ist der Modelltest mit einem  $\chi^2[df = 82] = 150,598$  signifikant ( $p = 0,000$ ). Die Bollen-Stine-Bootstrap-Korrektur hat einen p-Wert von 0,011 und der Modell-Fit ist bei 990 Bootstramps Proben besser, somit verbessert sich der p-Wert erneut. Zusätzlich sind die Modell-Fit-Parameter zu testen. Dazu wird der Goodness of Fit Index (GFI) herangezogen (Bühner 2012). Der GFI zeigt bei einem Wert von größer als 0,9 an, dass ein Modell akzeptiert werden kann (Baumgartner/Homburg 1996). Der GFI liegt bei 0,871 und ist unterhalb des Grenzwertes, somit ist das Modell weiter zu spezifizieren. Der Comparative-Fit-Index (CFI) ist mit 0,915 unterhalb der Grenze von 0,95 (Bühner 2012, 456) und folglich akzeptabel. Es werden daher die standardisierten Residuen eingehender betrachtet, um mögliche Über- und Unterschätzungen zu identifizieren. Die Werte geben z-Werte wieder und die Signifikanzgrenze liegt bei  $|1,96|$  (Bühner 2012, 440). Dies ist zwischen den Fragen 29 und 33 mit 2,371, den Fragen 29 und 34 mit 2,169 sowie den Fragen 3 und 23 mit -2,343 der Fall. Zusätzlich weisen die Fragen 19, 20, 21 und 29 eine niedrige Ladung auf und werden daher entfernt.

In der **dritten Iteration** ist der Modelltest mit einem  $\chi^2[df = 38] = 74,330$  signifikant ( $p = 0,000$ ). Die Bollen-Stine-Bootstrap-Korrektur hat einen p-Wert von 0,010 und der Modell-Fit ist bei 991 Bootstramps-Proben besser, folglich verbessert sich der p-Wert gegenüber dem Wert ohne Korrektur. Die Anzahl der Freiheitsgrade liegt somit zwischen den Grenzwerten 28 und 66. Es sind folgende Modifikationsindizes auffällig e6 zu e8, e6 zu e9 und e7 zu e9. Diese Kovarianzen werden dem Modell hinzugefügt. Die Modell-Fit-Werte sind mit einem GFI = 0,911 und CFI = 0,945 innerhalb der Toleranzen. Dies zeigt, dass das Modell akzeptiert werden kann (Bühner 2012, 456). Der PClose Wert beträgt 0,027 mit einem mittleren quadratischen Fehler der Näherung (RMSEA) von 0,085. Der RMSEA liegt damit innerhalb der Grenzwerte des Konfidenzintervalls von 90. Die untere Grenze (LO 90) beträgt 0,056 und die obere

Grenze (HI 90) beträgt 0,113. Der PClose Wert ist nicht innerhalb der empfohlenen Grenzen von 0,5 und 1. Ein exakter Modell-Fit liegt somit nicht vor (Bühner 2012, 461). Zusätzlich führt Bühner (2012) bei mehr als einem Faktor (Komponente), wie es bei dieser CFA der Fall ist, den sogenannten SRMR-Wert ein. Der SRMR-Wert beträgt 0,0793 und liegt somit unterhalb der Grenze von 0,11 sowie den geforderten Cut-off-Werten für die RMSEA von 0,08 (Bühner 2012, 458). Insgesamt liegt nach Bühner (2012) für ein Modell mit mehreren Faktoren ein exakter Modell-Fit vor. Die Frage 1 weist eine standardisierte Residuen-Kovarianz von 3,734 in Bezug auf Frage 13 auf. Sie liegt oberhalb des Grenzwertes von 1,96 ( $\alpha = 0,05$ ). Die Skala ist somit multivariant normalverteilt. Die Fragen 1 und 13 weisen ein hohes Regressionsgewicht von 3,734 auf. Frage 1 hat Kovarianzen zu den Fragen 3 und 5 sowie eine standardisierte Ladung von 0,55. Frage 13 hat eine standardisierte Ladung von 0,86. Die Komponenten Eco Denken und Eco Wissen weisen beide vier Fragen auf und sind demnach gleich verteilt. Daher wird explorativ eine vierte Iteration durchgeführt, bei der die Frage 1 entfernt wird.

In der **vierten explorativen Iteration** ist der Modelltest mit einem  $\chi^2[df = 31] = 52,882$  signifikant ( $p = 0,008$ ). Die Bollen-Stine-Bootstrap-Korrektur ist ebenfalls signifikant ( $p = 0,043$ ) und der Modell-Fit ist bei 958 Bootstramps-Proben besser. Somit verbessert sich der p-Wert im Vergleich zu allen bisherigen Untersuchungen hier am stärksten. Die Anzahl der Freiheitsgrade liegt zwischen den Grenzwerten von 24 und 55. Der GFI liegt mit 0,926 über dem Grenzwert von 0,9 und das Modell kann folglich akzeptiert werden (Baumgartner/Homburg 1996). Der CFI beträgt 0,963 und ist damit oberhalb der Grenze von 0,95 (Bühner 2012, 456). Dies bedeutet, dass das Modell nicht akzeptiert werden kann. Der RMSEA liegt mit dem Wert von 0,073 zwischen den Grenzwerten des Konfidenzintervalls 90 (LO 90 = 0,037, HI 90 = 0,106). Der PClose beträgt 0,130 und ist unterhalb des Grenzwertes für ein akzeptables Modell. Für die weitere Prüfung wird das Ergebnis der dritten Iteration herangezogen.

Die *Reliabilität* der drei Teilskalen (Eco Denken, Eco Wissen und Eco Verbrauch) der Energiebewusstseinskala weisen alle ein Cronbach's Alpha von mindestens 0,8 auf. Dies deutet auf eine akzeptable Reliabilität hin (0,824, 0,707 und 0,855 mit  $N = 134$ , Durchschnitt: 0,807) (Bühner 2012; Nunnally 1978). In Tabelle 19 ist die Energiebewusstseinskala mit den Auswertungsdaten dargestellt.

Item (Fragen-Nr.)	Eco Denken		Eco Wissen		Eco Verbrauch		$\alpha$	
	$h^2$	$\alpha$	$h^2$	$\alpha$	$h^2$	$\alpha$		
ED1 (Frage 13)	0,519	0,824					0,807	
ED2 (Frage 22)	0,789							
ED3 (Frage 24)	0,770							
ED4 (Frage 23)	0,592							
EW1 (Frage 1)			0,746	0,707				
EW2 (Frage 2)			0,737					
EW3 (Frage 3)			0,679					
EW4 (Frage 4)			0,589					
EV1 (Frage 33)					0,782	0,855		
EV2 (Frage 34)					0,810			
EV3 (Frage 35)					0,716			
Varianz	19,579 (SD = 4,425)		22,072 (SD = 4,698)		19,723 (SD = 4,441)			
	98,808 (SD = 9,940)							

Tabelle 19: Energiebewusstseinskala

Quelle: Eigene Darstellung,  $N = 134$ ,  $\alpha$  = Cronbach's Alpha, ED = Eco Denken, EW = Eco Wissen, EV = Eco Verbrauch (Fragen im Detail in Anhang A in Tabelle 35)

Abschließend sind die Inhalts-, Kriteriums- und Konstruktvalidität zu prüfen, um herauszufinden, inwieweit der Test das misst, was er messen sollte (Bühner 2012, 61). Die **Inhaltsvalidität** bezieht sich auf das Ausmaß, in dem die zu messenden Merkmale hinsichtlich des Tests selbst und aller Fragen hinreichend genau sind (Bühner 2012, 61-62). Bei der Energiebewusstseinskala wurden Inhaltsfragen beim Card Sorting mit Experten (Moore/Benbasat 1991) direkt geklärt und im demografischen Teil zusätzlich eine Verständnisfrage gestellt: „Did you have serious language difficulties?“. Keiner der Teilnehmer gab an Schwierigkeiten gehabt zu haben, die Konstrukte und die damit verbundenen Fragen zu verstehen. Die Inhaltsvalidität der Messgröße der Motivation wird aufgrund der Validierungsbeiträge von Barbuto/Scholl (1998), Williams/Deci (1996), Williams et al. (1998a) und Williams et al. (1998b) als gegeben angesehen. Die **Kriteriumsvalidität** kann erst nach dem Experiment gemessen werden. Erst dann kann festgestellt werden, ob die Probanden energiesparend fahren. Die Kriteriumsvalidität gibt an, wie zutreffend die Vorhersage des Modells ist (Bühner 2012, 63). Dies ist nicht mehr Gegenstand der Arbeit. Für die **Konstruktvalidität** ist der Multitrait-Multimethod-Ansatz vorgesehen. Jedoch ist er aufgrund der teilweise geringen Cronbach's Alpha Werte und der geringen Aussagekraft des Modells nicht anwendbar (Bühner 2012, 64 ff.). Folglich kann eine diskriminierende und konvergente Gültigkeit nicht gemessen werden (Bühner 2012, 64).

Zusammenfassend erklären drei ermittelte Komponenten 70,261 % des Modells. Die entwickelte Energiebewusstseinskala zeigte eine durchschnittliche Reliabilität von 0,807. Trotz der fehlenden passenden Werte für den PClose-Wert ist der entwickelte Fragebogen zufriedenstellend. Drei Konstrukte (Eco Denken, Eco Wissen und Eco Verbrauch) beinhalten elf Fragen, um das Energiebewusstsein zu beurteilen. Der entwickelte Fragebogen ist konstruktiv valide und stellt die Motivation sowie das energiebewusste Verhalten von Autofahrern auf einer Energiebewusstseinskala dar.

## 6.6 Diskussion

Im Wesentlichen repräsentieren zwei Domänen den Bereich zur Entwicklung des Erhebungsinstrumentes zur Messung des Energiebewusstseins: die Verhaltensdomäne und die Wirtschaftsinformatik.

In der **Domäne der Wirtschaftsinformatik** wird ein Erhebungsinstrument zum Energiebewusstsein entwickelt und validiert. Die durchgeführte EFA (Varimax Rotation, Eigenwert größer eins Kriterium) führt zu elf Fragen, eine Verringerung um 71,27 % (vorher 37 Fragen). Die elf Fragen teilen sich in drei Komponenten auf: Eco Denken (vier Fragen), Eco Wissen (vier Fragen) und Eco Verbrauch (drei Fragen).

Die EFA zeigte eine Reduzierung von 37 Fragen auf elf Fragen. Eine weitere Entfernung von Fragen aus dem Modell hätte zur Folge, dass die Anzahl der Fragen je Komponente zu gering wird (Bühner 2012, 432). Bühner (2012) empfiehlt die Anzahl von mindestens vier, was nur bei zwei Komponenten der Fall ist. Daher wird auf eine weitere Entfernung von Fragen verzichtet. Jedoch zeigt die kurze explorative Untersuchung, dass das Modell generell geeignet erscheint.

Bühner (2012) empfiehlt für eine CFA eine Stichprobengröße von 200 bis 250. Dies sind mehr als die bisherigen 134 und kann zu einer Verzerrung führen. Das Minimum liegt bei  $N = 100$  Teilnehmern (Bühner 2012, 433). In einer zukünftigen Arbeit ist die Anzahl der Stichprobengröße zu erhöhen. Für die Erhöhung der Stichprobenanzahl kann bei den Experimenten der vollständige Fragebogen herangezogen werden, sodass sich die Stichprobengröße erhöht. Eine zusätzliche Validierung ist folglich erst bei Erreichung der entsprechenden Anzahl an Teilnehmern nach Durchführung der Experimente möglich. Mit G\*Power kann eine Analyse zur Stichprobengröße durchgeführt werden (Faul et al. 2007) und ergibt bei einer mittleren Effektgröße von 0,3 ( $\alpha = 0,05$ ) mit der Power von 0,90 bei den berechneten Freiheitsgraden von 1,493 unter Verwendung des GFI für eine a priori berechnete Stichprobengröße eine Gesamtgröße von mindestens 117 Teilnehmern. Weiterhin wurde die Bollen-Stine-Bootstrap-Korrektur angewendet, die für „moderate Stichprobengrößen verwendet werden kann (Bollen/Stine 1992). Die Stichprobengröße des Fragebogens könnte zu gering sein, insbesondere, wenn die Anzahl der Komplemente bei fünf oder gar drei liegt.

Aufgrund der geringen Stichprobengröße war es auch nicht möglich, die divergente und konvergente Validität zu überprüfen. Mit der G\*Power-Analyse (Faul et al. 2007) ergibt sich bei einer mittleren Effektgröße von 0,3 ( $\alpha = 0,05$ ) mit der Power von 0,90 bei den berechneten Freiheitsgraden von 38 unter Verwendung des GFI für eine a priori berechnete Stichprobengröße eine Gesamtgröße von mindestens 370 Teilnehmern. Erst bei einer Effektgröße von 0,5 sind 134 Teilnehmer ausreichend. Wäre die Effektgröße klein (0,1), wäre sogar eine Stichprobengröße von 3327 erforderlich.

Weiterhin wurde die Bollen-Stine-Bootstrap-Korrektur angewendet, die für „moderate“ Stichprobengrößen verwendet werden kann (Bollen/Stine 1992). Die Stichprobengröße des Fragebogens ist somit zu gering. Jedoch sollte eine kurze explorative Untersuchung durchgeführt werden, ob das Modell generell geeignet erscheint.

Relevante Werte wurden aufgrund der in Bühner (2012) aufgeführten Grenzen und Modell-Fit-Funktionen ermittelt (Wunderlich et al. 2013b; Wunderlich et al. 2013a). Einzig der PClose Wert bleibt in der Iteration 3 unterhalb der gewünschten Grenze. Dies spricht für eine Ablehnung des Modells. Demgegenüber stehen jedoch ein GFI und ein CFI, welche sich beide in den Grenzen nach Bühner (2012) befinden. Eine vollständige Ablehnung ist somit nicht möglich.

Frage 1 weist geringe Ladungen auf. Die Überprüfung in einer explorativen Iteration 4 zeigte jedoch keinen Mehrwert in den Modell-Fit-Funktionen. Die Frage 4 lädt im Modell nur mit einer Kommunalität von 0,519, besser wäre mindestens ein Wert von 0,6 (Bühner 2012). Die Fragen 5 und 24 weisen ebenfalls einen Wert niedriger als 0,5 auf. Dies kann an der geringen Fallzahl liegen. Werte ab 0,8 gelten als gut. Dieser Wert wird nur bei der Frage 34 des Komplementes Eco Verbrauch erreicht (Bühner 2012).

Die Iteration 3 der CFA weist den besten Modell-Fit auf und wird für die Experimente herangezogen.

Der entwickelte Fragebogen könnte eine andere Form haben, wenn andere Grenzwerte herangezogen werden, wie ein KMO von 0,6. Die CFA, welche nach Levesque et al. (2007), Ragu-Nathan et al. (2008), Salisbury et al. (2002) sowie Hu/Bentler (1999) durchgeführt wurde, hatte zur Folge, dass zwei Komponenten entfernt wurden.

Bei Betrachtung des Scree-Diagramms zeigt sich an der dritten Stelle ein „Knick“. Allerdings befindet sich dieser deutlich oberhalb von eins, sodass in der ersten Sichtung die Entscheidung für drei Komponenten nicht erkennbar ist und nach dem Eigenwert-größer-eins-Kriteriums nicht erforderlich war. Für eine Erhöhung der Fragen je Komponente und um möglichst nahe an die geforderten vier Fragen nach Bühner (2012) heranzukommen, wird im Weiteren mit diesen drei Komponenten die Energiebewusstseinskala ermittelt.

Die Reliabilität wies ein anfängliches Cronbach's Alpha von 0,886 auf und nach der EFA sowie der CFA ein Cronbach's Alpha von 0,807. Somit ist eine verlässliche Reliabilität gegeben. Die Inhaltsvalidität ist ebenfalls gegeben. Die Korrelation ist mit mehreren bekannten Psychometrien untersucht worden. Das Erhebungsinstrument zur Messung des Energiebewusstseins erfüllt seinen Zweck. Es ist jedoch offen, wie die einzelnen Fragen mit der Motivation interagieren und wie die Energiebewusstseinskala zur Vorhersage des Energieverbrauchs genutzt werden kann.

In der **Verhaltensdomäne** wird ein intrinsisches und extrinsisches motivationsbasiertes Messinstrument adaptiert, um die mit Motivation verbundenen Gründe des Energieverbrauchs zu bestimmen. Dies umfasst den zweiten Teil des Erhebungsinstrumentes. Das Erhebungsinstrument ist in diesem Teil in 52 Fragen unterteilt: in Instrumental Motivation (basierend auf dem MSI), externe selbstkonzept-basierte Motivation (External Self-Concept-Based Motivation, basierend auf dem MSI), interne selbstkonzept-basierte Motivation (Internal Self-Concept-Based Motivation, basierend auf dem MSI), Ziel-Internalisierung (Goal Internalization, basiert auf dem MSI), Kompetenz (Perceived Competence, basiert auf dem MSI) und Selbstregulierung (basiert auf dem MSI). Diese Teile beruhen auf validierten Erhebungsinstrumenten. Aufgrund dieser Tatsache wurde keine EFA oder CFA durchgeführt. Die Reliabilität weist einen Wert  $\alpha = 0,886$  (Stichprobe:  $N = 134$ ) auf. Dies ergibt sich aus sechs sub- $\alpha$ : IM- $\alpha = 0,706$ , ESCM- $\alpha = 0,751$ , ISCM- $\alpha = 0,752$ , GI- $\alpha = 0,767$ , PC- $\alpha = 0,909$  und SR- $\alpha = 0,778$ . Das Gesamt-Alpha würde leicht ansteigen, wenn die Fragen 50 (externe selbstkonzept-basierte Motivation- $\alpha_2 = 0,827$ ), 56 (interne selbstkonzept-basierte Motivation - $\alpha_2 = 0,775$ ) und 68 (Selbstregulierung- $\alpha_2 = 0,782$ ) entfernt würden. Jedoch werden alle Fragen aufgrund des Ziels von Integrität von Modellfragebögen (Barbuto/Scholl 1998; Deci et al. 1989) beibehalten.

Der entwickelte Umfragebogen differenziert nicht zwischen dem Interesse für Informationssysteme und der Nutzung eines Energieverbrauchsfeedbacksystems. Beispielsweise kann das Infotainment-System des Fahrzeugs genutzt werden, um den Energieverbrauch mit Freunden zu vergleichen, aber das Energieverbrauchsfeedbacksystem wird selbst nicht verwendet, um den Verbrauch zu reduzieren. Der Fragebogen gibt auch keine Auskunft über Langzeiteffekte zur Nutzung. Der Umfragebogen geht davon aus, dass jeder, der ein Energieverbrauchsfeedbacksystem nutzt, sich automatisch für die Überwachung und den zu

reduzierenden Energieverbrauch interessiert. Ein Ansatz könnte sein, eine neue Fragenkategorie einzuführen, die diese Tatsache misst.

Die etablierte Energiebewusstseinskala und deren Korrelation wurde mit mehreren Psychometrien gezeigt. Allerdings ist die Interaktion mit jeder Metrik und die Nutzung zur Vorhersage des Energieverbrauchs offen. In künftigen Forschungsarbeiten sollten Untersuchungen durchgeführt werden, um den resultierenden Umfragebogen mit einer größeren Stichprobenanzahl zu validieren.

Zusätzlich sollten die Teile der Motivation und des Energiebewusstseins von Experten der Psychologie eingehender untersucht werden, um noch validere Erkenntnisse zu gewinnen.

## **6.7 Zusammenfassung**

Es ist ein umfangreicher Fragebogen validiert worden, welcher eine generelle Messung des Energiebewusstseins und der Nutzungsmotivation mit jeweils einer Skala ermöglicht. Der Motivationsteil ist bereits validiert und kann somit für die Experimente herangezogen werden. Die Ergebnisse der Energiebewusstseinskala sind mit Einschränkungen zu betrachten, da eine Validierung eine höhere Stichprobengröße erfordert. Es wird vorausgesetzt, dass eine Person mit einer hohen Motivation zum Energiesparen auch ein hohes Energiebewusstsein besitzt.

Der Fragebogen hat insgesamt 92 Fragen, davon zwei Kontrollfragen für den Notenbonus. Die EFA mit PCA führt zu einer Reduzierung der Anzahl der Fragen, sodass nur 66 Fragen gestellt werden würden. Bei der Verwendung des Umfragebogens mit 92 Fragen kann die Stichprobengröße in den Experimenten erhöht werden, um die Validität zu verbessern. Hingegen könnten wichtige Fragen bei der Verwendung des Fragebogens mit 66 Fragen für eine Auswertung und somit eine Verbesserung der Validität fehlen. Bei den Experimenten wird der gesamte Fragebogen herangezogen, um die Stichprobengröße zu erhöhen.

Das allgemeine Alpha von 0,807 und 0,886 spiegelt eine teilweise konsistente Arbeit wieder. Jedoch weist es auf weiteres Potenzial hin, um ein Cronbach's Alpha von größer als 0,9 zu erhalten. Für die CFA war für die Stichprobengröße nach der G\*Power Analyse zu gering (Faul et al. 2009). Daher konnte die divergente und konvergente Validität nicht überprüft werden.

Der Fragebogen wurde online mit LimeSurvey veröffentlicht. LimeSurvey stellt eine unkontrollierte Umgebung dar. Jeder Teilnehmer konnte mit dem Link an der Umfrage teilnehmen. Den Teilnehmern wurde ein individuelles Token erstellt. Eine doppelte Teilnahme wurde somit ausgeschlossen. Doppelte Antworten wurden von den gleichen Teilnehmern mithilfe der Verwendung von beispielsweise Cookies ausgeschlossen. Für den Online-Fragebogen stand eine längere Zeitspanne zur Verfügung als für das Ausfüllen des Papierfragebogens. Die Bedingungen bei der Durchführung des Fragebogens waren somit andere. Die Motivation, den Fragebogen wegen des Notenbonus zu beantworten (Stichprobe  $N = 134$ ), könnte die Antworten beeinflussen und damit zu verzerrten Annahmen führen.

Der Einsatz des Fragebogens ist auf den Automobilbereich beschränkt. Es stellt sich hier die Frage nach einer verfeinerten, allgemeingültigeren Version des Erhebungsinstruments.

## 7 Umsetzung im Fahrsimulator

Für die Umsetzung im Fahrsimulator wird auf das Messmodell aus Kapitel 5 zurückgegriffen, um die Feedbacksysteme aus Kapitel 3 experimentell zu überprüfen. Dazu sind im nächsten Schritt die Dimensionen aus dem Messmodell eingehender auf die Umsetzungsmöglichkeiten im Fahrsimulator hin zu untersuchen.

### 7.1 Messmodells zur Messung des Konstruktes energiebewusstes Fahren

Es konnten sechs Dimensionen: antizipatives Fahren, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Verzögerung, Gangschaltung und Motordrehzahl identifiziert werden, welche durch menschliches Verhalten direkt die primäre Fahraufgabe beeinflussen.

**Antizipatives Fahren** kann im Fahrsimulator implementiert werden, da alle Einflüsse bekannt sind. Somit kann für die zu fahrende Strecke im Vorfeld entschieden werden, ob der Fahrer die Geschwindigkeit verlangsamen oder erhöhen muss. Durch die Experteninterviews konnte festgestellt werden, dass eine vorausschauende Fahrweise zu einem optimalen Energieverbrauch führen kann. Die Untersuchung des Modells hat gezeigt, dass für die in dieser Arbeit vorzunehmende Untersuchung der Unterschied zwischen dem optimalen und dem aktuellen Fahrstil als Feedback an den Fahrer weitergegeben werden kann. Die Weitergabe erfolgt mit Event-basierten Triggern, somit ist die Dimension des antizipativen Fahrens vorgegeben.

Daraus ergeben sich die zu optimierenden Formeln, welche sich auf den Energieverbrauch beziehen, für die verbleibenden fünf Dimensionen:

$$\Delta Acc = Acc_{vec} - Acc_{opt} \quad 7.1$$

$$\Delta Dec = Dec_{vec} - Dec_{opt} \quad 7.2$$

$$\Delta Ge = Ge_{vec} - Ge_{opt} \quad 7.3$$

$$\Delta ES = ES_{vec} - ES_{opt} \quad 7.4$$

$$\Delta Sp = Sp_{vec} - Sp_{opt} \quad 7.5$$

Die **Dimension Beschleunigung** hat direkt mit dem Gaspedal und dessen Winkel zu tun. Das umzusetzende visuelle Feedback beruht auf den Erkenntnissen von Jamson et al. (2015a). Somit sind für die Beschleunigung zwei verschiedene Komponenten zu unterscheiden: konstant und nicht-konstant. Der Wechsel von einer konstanten in eine nicht-konstante Phase wird einem bestimmten Zeitpunkt zugeordnet. Der Zeitpunkt des Wechsels kann im Fahrsimulator mit Triggern umgesetzt werden.

Die **Dimension Verzögerung** beinhaltet passive und aktive Bremsmanöver. Beim aktiven Bremsvorgang führt jedes Bremsen zu einem erhöhten Kraftstoffverbrauch. Ursprünglich stammt der Verbrauch von einer zu starken Beschleunigung.

Für ein Feedback wäre eine zusätzliche Anzeige für das Bremspedal notwendig. Die Anzeige erfordert das von Jamson et al. (2015a) verwendete Feedbacksystem abzuändern. Das Feedback kann damit nicht mehr verglichen werden. Zusätzlich führt dies zu nicht lösbaren Problemen

mit dem haptischen Feedback, da auf der Smartwatch das Signal nur durch Vibrieren wiedergegeben werden kann. Unterschiedliche Signale oder Feedbackvarianten, wie Vibrationsmuster, würden die Dauer des Feedbacks erhöhen. Eine Durchführung in angemessener Zeit, d. h. eine Realisierung ohne signifikanten Einfluss auf das visuelle Feedback, wäre zu prüfen. Unabhängig vom Einfluss auf das visuelle Feedback wird für haptische Varianten des Feedbacks vom Menschen eine Eingewöhnungszeit benötigt. Eine ausreichende Lernzeit für das Feedback während der Versuche steht im Widerspruch damit, dass die Dauer der Experimente möglichst klein gehalten werden sollte.

Zur Reduzierung der Komplexität wird daher im ersten Schritt der Erforschung des Feedbacks mittels Smartwatch auf die Darstellung der Dimension Verzögerung verzichtet.

Die **Dimension Geschwindigkeit** führt nicht nur durch die Verwendung verschiedener Getriebe zu unterschiedlichen optimalen Geschwindigkeiten, sondern auch zu einem Optimum beim jeweiligen Gang. Der Gang spielt aufgrund der Verwendung eines Automatikgetriebes in der Simulation und der im Fahrsimulator verwendeten Umsetzung nach der US Environmental Protection Agency (EPA) von Nam/Giannelli (2005) eine untergeordnete Rolle.

Für die Geschwindigkeit bedeutet es, dass Trigger verwendet werden, welche die maximale zulässige Geschwindigkeit an das Feedbacksystem senden. Ein entsprechendes Feedback wird beim Überschreiten der Geschwindigkeit mit einem roten Fuß angezeigt (Jamson et al. 2015a) und für das haptische Feedback über eine Vibration der Smartwatch gegeben.

Die **Dimension Gangschaltung** ist im Fahrsimulator wegen der Simulation des Automatikgetriebes nicht relevant. Das Automatikgetriebe schaltet in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und der Motordrehzahl. Folglich kann von einem optimalen Gang ausgegangen werden. Die Dimension ist nicht weiter zu berücksichtigen.

Die **Dimension Motordrehzahl** ist abhängig von den Dimensionen Geschwindigkeit, Beschleunigung, Verzögerung und Gangschaltung. Da nur die Dimensionen Geschwindigkeit, Beschleunigung und Verzögerung im Experiment von Bedeutung sind und die Motordrehzahl somit ein Ergebnis der Verwendung dieser ist, kann auf die Aufzeichnung verzichtet werden.

Es lässt sich festhalten, dass in Anlehnung an Jamson et al. (2015a) eine visuelle Anzeige umgesetzt wird. Jamson et al. (2015a) benutzt jedoch nur den Pedalwinkel des Gaspedals, um die Anzeige zu verändern<sup>10</sup>. Die weiteren Dimensionen werden für das visuelle Feedbacksystem nicht verwendet. Für die Umsetzung des haptischen Feedbacksystems werden die gleichen Parameter wie für das visuelle herangezogen. Somit sind die Grundvoraussetzungen zur Umsetzung des Messmodells im Fahrsimulator und der Software gegeben. Im Abschnitt 7.2 kann die Messung des Energieverbrauchs im Fahrsimulator näher untersucht werden.

---

<sup>10</sup> Für die genauen Werte siehe Abschnitt 3.4.1 oder (Jamson et al. 2015a)

## 7.2 Messung des Energieverbrauchs

Die Messung des Energieverbrauchs ist von den Energieverbrauchswerten in der Fahrsimulationssoftware OpenDS abhängig. Die Verwendung der Werte in OpenDS wird eingehender untersucht.

In OpenDS 3.5 sind zehn unterschiedliche Fahrzeugmodelle implementiert: BMW 1er, Audi S6, Citroen C4, Ferrari, Fahrzeug der Müllabfuhr, John Deere 7530, Polizeifahrzeug, Tatra T3, Chevy und ein Mitsubishi. Für eine genaue Messung der Ergebnisse ist die Spezifizierung des Fahrzeugtyps erforderlich. Dazu wird der BMW 1er herangezogen und an die technischen und physischen Spezifikationen eines BMW 1.18 angepasst, soweit es OpenDS zulässt.

Für das Verständnis des Energieverbrauchs ist es notwendig, die Programmierung in OpenDS näher zu betrachten. Es gibt zwei Formeln der EPA für die Kraftstoffarten Benzin und Diesel (Nam/Giannelli 2005). Der Energieverbrauch wird in einer Unterklasse *computeFuelConsumption* über die Motorleistung, welche in der Software mit *PEngine* bezeichnet ist, die vergangene Zeit (*deltaT*) und den unteren Heizwert (*lowerHeatValue*) berechnet. Des Weiteren berücksichtigt ein Faktor (*getExtraFuelFactor*) zusätzliche Verbräuche, welche durch die RPM, d. h. die durch den Motor notwendige Leistung *P* ermittelt werden. Beispielsweise benötigt der Motor bei hohen Drehzahlen mehr Kraftstoff.

Es stellt sich die Frage, wie die Umsetzung der Motorleistung erfolgt. In der Klasse *PEngine* wird die dem Motor zur Verfügung gestellte Kraft in kJ/s berechnet. Die Kraft des Motors ist von zwei Komponenten von den Umdrehungen pro Sekunde abhängig. Zum einen durch den effektiven Mitteldruck (bmep), der durch ein Polynom siebter Ordnung mithilfe der Umdrehungen pro Sekunde berechnet wird. Zum anderen als direkter Bestandteil der *PEngine* Formel, mit ihr wird das Verdrängungsvolumen der Zylinder des betreffenden Motors (*displacementVolume*) mit in die Berechnung einbezogen. Abschließend wird der Pedalwinkel des Gaspedals (*gasPedalPressIntensity*) benutzt, um die Motorkraft zu berechnen. Kein Druck auf dem Gaspedal bedeutet ein Winkel = 0° und entspricht einer Motorleistung von 0 %, während ein komplett durchgedrücktes Gaspedal 100 % entspricht.

Das mathematische Modell bildet einen generischen Verbrennungsmotor ab, welches die resultierenden Daten als Approximation der Wirklichkeit darstellt (Nam/Giannelli 2005). Die Abweichung der Werte ist geringer als 10 % (Nam/Giannelli 2005). Hingegen nimmt die Abweichung bei Geschwindigkeiten von unter 40 mph (~64,37 km/h) zu und ist um mehr als 20 % geringer als in der realen Welt (Nam/Giannelli 2005). Für die spätere Verbrauchsanalyse ist die Abweichung nicht relevant, da jeder Proband bei gleicher Geschwindigkeit den gleichen Verbrauch hat. Für die Verbrauchsberechnung zieht das Modell die Werte aus einem vorausgegangenem Fahrtabschnitt als Eingangswerte heran und berechnet daraus die zur Bewältigung der Strecke notwendigen Energiewerte. Für jedes Frame werden die im Fahrtabschnitt zu bewältigenden Kräfte addiert (Reibung, Steigung der Straßen, Luftdruck, Trägheit und sekundäre Systeme wie Klimaanlage) und von der vom Motor bereitgestellten Kraft subtrahiert, um die resultierende Beschleunigungskraft zu berechnen. Die Berechnung für das Modell bildet den linearen Zusammenhang zwischen dem Verbrauch und der Motorinnenleistung *P* (Nam/Giannelli 2005), welche mit der Formel 7.6 erfolgt:

$$P(\text{fuel}) = FCR \cdot LHV \quad 7.6$$

wobei FCR die Kraftstoffverbrauchsrate in Gramm pro Sekunde und LHV der Brennwert des verwendeten Kraftstoffes (englisch: Lower Heat Value, kurz: LHV) ist. Der LHV beträgt in der Software 43,7 kJ/g (Nam/Giannelli 2005). Über diesen Zusammenhang wird in der zuvor erörterten Funktion *computeFuelConsumption()* der Kraftstoffverbrauch berechnet, indem die momentane Leistung des Motors in die Formel eingesetzt wird. Die Motorleistung P, die zur Berechnung des Verbrauchs und der eigentlichen Beschleunigung des Fahrzeugs verwendet wird, wird über den effektiven Mitteldruck (bmep) mit der Formel 7.7 berechnet.

$$P = \frac{mep \cdot V \cdot RPM}{c} \quad 7.7$$

wobei V der Hubraum in m<sup>3</sup> (2.0) des Motors ist. Der Faktor c hat für Viertaktmotoren die Ausprägung  $c = 2$  und für Zweitaktmotoren  $c = 1$  (Nam/Giannelli 2005). Die Gleichung für den effektiven Mitteldruck ist:

$$mep(\text{kPa}) = 4 \pi \tau / V \quad 7.8$$

wobei  $\tau$  das Drehmoment ist. Daraus lässt sich die bmep-Kurve in Formel 7.9 bestimmen.

$$bmep = a_0 + a_1 N + a_2 N^2 + a_3 N^3 + a_4 N^4 + a_5 N^5 + a_6 N^6 + a_7 N^7 \quad 7.9$$

wobei N die Motordrehzahl in Umdrehungen pro Sekunde ist. Je nach Motor werden andere  $a_i$  Werte herangezogen<sup>11</sup>. Abbildung 33 zeigt die resultierende bmep-Kurve für generische 2.0 l Benzinmotoren.

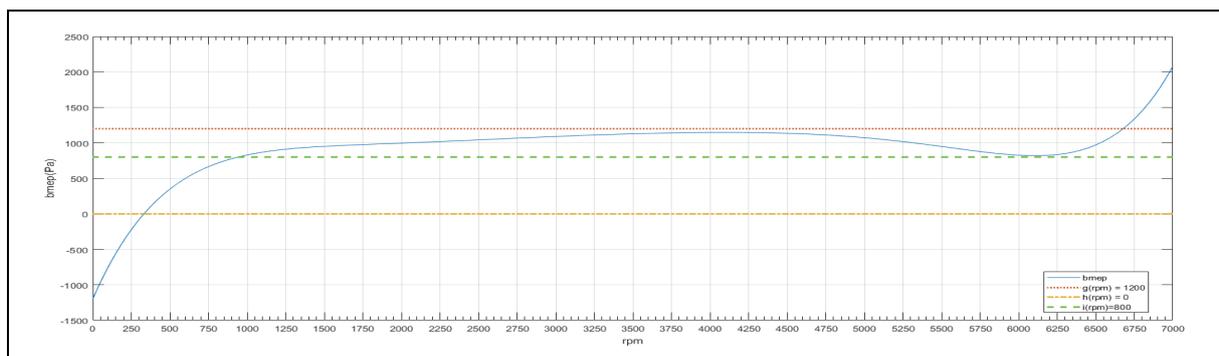


Abbildung 33: Plot der bmep Kurve nach RPM

Quelle: Eigene Darstellung

In Abbildung 33 sind die Schwächen des Modells zu erkennen. Für den Bereich zwischen der roten und grünen Linie liefert die bmep-Kurve Werte, die ausreichend für eine Beschleunigung sind. Unterhalb von 15 Umdrehungen pro Sekunde (900 RPM) ist die Kurve nicht wirklichkeitsgetreu. Die Kurve schneidet die Nulllinie der Y-Achse, somit wäre das Leistungsspektrum

<sup>11</sup> Benzinmotor:  $a_0 = -1200,51$ ,  $a_1 = 298,934$ ,  $a_2 = -17,5860$ ,  $a_3 = 0,563420$ ,  $a_4 = -0,0104629$ ,  $a_5 = 0,000113228$ ,  $a_6 = -6,64513e-7$  und  $a_7 = 1,63097e-9$ . (Nam/Giannelli 2005)

Dieselmotor mit Turbolader:  $a_0 = -19950,8$ ,  $a_1 = 3479,90$ ,  $a_2 = -231,809$ ,  $a_3 = 8,25775$ ,  $a_4 = -0,169919$ ,  $a_5 = 0,00202259$ ,  $a_6 = -1,2921e-5$  und  $a_7 = 3,42208e-8$ . (Nam/Giannelli 2005)

des Motors negativ. Ebenso sollte die Kurve bei über 100 Umdrehungen pro Sekunde (6000 RPM) nicht weiter ansteigen, da das Leistungsspektrums eines Motors i. d. R. dort das Maximum erreicht, wie es in Abbildung 34 dargestellt ist. Deshalb wird die Drehzahl auf den Bereich zwischen 1500 und 5100 Umdrehungen pro Minute beschränkt.

Das Modell ist mit der heutigen Fahrzeugentwicklung bedingt vergleichbar, da Turbolader und aktive Zylindertechnologie die Kurve beeinflussen (Nam/Giannelli 2005), wie Abbildung 34 beispielhaft für die Leistungs- und Drehmomentkurve des BMW 428i aus dem Jahr 2017 zeigt.

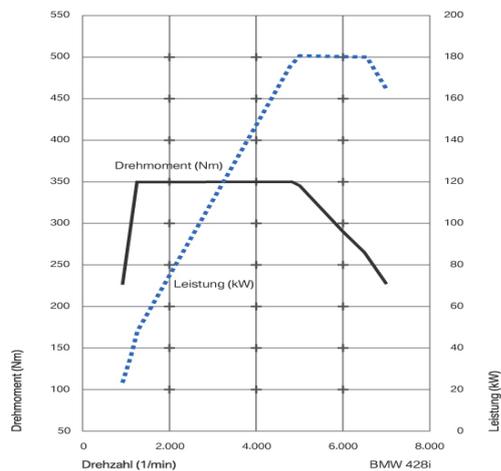


Abbildung 34: Leistungsspektrum BMW TwinPower Turbo 4-Zylinder Benzinmotoren  
Quelle: BMW (2017)

Aus der bmep kann das Drehmoment  $D$  mit der Formel 7.10 berechnet werden.

$$D = \frac{P}{(2 \cdot \pi \cdot \text{RPM} / 60)} \quad 7.10$$

Damit ist ein einfacher Vergleich zu anderen Modellen möglich. Und es lassen sich Kurven für das Drehmoment und die Leistung darstellen. Die Leistung des Motors in OpenDS ist mit 105,15 kW geringer als die des BMW 428i mit 180 kW und das maximale Drehmoment liegt bei 182,66 Nm anstelle von 350 Nm bei einer Umdrehungszahl des Motors zwischen 1500 und 5100 RPM. Auffällig ist, dass die bmep-Kurve stärker glättet. Beispielsweise liegt dies an den nicht-modellierten zusätzlichen Turboladern des BMW 428i. Das Leistungsspektrum des in OpenDS hinterlegten Fahrzeugs ist in Abbildung 35 zum Vergleich mit einem realen Fahrzeug, hier BMW 428i, dargestellt.

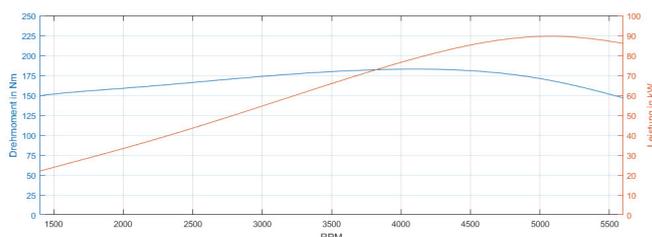


Abbildung 35: Leistungsspektrum BMEP für Benzinmotoren  
Quelle: Eigene Darstellung, (4-Zylinder mit 2,0 Liter Hubraum)

Die Verbrauchskurve im Fahrsimulator lehnt sich an die Daten der EPA an und kann somit als Näherung herangezogen werden.

Ein entscheidender Faktor ist die Schaltung, da diese von erheblichem Einfluss und von Fahrzeug zu Fahrzeug stark unterschiedlich ist (Nam/Giannelli 2005). Für die Ermittlung eines optimalen Verbrauchs und der von Jamson et al. (2015a) definierten Werte wird der Verbrauch je Gang nach gefahrener Geschwindigkeit untersucht. Auffällig sind die Geschwindigkeiten bei ungefähr 18 km/h, 41 km/h, 60 km/h, 85 km/h, 106 km/h, 120 km/h, 130 km/h, 140 km/h und 160 km/h, bei denen sich der Verbrauch verringert. Dies hat zwei Ursachen.

Bei den Geschwindigkeiten bis einschließlich 106 km/h ist dies auf den Gangwechsel zurückzuführen. Beim Wechsel von einem Gang in den nächst höheren Gang verringert sich zum einen die Geschwindigkeit und zum anderen verbessert sich die Übersetzung. Dies resultiert in einem niedrigeren Verbrauch. Die Verringerung der Geschwindigkeit ist auf den im Fahrsimulator vorhandenen Luft- und Rollwiderstand zurückzuführen.

Der Abfall nach 120 km/h hat mehrere Ursachen. Die von der EPA erstellte Formel ist für den US-amerikanischen Markt konzipiert. Dort liegt die Höchstgeschwindigkeit bei den Labortests bei unter 120 km/h. Die 120 km/h sind auch bei den europäischen Fahrtests zur Verbrauchsmessung im Labor die maximale Geschwindigkeit. Eine Genauigkeit über 120 km/h ist somit nicht notwendig. Die nähere Betrachtung der hinterlegten Formel weist genau diese absteigende Kurvenbildung auf. Der Kurvenverlauf bildet eine Art Schleife um den jeweiligen Schaltpunkt. Bis 20 km/h ist der Verbrauch höher, danach steigt der Verbrauch im Grunde kontinuierlich mit der Geschwindigkeit.

Bevor Testreihen mit dem Fahrsimulator durchgeführt werden können, ist der Energieverbrauch hinsichtlich der in OpenDS programmierten Formeln zu validieren. Es ist zu beachten, dass bei den Experimenten nur der Energieverbrauch gemessen wird. Somit ist eine modellhafte Abbildung des Energieverbrauchs notwendig. Die Software muss keine realen Werte liefern. Für den Versuchsaufbau des Experimentes ist es hinreichend, wenn der Energieverbrauch bis auf eine Konstante und einer Toleranzabweichung in den Kurven berechnet wird. Die zugrunde gelegte Formel erfüllt die Voraussetzungen zur Verbrauchsmessung. Sobald der Motor läuft, wird Kraftstoff verbraucht. Die Schaltvorgänge liegen bei allen Probanden bei gleicher Geschwindigkeit. Es gibt mehrere lokale Minima für den Kraftstoffverbrauch. Für vergleichbare Fahrscenen sollten Geschwindigkeitsbegrenzungen festgelegt und auf die Einhaltung der Straßenverkehrsordnung hingewiesen werden, um möglichst gleichmäßige Bedingungen zu erhalten und Verzerrungen zu vermeiden. Für die nachfolgenden Experimente wird die Formel für den Kraftstoff Diesel verwendet.

## 8 Fahrszene für die Experimente

Für die Durchführung des Experimentes wird mithilfe von Design Science nach Hevner et al. (2004) ein Artefakt für die Fahrumgebung entwickelt.

### 8.1 Fahrzyklen und Bewertung zum Testen des Energieverbrauchs

Fahrzyklen kamen Ende der 60er Jahre auf und sind standardisierte Emissions-Tests (Giakoumis 2017, 16). In der Literatur wird der Begriff unterschiedlich verwendet, so werden teilweise die Begriffe Test-Zyklen, Fahrtests, Fahrzyklen oder transiente Zyklen verwendet (Giakoumis 2017, 16). Hier wird der Begriff des Fahrzyklus als eine Sequenz von Punkten, welche zu einer bestimmten Zeit eine bestimmte Geschwindigkeit vorgibt, verstanden. In der Literatur finden sich unterschiedliche Fahrzyklen zur Messung des Energieverbrauchs. Es wird zwischen leichten und schweren Fahrzeugen unterschieden. Untersuchungsgegenstand sind leichte Fahrzeuge wie PKWs. Die Untersuchung beschränkt sich auf die bekanntesten Fahrzyklen<sup>12</sup>.

In den untersuchten Studien in Kapitel 3 fanden Beobachtungen in Deutschland, Österreich, Schweden, Japan und USA statt. Daher konzentriert sich die Arbeit auf Fahrzyklen, welche in Europa oder spezifischer in Deutschland, in Japan und in den USA Anwendung finden. Zur weiteren Einschränkung wurden die Fahrzyklen danach ausgewählt, ob sie aufeinander aufbauen, einen unterschiedlichen Kontext zueinander haben oder einen Standard darstellen. Für **Europa** sind die Fahrzyklen: Common Artemis Driving Cycles (CADC), ADAC Highway Zyklus, RTS 95 und Neuer Europäischer Fahrzyklus (NEFZ) von besonderer Bedeutung. Für **Japan** wurden drei Fahrzyklen, welche auf einander aufbauen, entwickelt, der JP 10 Mode, der JP 10-15 Mode und der JC08. Der JP 10-15 Mode ist eine Zusammensetzung aus dem JP 10 Mode und dem JP 15 Mode. Zur Fokussierung wird hier nur die Zusammensetzung zum JP 10-15 Mode betrachtet. In den **USA** sind die bedeutsamsten der FTP 75, der HFET und der US06. **Eine Besonderheit** stellt der Worldwide Harmonized Light Duty Test Procedure (WLTP) dar, welcher der erste weltweite Fahrzyklus wäre. Der Fahrzyklus soll im Jahre 2017 den NEFZ als Standard in Europa ablösen und in Zukunft als weltweiter Standard fungieren. Das ARTEMIS Projekt, welches als Voruntersuchung für den WLTP gilt, zeigt, dass drei wesentliche Bereiche unterschieden werden können: Stadt, Land und Autobahn (André 2004). Der Fahrzyklus für die Fahrszene sollte demnach die drei Bereiche abbilden können.

Die Bewertung erfolgt anhand verschiedener Kriterien.

- Der Fahrzyklus muss für Experimente mit Studierenden geeignet sein. Bei den vorhandenen Vorlesungsgrößen ist mit einer Teilnehmerzahl von 100 bis 200 Probanden zu rechnen. Die Probandengruppen können aufgrund von universitären Regularien ca. zwei Wochen lang an dem Experiment teilnehmen. Somit müssen zwischen 50 und 100 Stunden zur Verfügung stehen. Bei einem Takt von 30 Minuten pro Studierenden sind zwischen 6 und 12,5 Tage erforderlich. Damit darf, bei vier bis fünf Runden, eine Runde

---

<sup>12</sup> Für einen umfassenden Überblick sei auf Giakoumis (2017) verwiesen.

nicht länger als fünf Minuten dauern, um unterschiedliche Treatments messen zu können. Der Fahrzyklus muss der Zeitspanne angepasst werden können oder die Dauer darf nicht überschritten werden.

- Der Fahrzyklus sollte in seiner Komplexität in einer Fahrscene umsetzbar sein. Damit erfolgt keine ständige Geschwindigkeitsänderung (Änderungsfrequenz). Eine ständige Änderungsfrequenz, auch hohe Änderungsfrequenz genannt, liegt vor, wenn die vorgeschriebenen Geschwindigkeitswerte sich jede Sekunde ändern. Ansonsten wird von einer niedrigen Änderungsfrequenz gesprochen. Der Fahrzyklus soll nach Möglichkeit gängigen Standards entsprechen.

Die genannten Fahrzyklen können nach der Festlegung der Bewertungskriterien im Folgenden nähergehend untersucht und evaluiert werden.

Jeder Fahrzyklus besitzt Vor- und/oder Nachteile. Der CADC bietet eine realistische Darstellung unterschiedlicher Fahrarten, erfordert jedoch eine starke Kompression und Simplifizierung, um eine realistische Fahrscene darstellen zu können. Dies würde zu einer Abweichung vom Fahrzyklus führen. Während der ADAC Highway Cycle einfach zu implementieren ist, ist er auf ein Autobahnsegment beschränkt und stellt somit kein realistisches Modell der typischen Nutzung eines Fahrzeuges dar. Der RTS 95 Cycle zeichnet sich durch eine Vielzahl von Beschleunigungen und Verzögerungen aus, die i. d. R. die Möglichkeit bieten, energieeffiziente Fahrten durchzuführen. Gleichzeitig wird erwartet, dass die Fahrten in aggressiver und ineffizienter Weise durchgeführt werden. Bei der Messung von Eco-Driving-Feedback würde ein erhöhter oder gar maximaler Ausschlag an Energieverbrauch vorliegen. Darüber hinaus sind im RTS 95 Cycle keine Segmente des Fahrens bei konstanten Geschwindigkeiten vorgesehen. Der RTS 95 ist nicht geeignet für eine Fahrscene.

Der WLTP Klasse 3 weist sehr viele spezifische Beschleunigungen auf, welche im Detailgrad nicht abgebildet werden können und die Gesamtdauer von 30 Minuten ist sehr lang, da für das Experiment mehrere Runden gefahren werden müssen, um verwertbare Daten zu erhalten.

Insgesamt zeigt sich, dass sich bis auf den ADAC Highway Zyklus alle weiterentwickelten Tests, wie der JC08 (Japan), SFTP (USA) und NEFZ (Europa) sowie der WLTP (Welt), in zwei Teile aufteilen: einen städtischen und einen außerstädtischen. Wobei der städtische Teil sich durch Wiederholung von Zyklen auszeichnet oder genauer betrachtet durch Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge.

Der JP 10-15 Mode weist typische Bereiche für Stadt und Land auf. Es fehlt der Autobahnbereich. Die einzelnen Geschwindigkeitsveränderungen weisen eine niedrige Änderungsfrequenz auf. Der JP 10-15 Mode kann, ähnlich dem NEFZ, in der Reihenfolge angepasst werden und in der Dauer verändert werden. Der Test ist jedoch kein aktueller Standard. Aufgrund des fehlenden Autobahnabschnitts ist er bedingt als Fahrzyklus für eine Fahrscene geeignet. Eine weitere Einschränkung ist, dass der Fahrzyklus auf Japanisch erfasst wird.

Der NEFZ repräsentiert den typischen Gebrauch eines Fahrzeugs in Europa und bietet Fahrvorgänge wie Beschleunigungen, Verzögerungen und Fahren bei gleichbleibenden Geschwindigkeiten, welche direkt für Eco-Driving verwendet werden können. Obwohl der NEFZ die Fahrvorgänge bei konstanten Intensitäten während des Fahrzyklus bei präzisen Zeitintervallen vorsieht, können die Fahrer von diesen Fahrmanövern (Operationen) abweichen. Es sind somit Anpassungen erforderlich, sodass die Kernelemente der spezifischen Fahrvorgänge aus dem Fahrzyklus erhalten bleiben. Alle Zyklen der NEFZ-Merkmalssegmente sind dadurch charakterisiert, dass der Fahrer ständig beschleunigt und abbremst sowie mit konstanter Geschwindigkeit fährt (Rat der Europäischen Union 1991).

Der NEFZ ist der geltende Standard-Fahrzyklus, welcher für alle Zulassungen in Europa und zur Messung des Energieverbrauchs von PKW eingesetzt wird (VDA 2014). Er unterteilt sich in einen außerstädtischen und städtischen Bereich.

Der **städtische Bereich** besteht aus vier Zyklen von jeweils 195 s. Während der Stadtverkehrszyklen werden Geschwindigkeiten von bis zu 50 km/h gefahren. Nach dem Fahrzyklus sind in der Stadt i. d. R. Beschleunigungen auf 30 km/h und auf 50 km/h (Rat der Europäischen Union 1991) vorgesehen. Dieses entspricht in Deutschland einer 30-km/h-Zone und der nach StVO geltenden Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h in geschlossenen Ortschaften. Während eines städtischen Zyklus ist der Wagen insgesamt 60 s im Leerlauf. Die Leerlaufzeit wird durch drei Segmente fragmentiert. Für das erste Segment muss das Fahrzeug auf eine Geschwindigkeit von 15 km/h beschleunigt werden, die für einige Sekunden gehalten werden muss. Eine anschließende Verzögerung bringt die Geschwindigkeit wieder auf 0 km/h zurück. Das zweite Segment wird in ähnlicher Weise durchgeführt, mit der Ausnahme, dass die Geschwindigkeit auf 32 km/h anstatt auf 15 km/h erhöht wird. Im dritten Segment wird, nach Beschleunigung und stetigem Fahren bei 50 km/h, das Fahrzeug bis auf 35 km/h abgebremst. Diese Geschwindigkeit muss für einige Sekunden gehalten werden, bevor das Fahrzeug anschließend wieder zum Stillstand gebracht wird.

Der **außerstädtische Bereich** stellt einen Zyklus dar und dauert 400 s. Der außerstädtische Zyklus bietet Geschwindigkeiten von bis zu 120 km/h, was grundsätzlich den Fahrgeschwindigkeiten auf Autobahnen entspricht (Giakoumis 2017, 71-74). In Deutschland ist bekanntermaßen eine Richtgeschwindigkeit von 130 km/h vorgesehen, weshalb der NEFZ für die deutsche Autobahn nicht vollständig repräsentativ ist. Allerdings handelt es sich um einen europäischen Fahrzyklus und in den anderen europäischen Ländern liegt die Höchstgeschwindigkeit zwischen 100 km/h und 130 km/h (ADAC 2015b). Dies kann in einer Fahrscene umgesetzt werden. Der außerstädtische Zyklus wird im Gegensatz zu städtischen Zyklus nur einmal durchgeführt. Er hat eine Leerlaufzeit von 40 s am Anfang und am Ende des Zyklus. Ähnlich wie beim städtischen Zyklus kommt es zu Beschleunigungen und Verzögerungen, zudem muss das Fahrzeug bei konstanter Geschwindigkeit für bestimmte Zeitintervalle gehalten werden, bevor das nächste Segment gefahren wird. Nach der anfänglichen Leerlaufzeit wird das Fahrzeug auf 70 km/h beschleunigt und die Geschwindigkeit beibehalten. Anschließend wird das Fahrzeug auf 50 km/h abgebremst, bevor es wieder auf 70 km/h beschleunigt wird. An diesem Punkt wird die Geschwindigkeit des Fahrzeugs bis auf 100 km/h erhöht und anschließend auf die maximale Geschwindigkeit von 120 km/h. Nach dem Fahren mit der Höchstgeschwindigkeit für 10 s wird

das Fahrzeug zum Stillstand gebracht. Der NEFZ schreibt in diesem Bereich zunächst eine Beschleunigung von 0 km/h auf 70 km/h vor, gefolgt von einem Bremsvorgang von 70 km/h auf 50 km/h. Anschließend ist im NEFZ eine Beschleunigung auf zunächst 70 km/h, dann auf 100 km/h vorgeschrieben. Alsdann ist im NEFZ das Fahrzeug auf die Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h zu beschleunigen und danach sukzessive auf 100 km/h, dann auf 80 km/h und schließlich auf 0 km/h abzubremesen. Es folgt noch eine abschließende Leerlaufzeit.

Der NEFZ hat eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 33,6 km/h und dauert insgesamt 1180 s (Giakoumis 2017, 74). Zum besseren Verständnis des zeitlichen Ablaufs in Bezug auf die Geschwindigkeit ist der NEFZ in Abbildung 36 dargestellt.

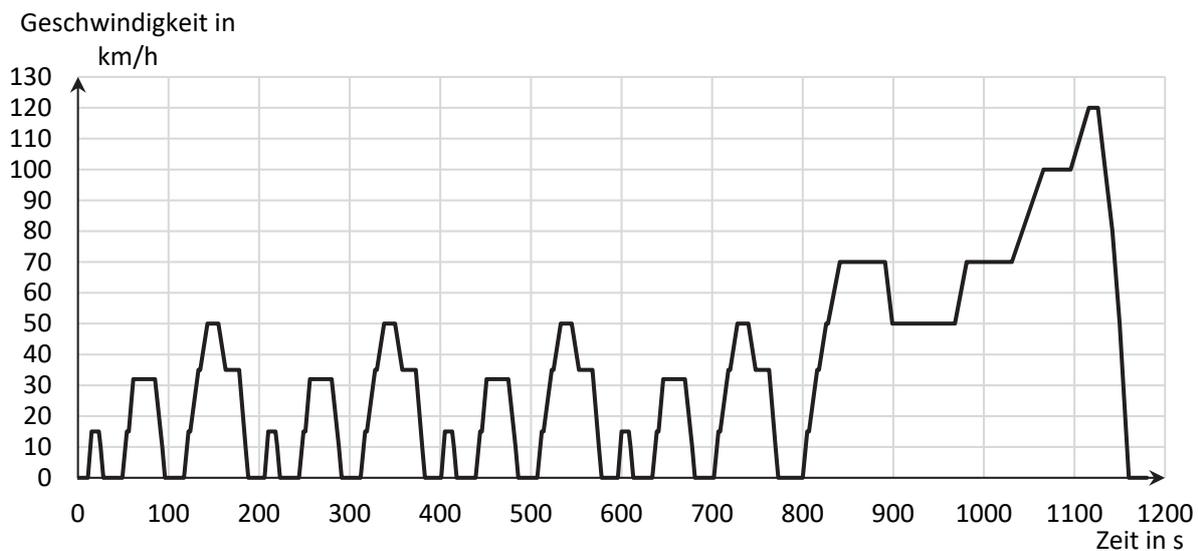


Abbildung 36: Neuer europäischer Fahrzyklus (NEFZ)  
Quelle: In Anlehnung an Rat der Europäischen Union (1991)

Der NEFZ verfügt über Abschnitte mit konstanten Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen. Die Abschnitte können in einem Eco-Driving-Experiment, indem der Fahrer die Fahrabschnitte mit seinem Fahrverhalten durchfährt, gemessen werden.

Im Gegensatz zu dem RTS 95 sind zwischen den Segmenten Abschnitte von stationären Geschwindigkeiten vorgesehen, die einen Spielraum für die Durchführung der vorangehenden und der nachfolgenden Vorgänge ermöglichen. Folglich wären Anpassungen hinsichtlich der Dauer und der Reihenfolge der Segmente möglich, um den NEFZ als Grundlage für eine realistische Fahrscene nutzen zu können. Die Änderungsfrequenz der Geschwindigkeit ist niedrig. Außerdem sind in dem NEFZ die Bereiche Stadt, Land und Autobahn enthalten. Der NEFZ wird neben Europa auch in Indien verwendet (VDA 2014). Allerdings mit einer angepassten Geschwindigkeit von maximal 90 km/h (VDA 2014). Eine Anpassungsmöglichkeit ist damit gezeigt. Der NEFZ ist somit insgesamt für eine Fahrscene geeignet.

Die detaillierteren Vergleichsdaten der einzelnen untersuchten Fahrzyklen finden sich in Tabelle 20.

Fahrzyklus	Abgedeckte Bereiche	Höchstgeschwindigkeit	Durchschnittliche Geschwindigkeit	Dauer	Anwendung	Basierend	Änderungsfrequenz	Eignung
CADC <sup>13</sup>	S, L, A	130 km/h oder 150 km/h	S: 22,5 s L: 47,5 s A: 92,8 s	1000 s	Deutschland	Reale Daten	Hoch	Nein
ADAC Highway Zyklus <sup>14</sup>	A	130 km/h	k. A.	800 s	Deutschland	k. A.	Niedrig	Nein
RTS 95 <sup>15</sup>	S, L, A	134 km/h	52,52 km/h	900 s	Europa	k. A.	Hoch	Nein
NEFZ	S, L, A	120 km/h	33,6 km/h	1180 s (4x195 s + 400 s)	Europa, Indien (verändert)	Annahme von idealisierter, verbrauchsarmer Fahrweise	Niedrig	Ja
JP 10 Mode <sup>16</sup>	S	40 km/h	17,7 km/h	675 s (5x135 s)	Japan	k. A.	Niedrig	Nein
JP 10-15 Mode <sup>17</sup>	S, L	70 km/h	33,1 km/h	660 s (24 s + 3x135 s + 231 s) oder 891 s (231 s + 24 s + 3x135 s + 231 s)	Japan	k. A.	Niedrig	Ja (mit Einschränkung)
JC08 <sup>18</sup>	S, L	81,6 km/h	24,4 km/h	1204 s	Japan	k. A.	Hoch	Nein
FTP75 <sup>19</sup>	S	91,2 km/h	34,1 km/h	1877 s + 600 s Pause	USA	Reale Daten (morgendlicher Berufsverkehr in Los Angeles)	Hoch	Nein
HFET <sup>20</sup>	A, L	96,5 km/h	77,6 km/h	765 s	USA	Reale Daten	Hoch	Nein
US06 <sup>21</sup>	S, A, L	129,2 km/h	77,3 km/h	600 s	USA	Reale Daten	Hoch	Nein
WLTP (Klasse 3) <sup>22</sup>	S, L, A	131,3 km/h	3a: 46,4 km/h 3b: 46,5 km/h	1800 s	Weltweit	Reale Daten (weltweit)	Hoch	Nein

Tabelle 20: Fahrzyklen im Vergleich

Quelle: Eigene Darstellung, S = städtisch, L = ländlich, A = Autobahn, k. A. = keine Angaben

Unter Berücksichtigung der Vor- und Nachteile der analysierten Fahrzyklen stellt der NEFZ die geeignetste Grundlage für die Weiterentwicklung einer realistischen Fahrszene dar, welche

<sup>13</sup> André (2004), ECOpoint (o. J.)

<sup>14</sup> Dragomirov (2013)

<sup>15</sup> ECOpoint (2016)

<sup>16</sup> Giakoumis (2017, 128-130), U.S. Environmental Protection Agency (o. .J.-c)

<sup>17</sup> Giakoumis (2017, 130), U.S. Environmental Protection Agency (o. .J.-b)

<sup>18</sup> Tutuianu et al. (2014), Giakoumis (2017, 131)

<sup>19</sup> Giakoumis (2017, 91, 93-95)

<sup>20</sup> Kruse/Paulsell (1974), Austin et al. (1974), Giakoumis (2017, 97) Giakoumis (2017, 97); U.S. Environmental Protection Agency (o. .J.-a)

<sup>21</sup> Giakoumis (2017, 103, 108)

<sup>22</sup> Tutuianu et al. (2014)

im Hinblick auf die Komplexität einfacher als beim WLTP umgesetzt werden kann. Im nächsten Schritt kann deshalb mit der Aufbereitung einer Fahrscene für den NEFZ begonnen werden. Für diese Arbeit wird festgelegt, dass die Fahrscene mindestens 40 % des NEFZ abdecken muss und 60 % abdecken sollte. Werte über 60 % werden als optional angesehen. Zur Vereinfachung wird das Szenario auf Beschleunigung, Verzögerung oder Fahren mit konstanter Geschwindigkeit reduziert. Bevor mit der Entwicklung der Fahrscene begonnen werden kann, wird der NEFZ nochmals im Detail und mit Blick auf die umzusetzenden Kernelemente des NEFZ betrachtet.

## **8.2 Aufbereitung des NEFZ für die Entwicklung einer Fahrscene**

Der NEFZ wird für eine geeignete Fahrscene für die Bewertung des Kraftstoffverbrauches so verändert, dass der Fahrer veranlasst wird, ähnliche Fahrmanöver durchzuführen. Ein Fahrmanöver ist eine aktive Handlung des Fahrers zur Erfüllung seiner primären Fahraufgabe.

Die im NEFZ enthaltenen Segmente werden in Fahrsituationen unterteilt, um die Erstellung einer Fahrscene zu ermöglichen. Eine Fahrsituation besteht aus einem oder mehreren Fahrmanövern. Im Vergleich zum NEFZ sind die Fahrwerte nicht exakt einzuhalten, sondern die Probanden müssen ermuntert werden, an entsprechenden Punkten der Fahrscene, die Geschwindigkeit zu erhöhen oder zu reduzieren. Die Verzögerungen und Beschleunigungen liegen im Ermessen des Fahrers und haben einen primären Einfluss auf das Eco-Driving.

Ziel der Fahrsimulation ist nicht die Bewertung des Kraftstoffverbrauchs eines Fahrzeugs in Europa, sondern die Bewertung von Eco-Driving-Feedbacksystemen und um mögliche Unterschiede im Energieverbrauch von Personen herauszufinden, die motiviert sind, bei der Benutzung von Eco-Driving Feedbacksystemen energieeffizient zu fahren, und denen, die nicht-motiviert sind, solche Systeme zu nutzen.

Mit dem Nebenziel, eine realistische Fahrscene zu erstellen, ist es nicht möglich vollständig verkehrsregulierende Zeichen wie Geschwindigkeitszeichen und Ampeln so zu implementieren, dass diese dem NEFZ entsprechen. Stattdessen werden in Übereinstimmung mit dem NEFZ der innerstädtische und der außerstädtische Bereich entwickelt.

### **8.2.1 Innerstädtischer Bereich**

Im **innerstädtischen Abschnitt** ist eine maximale Geschwindigkeit von 50 km/h zulässig, welches den Fahrer zu einer konstanten Fahrweise mit 50 km/h ermutigen soll. Es soll dafür Sorge tragen, dass der NEFZ in den Stadtsegmenten eingehalten wird. Einige Kreuzungen mit Rechts-vor-Links-Verkehr und Ampeln sollen den Fahrer veranlassen, die Geschwindigkeit situationsbedingt anzupassen und dadurch Verzögerungen und Beschleunigungen durchzuführen.

Der städtische Abschnitt besitzt einen Bereich, in dem eine maximale Geschwindigkeit von 30 km/h vorgesehen ist, welcher die 32-km/h- und 35-km/h-Abschnitte des NEFZ simuliert. Die 30 km/h entsprechen einer deutschen 30-km/h-Zone. Kreuzungen in der 30-km/h-Zone sind nicht mit Schildern oder Ampeln versehen, sodass die Rechts-vor-Links-Regel anzuwenden ist und mit entsprechender Vorsicht über die Kreuzungen gefahren werden sollte.

Das 15 km/h-Segment des NEFZ bietet, abgesehen von der Zielgeschwindigkeit, keine eindeutig neuen Fahrvorgänge mit Potenzial zur Energieeinsparung im Vergleich zum Segment der Beschleunigung bis zu 30 km/h einschließlich der nachfolgenden Verzögerung und wird somit nicht abgebildet.

Im innerstädtischen Bereich werden für die ähnliche Abbildung des NEFZ zwei Abschnitte mit den Geschwindigkeiten 50 km/h und 30 km/h unterschieden.

#### 8.2.1.1 *Städtischer Abschnitt mit 50 km/h*

Im städtischen Abschnitt mit 50 km/h wird das Fahrzeug nach Möglichkeit viermal auf 50 km/h beschleunigt und viermal auf 0 km/h verzögert. Der Fahrer muss viermal abbremsen, was bei 90° oder engeren Radien in Kurven der Fahrsimulation der Fall ist. Das Fahrzeug muss insgesamt dreimal abbiegen, zweimal rechts und einmal links. Es fehlt jedoch eine vierte Verzögerung, welche mit einer Ampel erreicht wird. Die Ampel ist immer rot, wenn auf sie zugefahren wird. Während der NEFZ eine konstante Geschwindigkeit von 50 km/h während der Stadtzyklen vorschreibt, wird diese spezifische Geschwindigkeit mehrfach nur durch vorhergehende Beschleunigungen und nachfolgende Verzögerungen erreicht. Die genaue Dauer der 50-km/h-Fahrten ist vom individuellen Fahrstil des Fahrers in der Simulation abhängig. Messgegenstand soll der Energieverbrauch je gefahrener Runde sein. Es ist zielführend eine möglichst realistische Szenerie zu erstellen, welche Beschleunigungs- und Bremsvorgänge ähnlich dem NEFZ vorsieht. Deshalb wird für eine erste Entwicklungsstufe die Umsetzung dieser Vorgänge für den Stadt-Abschnitt mit 50 km/h als hinreichend betrachtet. Nachdem die grundlegenden Manöver im städtischen Abschnitt mit 50 km/h festgelegt worden sind, können die einzelnen Fahrmanöver näher betrachtet.

Zu Beginn der Fahrscene befindet sich das Fahrzeug vor der Stadtgrenze, sodass der Fahrer zum einen weiß, wie schnell er maximal fahren darf und zum anderen mit Personen sowie einer höheren Verkehrsdichte und uneinsichtigen Stellen zu rechnen hat. Die Stadtgrenze wird mit der Vorderseite einer Ortstafel verdeutlicht. Die Geschwindigkeitsbegrenzung von 50 km/h in der Ortschaft spiegelt eine der konstanten Geschwindigkeiten des städtischen Zyklus des NEFZ wieder, wie sie im Unterkapitel 8.1 identifiziert wurden. In Abbildung 37 ist der Startpunkt der Fahrscene dargestellt.



Abbildung 37: Städtischer Abschnitt – Start der Fahrscene: Ortseingang  
Quelle: Eigene Darstellung

Die Szenerie der Stadt ist typisch geprägt durch Merkmale wie Lampen, Ampeln, dichten Verkehr, dichte Bebauung, Verkehrszeichen und Bürgersteige. Bürgersteige sind in der Szenerie der Fahrsimulation ausschließlich im Bereich des Stadtgebietes hinzugefügt worden, sodass der Fahrer unmittelbar den Eindruck eines Stadtbereiches vermittelt bekommt. Zusätzlich wurden

an einigen Stellen Straßenbeleuchtungen hinzugefügt. Jedes platzierte Objekt, wie eine Straßenlampe, ist ein Hindernis, an welchem der Proband mit dem Fahrzeug kollidieren könnte. Beim Hinzufügen ist darauf zu achten, dass die Objekte nicht zu nahe an der Straße stehen und nur an einsichtigen Stellen platziert werden. Es ergeben sich durch die Szenerie mehrere Vorteile: der Proband, welcher sich in der Szenerie Stadt befindet, bekommt durch die wechselnden Objekte ein besseres Gefühl für die Geschwindigkeit des Fahrzeugs und wird zu langsamerem Fahren angehalten.

Für eine realistischere Darstellung des Bereichs Stadt sind die Gebäude im Stadtzentrum näher aneinander platziert worden und höher als in den äußeren Gebieten des Stadtbereiches. Die Häuser weisen in den äußeren Stadtbereichen Gärten auf. Die typische Szenerie des städtischen Abschnitts mit Geschwindigkeiten von 50 km/h ist in Abbildung 38 dargestellt. An allen Kreuzungen gilt die Straßenverkehrsregelung „rechts vor links“ (StVO § 8 Abs. 1 Satz 1), sodass der Fahrer seine Geschwindigkeit zumindest verlangsamen sollte, um mögliche Verkehrsteilnehmer einfädeln zu lassen. An bestimmten Kreuzungen muss der Fahrer rechts abbiegen. Dafür muss der Fahrer die Geschwindigkeit reduzieren und das Fahrverhalten wird an den NEFZ angepasst. Wie bereits in diesem Abschnitt 8.2.1.1 erwähnt, sind vier Zyklen im städtischen Bereich innerhalb des NEFZ vorgeschrieben. Für das vierte Segment ist eine Ampel implementiert worden. Die Ampelschaltung verwendet Trigger, um den Lichtwechsel einzuleiten. Der Ampelstatus ist zunächst mit der Farbe Grün symbolisiert. Bereits von weitem wechselt der Status der Ampel und schaltet auf die Farbe Rot um. Erst, wenn der Fahrer an der Haltelinie hält, wird ein weiterer Trigger angesteuert, welcher den Status der Ampel auf Grün ändert. In Abbildung 38 sind die Zustände beim Heranfahren an die rote Ampel a) und nach dem Haltevorgang mit der grünen Ampel b) veranschaulicht.



Abbildung 38: Städtischer Abschnitt – Ampelstatus

Quelle: Eigene Darstellung, Fahrt zur Ampel a) rote Ampel, Haltevorgang an der Ampel b) grüne Ampel

Zur Vollständigkeit sei erwähnt, dass die in der Fahrsimulation bisher vorhandene Ampel nur den Status Rot und Grün umsetzen kann.

### 8.2.1.2 Städtischer Abschnitt mit 30 km/h

Nachdem NEFZ (vgl. Unterkapitel 8.1) fehlen in der Szenerie noch Fahrten mit 32 km/h und 15 km/h, welche mit einer 30-km/h-Zone innerhalb des städtischen Abschnitts umgesetzt werden sollen. In Deutschland wird die 30-km/h-Zone i. d. R. in verkehrsberuhigten Geschäftsbereichen oder städtischen Bereichen mit hohem Fußgängeraufkommen eingesetzt. In Abbildung 39 ist der Beginn der 30-km/h-Zone in der Szenerie der Fahrsimulation präsentiert.



Abbildung 39: Städtischer Abschnitt – 30-km/h-Zone  
Quelle: Eigene Darstellung

In der 30-km/h-Zone des NEFZ sind vier Beschleunigungs- und Bremsvorgänge zu realisieren. Dazu muss der Fahrer zweimal links und zweimal rechts abbiegen. Zusätzlich sind in dem Bereich keine Vorfahrtszeichen, sodass die Regel „rechts vor links“ einzuhalten ist. Damit der verkehrsberuhigte Bereich weniger einsehbar wirkt, wurden die Gebäude erhöht und weisen zwei Stockwerke sowie Dächer auf. Die Kurven sind in den Winkeln so angeordnet, dass die Sicht in die jeweils nächste Straße nicht vollständig möglich ist. Es ist zwingend erforderlich die Geschwindigkeit zu reduzieren, um gewährleisten zu können, dass kein Unfall verursacht wird.

Nach der 30-km/h-Zone fährt der Fahrer in den zweiten Teil des städtischen Abschnitts mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h. Dafür symbolisieren freie Flächen den darauffolgenden ländlichen Bereich und verdeutlichen das Ende des Bereichs Stadt.

### 8.2.2 Außerstädtischer Bereich

Für den **außerstädtischen Abschnitt** wird dem Fahrer anhand Zeichen 311 nach StVO Anlage 3 zu § 42 Abs. 2 Abschnitt 2 Ortstafel angezeigt und die Höchstgeschwindigkeit beträgt 100 km/h (StVO § 3 Abs. 3 Abschnitt 2c). Es ist keine Geschwindigkeit von über 100 km/h in der anfänglichen Umsetzung der Fahrscene vorgesehen. Eine Implementierung einer Autobahn mit höheren Geschwindigkeiten wird als Teil einer alternativen Strecke bei einer späteren Iteration der Fahrscene umgesetzt.

Im außerstädtischen Bereich ist die Fahrbahn breiter als in der Stadt, zusätzlich gibt es einen auf Landstraßen üblichen Randstreifen. Die Breite der Straße ist standardmäßig mit 3,5 m je Spurbreite eingestellt. Zusätzlich sind die Bordsteine zusammen mit den Bürgersteigen entfernt worden. Für den außerstädtischen Abschnitt wurde auf Gebäude verzichtet, um die Sichtweite zu erhöhen und damit Hindernisse frühzeitig erkannt werden können. Damit wird das Fahren bei höheren Geschwindigkeiten ermöglicht. Der 100-km/h-Abschnitt der Landstraße ist gerade.

Auf diese Weise kann der Fahrer das Fahrzeug bei einer konstanten Geschwindigkeit von 100 km/h, in Übereinstimmung mit dem NEFZ, führen. In Abbildung 40 ist der außerstädtische Bereich der Szenerie dargestellt.

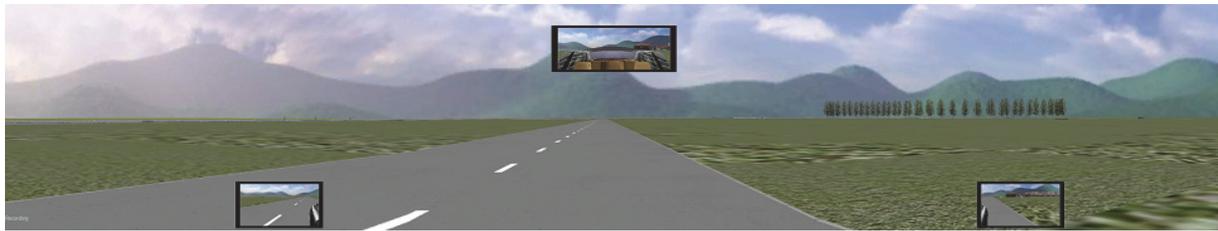


Abbildung 40: Außerstädtischer Bereich – 100-km/h-Straße  
Quelle: Eigene Darstellung

Nachdem in der Fahrszenarie eine 100-km/h-Fahrt ermöglicht wurde, wird der Fahrer mit einem 70-km/h-Zeichen (StVO Anlage 2 zu § 41 Abs. 1 Abschnitt 7 Geschwindigkeitsbeschränkungen und Überholverbote) auf eine neue Höchstgeschwindigkeit aufmerksam gemacht. Der Fahrer sollte eine Geschwindigkeit von 70 km/h fahren, um dem NEFZ zu entsprechen, bevor er abbiegt. Nach dem Abbiegen wird die Höchstgeschwindigkeit wieder auf 100 km/h festgelegt. Anschließend fährt der Fahrer in eine Baumallee ein, welche dem Fahrer eine eingeschränkte Sicht vermittelt. Zusätzlich besitzt die Baumallee eine S-förmige Ausprägung. Eine fahrzeugbeherrschende Fahrweise ist nur möglich mit einer Geschwindigkeit von weniger als 100 km/h. Nach Ende der Baumallee fährt der Fahrer auf eine Kreuzung zu, an welcher bereits ein Fahrzeug steht, das langsam nach links abbiegt. Das abbiegende Fahrzeug dient dazu, den Fahrer des Fahrzeugs zum Verzögern zu bewegen. Sollte der Fahrer zu schnell sein, muss er das Bremspedal benutzen, was zu einem nicht-optimalen Energieverbrauch führt. Zudem führt das Verzögern zu einem „Warten“ hinter dem abbiegenden Fahrzeug. Die Verzögerung ist nicht mehr Teil des NEFZ, soll jedoch die Varianz des Energieverbrauchs erhöhen. Es dient somit der Versuchsanordnung und einer möglicherweise erhöhten Energieverbrauchsausprägung. Danach beträgt die erlaubte Höchstgeschwindigkeit wieder 100 km/h. Die Höchstgeschwindigkeit bildet nicht mehr den NEFZ ab und dient nur der Erhöhung der Varianz im Energieverbrauch. Anschließend folgt ein Abbiegevorgang nach rechts und die Fahrtstrecke endet.

Die außerstädtische konstante Geschwindigkeit von 50 km/h, die der NEFZ vorschreibt, wird in der Fahrszene bereits im Stadtteil umgesetzt. Zusätzlich schreibt der NEFZ eine Beschleunigung von 100 km/h auf 120 km/h vor. In der Fahrszene wurde auf diese verzichtet. Dies hat zwei Gründe: Auf Landstraßen in Deutschland gilt eine Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h. Eine Autobahn ist bisher nicht implementiert und kann nicht ohne größeren Aufwand umgesetzt werden, da die verwendete ESRI City Engine bisher nur US-amerikanische Highways in der Abbildung ermöglicht. Die Vergleichbarkeit mit deutschen Autobahnen ist nicht gegeben. Der NEFZ wird somit auf 100 km/h begrenzt.

### 8.2.3 Zusammenfassung

Die erste Version des Fahrszenarios enthält sechs Fahrsituationen. Das Fahrszenario besteht aus einem städtischen und einem außerstädtischen Bereich. Der städtische Bereich unterteilt sich in zwei Abschnitte: 30 km/h und 50 km/h. Für eine Angleichung an die Segmente des

NEFZ sind das Fahrverhalten beeinflussende Objekte implementiert, wie eine Ampel sowie Rechts- und Linkskurven.

Für eine Verfeinerung wird die Fahrszene, unter Bezugnahme von anwendbaren Messgrößen für Eco-Driving und eines Pretests, analysiert sowie hinsichtlich des NEFZ validiert.

### 8.3 Validierung der Fahrszene

Die Validierung der Fahrszene erfolgte in zwei Stufen. Die Stufe eins wird mit einem Pretest am Tag der offenen Tür 2015 der TUM durchgeführt. Die Stufe zwei ist die Iteration aus der Stufe eins zur Entwicklung eines verwendbaren Prototypens.

#### 8.3.1 Stufe eins

Zur Beurteilung, ob der Ablauf der implementierten Fahrsituationen, wie beabsichtigt erfolgt, wurden die Fahrsituationen in der Reihenfolge ausgewählt, wie sie in der Fahrsimulation auftreten. Mit den Fahrsituationen wurde das tatsächliche Verhalten durch Beobachtung der Teilnehmer mit dem erwarteten Verhalten verglichen.

Es wurden insgesamt acht Fahrsituationen herausgearbeitet. Die Fahrsituationen wurden auf Funktionalität und potenzielle Mängel der entwickelten Fahrsituationen evaluiert, um herauszufinden, ob die erdachte Fahrszene dem NEFZ entspricht. Die einzelnen Fahrsituationen sind der Reihenfolge nach durchnummeriert.

In der ersten Stufe der Entwicklung kam es zu zwei Besonderheiten, dem Überschreiten der Geschwindigkeit und der Baumallee. In der **Baumallee** konnte das Fahrzeug an den Ästen der Bäume hängen bleiben. Wenn ein Fahrer zu weit seitlich an der Straße fuhr, kollidierte das Dach des Fahrzeugs mit den Ästen. Da die Äste statische Objekte sind, blieb das Fahrzeug hängen, weshalb die Fahrstrecke neu gestartet werden musste, um die Datenerhebung nicht zu verzerren. Eine detailliertere Darstellung war wegen der Performanz des Fahrsimulators nicht möglich. Die Teilnehmer wurden angehalten, näher zur Straßenmitte zu fahren. Die Teilnehmer konnten damit antizipieren, dass kein Gegenverkehr kommen wird, sodass die Geschwindigkeit nicht reduziert wurde. Des Weiteren wurde die Einschränkung der Sicht des Fahrers nicht in dem Maße erreicht wie gewollt. Es wurde eine weitere Iteration im Design Zyklus von Hevner (2007) durchgeführt, sodass die Bäume, einerseits weiter vom Straßenrand entfernt wurden, und andererseits Blätter hinzugefügt wurden. Einige Fahrer fuhren konstant über der **Geschwindigkeitsbeschränkung**, wie die Analyse des Fahrverhaltens ergab. Das Verhalten erklärten die Teilnehmer mit der nicht-realistischen Wahrnehmung der Geschwindigkeit in der OpenDS. Eine realitätsnähere Fahrsimulation ist aufgrund der zur Verfügung stehenden Software nicht möglich. Die Messung des Energieverbrauchs durch Beschleunigungen und Verzögerungen ist möglich und für die Experimente hinreichend.

#### 8.3.2 Stufe zwei

Die Fahrszene wurde mit der 3D-Modellierungssoftware CityEngine weiterentwickelt. Der außerstädtische Bereich teilt sich in zwei Abschnitte, einen ländlichen, in dem mit Geschwindigkeiten bis zu 100 km/h gefahren werden darf und einen Hochgeschwindigkeitsabschnitt, in dem

Geschwindigkeiten größer als 100 km/h erlaubt sind. In Abbildung 41 sind die Bereiche Stadt mit 50-km/h-Abschnitt blau, mit 30-km/h-Abschnitt grün sowie der außerstädtische Bereich mit dem Hochgeschwindigkeitsabschnitt lila schattiert. Der Geschwindigkeitsabschnitt mit Geschwindigkeiten von weniger als 100 km/h ist ohne Schattierung.

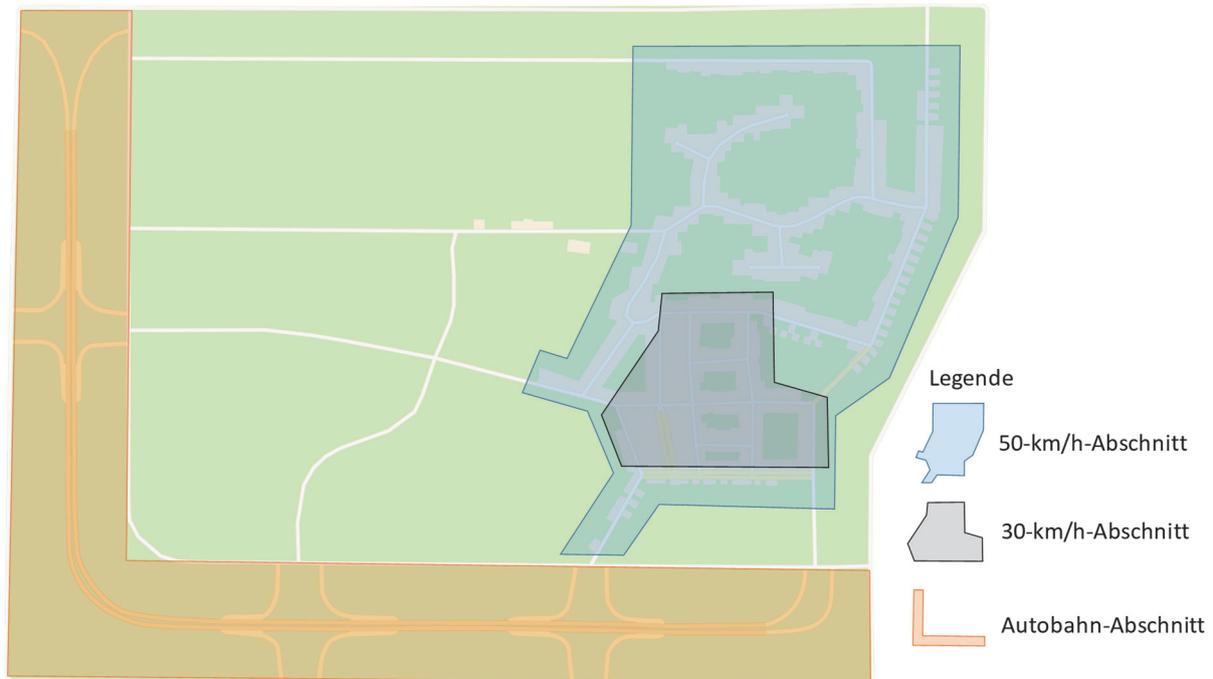


Abbildung 41: Modell – Vogelperspektive der Bereichseinteilung mit städtischem und außerstädtischem Bereich  
Quelle: Eigene Darstellung

Für die Fahrsimulation wurden zwei Strecken entwickelt. Während die mit dem Buchstaben a gekennzeichneten Fahrsituationen zur Strecke ohne Autobahn gehören, gehören diejenigen mit der Kennzeichnung b zur Strecke mit Autobahn. Beide Strecken stimmen in den Fahrsituationen 1 bis 9 sowie 12 und 13 überein. Die Fahrsituationen 10 und 11 unterscheiden sich.

Die Fahrsituationen werden in drei verschiedene Fahrmanöver unterteilt. Grüne Farbkreise stellen Fahrsituationen dar, die zum Ziel haben, das Fahrzeug auf die vorgegebene Geschwindigkeitsbeschränkung zu beschleunigen. Rote Farbkreise repräsentieren Fahrsituationen, welche eine Verzögerung der Fahrgeschwindigkeit beabsichtigen. Die Bremsung kann je nach Fahrstil passiv oder aktiv erfolgen. Letztlich stehen orangene Farbkreise für Fahrsituationen, in welchen der Fahrer angehalten wird defensiv zu fahren. Abbildung 42 zeigt die Punkte, an denen sich die Fahrsituationen in der Fahrscene befinden.

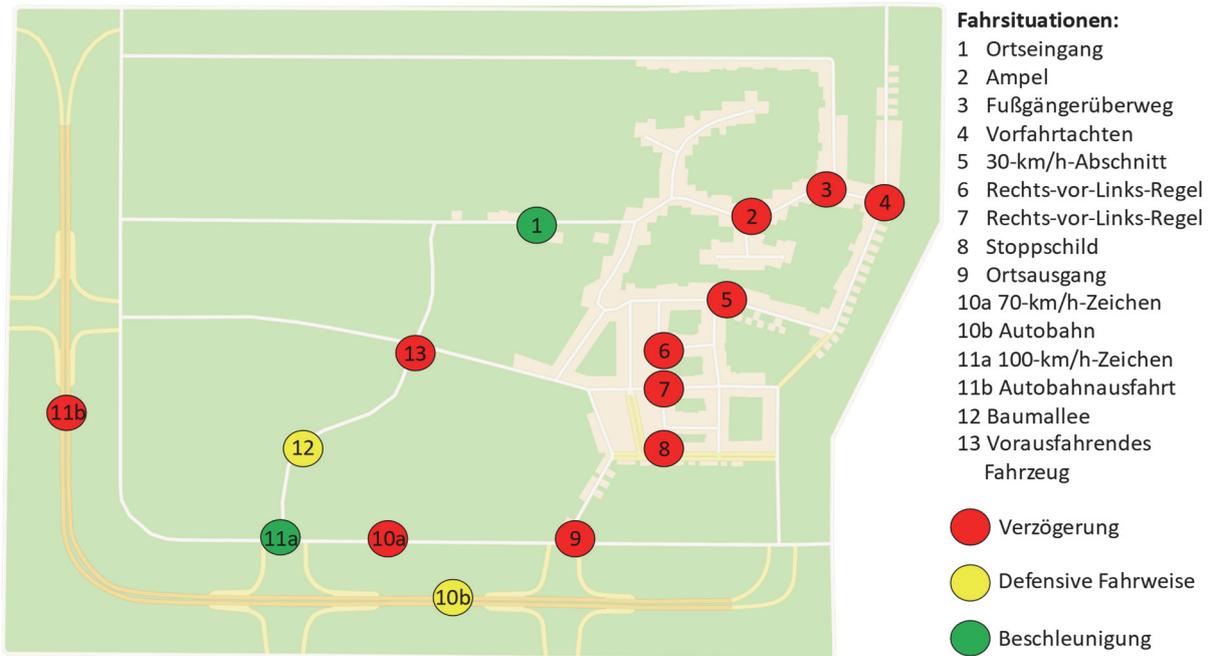


Abbildung 42: Fahrstrecke – Vogelperspektive – Fahrsituationen  
 Quelle: Eigene Darstellung

Für die Betrachtung der Fahrsituationen und dessen Validierung muss berücksichtigt werden, dass die Probanden angewiesen wurden, solange geradeaus zu fahren, bis eine andere Richtung vorgegeben wird.

Einige Fahrsituationen innerhalb des Fahr Szenarios sind auf Beschleunigung, Verzögerung (Abbremsen) und das Halten einer Geschwindigkeit ausgerichtet, um dem NEFZ zu entsprechen. Die erste Strecke enthält zwei Beschleunigungen auf 30 km/h, fünf Beschleunigungen auf 50 km/h und drei Beschleunigungen auf 100 km/h. Während drei Bremsvorgänge das Ziel haben, das Fahrzeug zum Stehen zu bringen, gibt es zwei weitere Verzögerungen auf 30 km/h und eine auf 70 km/h. Die weiteren Verzögerungen der Geschwindigkeit sind notwendig, um eine Abbiegung durchführen zu können oder um andere Fahrzeuge passieren zu lassen. Der Fahrer ist nur gehalten die StVO einzuhalten. Die verbleibenden Verzögerungen befinden sich in Fahrsituation 12, die eine Allee mit Bäumen beinhaltet und einen defensiven Fahrstil verlangt sowie die folgende Fahrsituation 13, in welcher der Fahrer bremsen und auf zwei weitere Fahrzeuge warten muss.

In den Kapiteln 8.3.2.1 und 8.3.2.2 werden detailliertere Informationen bezüglich der entwickelten Strecke mit und ohne Autobahn gegeben. Die Strecken werden gegen den NEFZ validiert. Der Unterschied resultiert in der Abweichung innerhalb des Streckenabschnitts außerorts in zwei Fahrsituationen, welche sich in der zulässigen Höchstgeschwindigkeit, der Streckenlänge und der Gesamtdauer unterscheiden.

### 8.3.2.1 Strecke ohne Autobahn

Die erste Strecke enthält keinen Autobahnabschnitt und stattdessen eine Fahrsituation, welche mit dem zusätzlichen Buchstaben a gekennzeichnet ist. Die Strecke beginnt mit der Fahrsituation 1 und fährt über die folgenden Fahrsituationen in aufsteigender Reihenfolge fort. In Abbildung 43 ist der Streckenverlauf ohne Autobahn dargestellt.

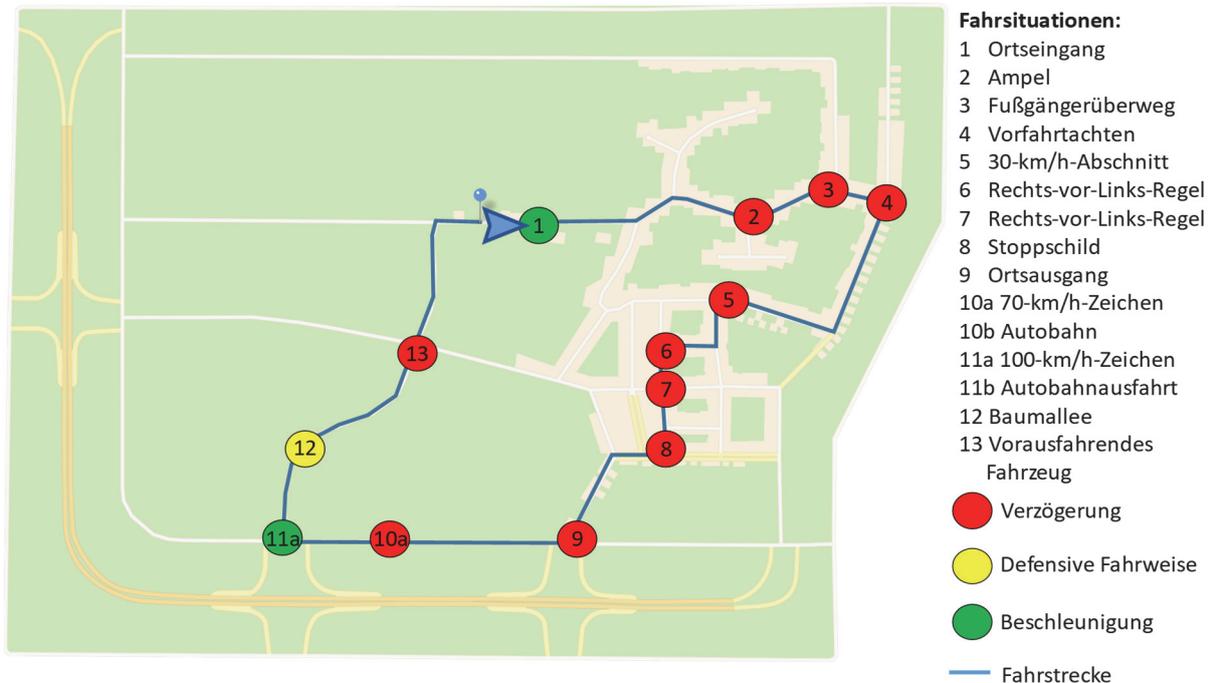


Abbildung 43: Fahrstrecke ohne Autobahn – Übersicht Streckenverlauf  
Quelle: Eigene Darstellung

Aufgrund des fehlenden Streckenabschnitts auf der Autobahn liegt die maximale Geschwindigkeit bei 100 km/h und nicht wie beim NEFZ vorgesehen bei 120 km/h. Die Länge der Strecke liegt bei 3,05 km und dauert in etwa 220 s, ausgehend von einer mittleren Geschwindigkeit unter 50 km/h. Die Angaben können nicht präzise angegeben werden, da je nach gefahrenem Kurvenradius die Streckenlänge abweichen kann. Bei der ermittelten Streckenlänge wurde versucht, den kürzesten Weg zu fahren und die rechte Spur zu verwenden. Unabhängig davon wird die Strecke im Vergleich zum NEFZ deutlich schneller durchlaufen. Demgemäß können nicht alle Fahrmanöver enthalten sein. Als nächstes wird untersucht, in wie weit der NEFZ durch die entwickelte Strecke abgedeckt wird, um eine Einschätzung zu erhalten, wie hoch die Abdeckung der entwickelten Strecke ohne Autobahn zum NEFZ ist.

Da das Vorgeben spezifischer Zeiten für jede Fahroperation nicht praktikabel ist, werden die jeweiligen Fahrsituationen in der vorgegebenen Reihenfolge abgearbeitet. Eine Annäherung an die Dauer jeder Fahroperation wird anhand der horizontalen Länge der Segmente dargestellt. Obwohl die Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge so abgebildet wurden, als ob sie in spezifischen Intensitäten ausgeführt wurden, wird erwartet, dass in der Fahrsimulation die Intensitäten dieser Fahroperationen variieren bis die gewünschte Geschwindigkeit erreicht wird. Ein energieeffizienter Fahrstil würde beispielsweise sanfte Beschleunigungen inkludieren, während ein aggressiver Fahrstil stärkeres Beschleunigen bedeuten würde. In Abbildung 44

sind die einzelnen Fahrsituationen visualisiert nach der in der Fahrsimulation zulässigen Geschwindigkeit.

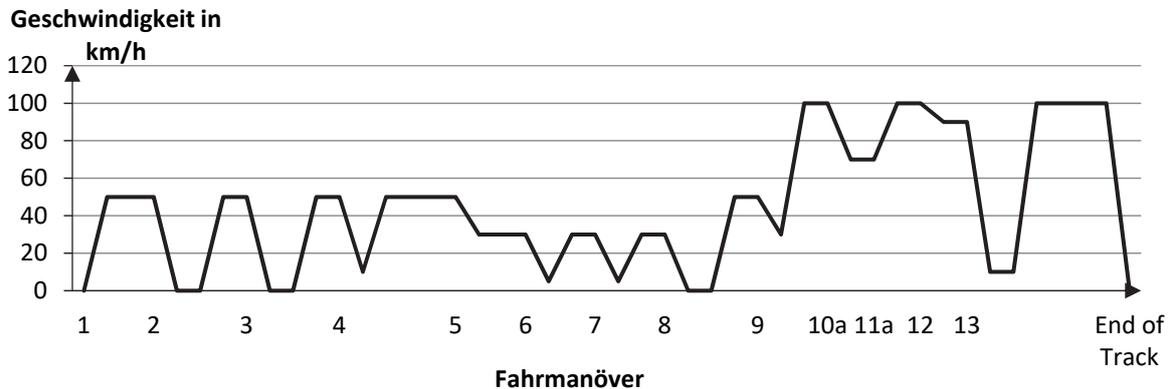


Abbildung 44: Strecke ohne Autobahn – Gefahrene Geschwindigkeit nach Fahrsituationen  
Quelle: Eigene Darstellung

Damit ein direkter Vergleich mit dem NEFZ möglich ist, müssen die Fahrsituationen der einzelnen Streckenabschnitte in der Reihenfolge umgestellt werden. Durch Umstellung der Fahrsituationen der entwickelten Strecke kann die Abdeckung zum NEFZ erreicht werden. Während die Dauer der jeweiligen Fahrsituationen nicht mit der Dauer der Fahrsituationen des NEFZ übereinstimmen, wurden die Fahroperationen aufgrund visueller Aspekte in Grün (Fahrsituation ist im NEFZ enthalten) oder Rot (Fahrsituation ist im NEFZ nicht enthalten) markiert. Die Abdeckung der Fahrsituationen der Strecke ohne Autobahn mit dem NEFZ ist in Abbildung 45 dargestellt.

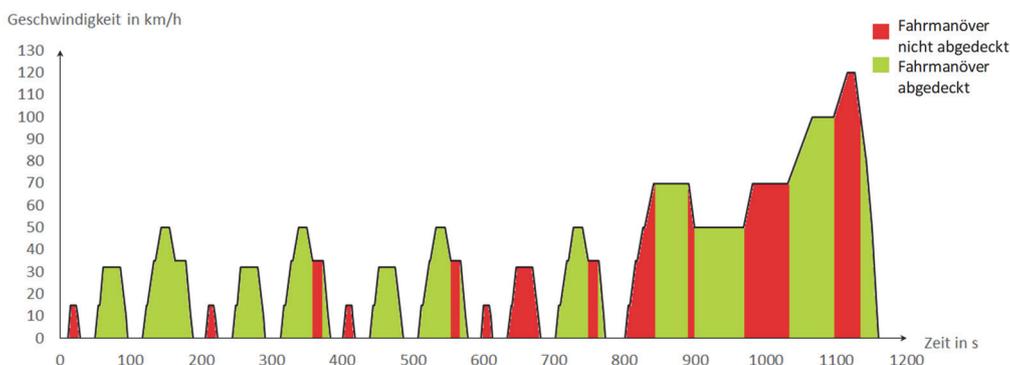


Abbildung 45: Strecke ohne Autobahn – NEFZ-Abdeckung  
Quelle: Eigene Darstellung

Innerhalb des städtischen Abschnitts enthält die entwickelte Strecke keine Fahrmanöver mit einer Geschwindigkeitsbeschränkung von 15 km/h. Der NEFZ sieht 15 km/h für die typische Geschwindigkeit vor Ampeln und Überwegen vor. Um eine wirklichkeitstreue Darstellung des Streckenabschnittes zu erhalten sind eine Ampel und ein Fußgängerüberweg realisiert. Die Strecke enthält nur zwei der vier Beschleunigungen auf 30 km/h und folgende Verzögerungsvorgänge: Eine Bremsung von 50 km/h auf 35 km/h wurde durch eine Bremsung auf 30 km/h ersetzt, während die anderen drei durch Bremsvorgänge auf 0 km/h ausgetauscht wurden oder mit einer Geschwindigkeit, die ein Abbiegen ermöglicht. Die Reduzierung der Geschwindigkeit ist notwendig, da insbesondere auf dem außerstädtischen Streckenabschnitt ein Gefühl für die

Geschwindigkeit in der Fahrsimulationsoftware nicht optimal gegeben ist. Zusätzlich wurde der Abschnitt des NEFZ mit einer zulässigen Geschwindigkeit von 50 km/h außerorts in den städtischen Streckenabschnitt der Fahrszene verlagert.

Die Strecke außerorts enthält ein Segment mit einer konstanten Geschwindigkeit, welche auf eine Geschwindigkeit von 70 km/h beschränkt ist und einen Beschleunigungsvorgang auf eine Geschwindigkeit von 100 km/h beinhaltet. Der 50-km/h-Abschnitt ist bereits im städtischen Bereich berücksichtigt worden. Des Weiteren ist die Beschränkung der Geschwindigkeit auf 70 km/h nicht ausreichend, um beide Segmente des NEFZ mit einer Geschwindigkeit von 70 km/h abzudecken. Der Abschnitt mit einer Geschwindigkeit von 120 km/h ist nicht Teil des Fahrscenarios. Ebenso gibt es keinen abschließenden Verzögerungsvorgang auf 0 km/h aus dem außerstädtischen Abschnitt, wie es im NEFZ vorgesehen ist. Jedoch ist ein Verzögerungsvorgang im Streckenabschnitt mit der Geschwindigkeit von 100 km/h in das Fahrscenario aufgenommen worden. Das implementierte Fahrscenario enthält des Weiteren Fahrmanöver, in welchen der Fahrer von einer Geschwindigkeit von 100 km/h auf 70 km/h bremsen muss und eine Beschleunigung auf 100 km/h, nachdem eine deutlich geringere Geschwindigkeit eingehalten werden musste, um einem vorausfahrenden Fahrzeug zu folgen. Zusätzlich enthält das Fahrscenario zwei weitere Bereiche, in denen die effektive Geschwindigkeitsbeschränkung bei 100 km/h liegt und die Baumallee, in welcher eine Geschwindigkeit unterhalb von 100 km/h erwartet wird.

Die Strecke enthält 23 von 44 Fahrmanövern (52,3 %) innerhalb des städtischen Streckenabschnitts und 5 von 11 Manövern (45,5 %) innerhalb des außerstädtischen Streckenabschnittes. Somit ist eine Abdeckung von 50,9 % zum NEFZ durch die entwickelte Strecke gegeben. Die Strecke enthält weiterhin elf Fahrmanöver, welche nicht im NEFZ vorgesehen sind, um die Varianz im Energieverbrauch zu erhöhen.

### **8.3.2.2 Strecke mit Autobahn**

Die zweite entwickelte Strecke enthält einen Streckenabschnitt auf der Autobahn und weitere Fahrsituationen, welche mit dem zusätzlichen Buchstaben b markiert sind. Der Streckenverlauf startet analog zur im Unterabschnitt 8.3.2.1 beschriebenen Strecke. In Abbildung 46 ist die entwickelte Strecke mit Autobahn visualisiert.

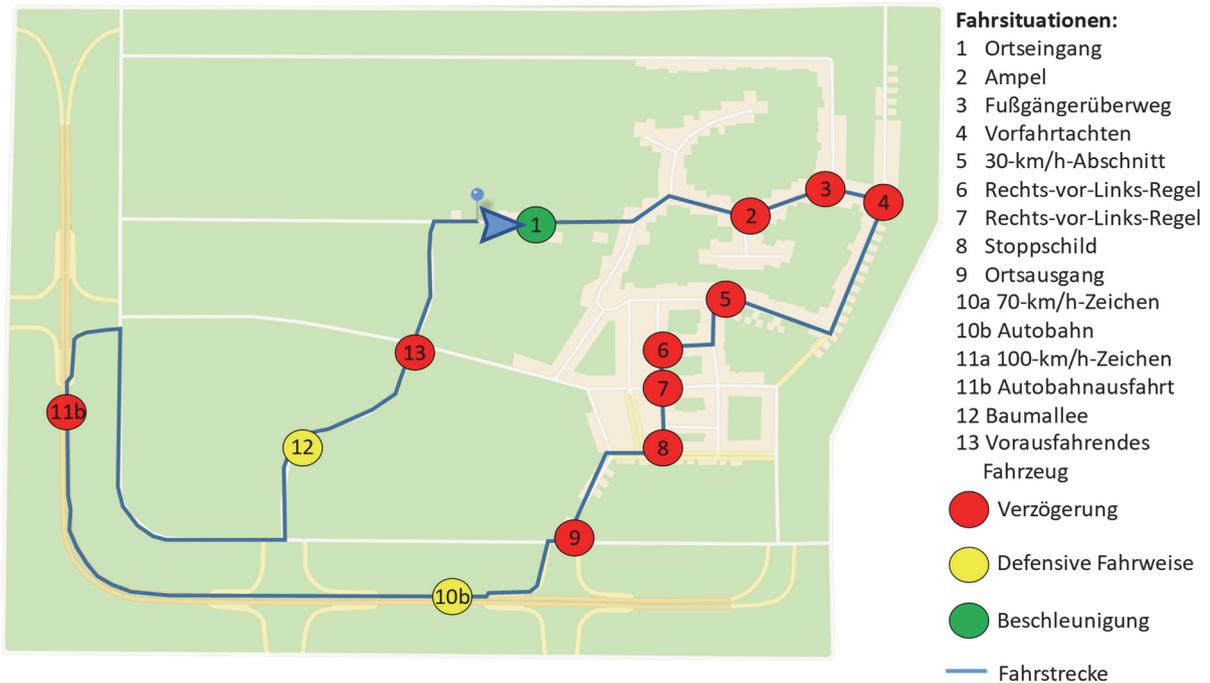


Abbildung 46: Strecke mit Autobahn – Streckenverlauf inkl. Fahrmanöver  
 Quelle: Eigene Darstellung

Die Unterschiede liegen in der maximalen Geschwindigkeit, die anhand einer Richtgeschwindigkeit von 130 km/h definiert ist. Allerdings kann der Fahrer die Geschwindigkeit auf über 130 km/h erhöhen, da die Autobahn keine verpflichtende Geschwindigkeitsbeschränkung enthält. Die Strecke ist in der Gesamtlänge mit 4,64 km länger als die Strecke ohne Autobahn. Die Fahrtdauer der Strecke beträgt 270 s bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 62 km/h. Aufgrund des höheren Streckenanteils außerorts im Vergleich zur Strecke ohne Autobahn ist die Durchschnittsgeschwindigkeit der Strecke mit Autobahn höher als die der Strecke ohne Autobahn.

Deutliche Differenzen weisen die beiden Fahrmanöver innerhalb des Streckenabschnitts auf der Autobahn auf, welche in Abbildung 46 in den Fahrmanövern 10b und 11b beobachtet werden. Abbildung 47 zeigt die erwarteten Geschwindigkeiten in Abhängigkeit zur jeweiligen Fahrsituation, wie oben beschrieben und in Abbildung 46 bereits illustriert.

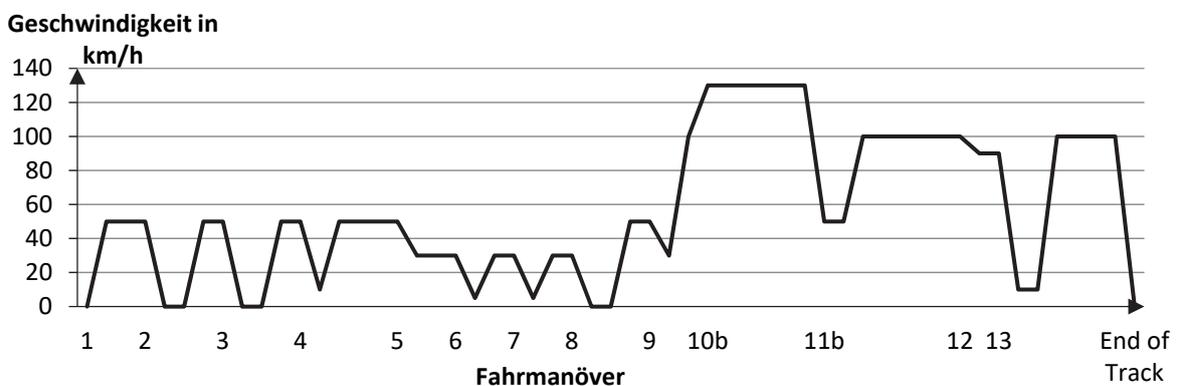


Abbildung 47: Streckenabschnitt mit Autobahn – Geschwindigkeit nach Fahrsituation  
 Quelle: Eigene Darstellung

Nach der Fahrsituation 8, mit welcher der städtische Abschnitt abschließt, kommt die Fahrsituation 9, bei welcher der Fahrer anstelle der Landstraße auf die Autobahn geführt wird. Danach darf der Fahrer im eigenen Ermessen beschleunigen, da neben der empfohlenen Richtgeschwindigkeit von 130 km/h keine Geschwindigkeitsbeschränkung existiert. Ein energieeffizienter Fahrstil verlangt das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit, weshalb die erwartete Geschwindigkeit für die Autobahnstrecke nicht schwanken sollte und zusätzlich höhere Geschwindigkeiten als 130 km/h vermieden werden sollten. Auf dem Autobahnabschnitt sind keine Verkehrsteilnehmer implementiert, um mögliche Verzerrungen durch das Auffahren oder die Reaktion auf andere Verkehrsteilnehmer zu vermeiden.

Mit dem Erreichen des Autobahndendes (11b) wird der Fahrer abbremsen müssen, um die Abfahrt und die Abbiegung auf die ländliche Straße sicher nehmen zu können. Sobald die ländliche Straße erreicht wird, wird eine Beschleunigung auf 100 km/h erwartet. Der Fahrer folgt der Straße und führt eine Linksabbiegung an der nächsten Kreuzung durch. Dies führt wieder zu der Allee mit Bäumen.

Ähnlich zur Strecke ohne Autobahn enthält die Strecke mit Autobahn zwei Beschleunigungen auf 30 km/h und fünf Beschleunigungsvorgänge auf die Geschwindigkeit von 50 km/h. Im Gegensatz dazu existieren nur zwei Beschleunigungen auf 100 km/h und eine Beschleunigung (auf 130 km/h oder höher) wurde auf die Autobahnstrecke verlagert.

Wie in der Strecke ohne Autobahn existieren drei Bremsvorgänge mit dem Ziel, den Fahrer auf 0 km/h zu verlangsamen und ein Bremsvorgang auf eine Geschwindigkeit von 30 km/h. Während die Bremsung auf die Geschwindigkeit von 70 km/h nicht in der Strecke mit Autobahn enthalten ist, ist eine äquivalente Bremsung notwendig, um die Autobahn verlassen zu können. Alle anderen Bremsvorgänge enthalten keine spezifischen Geschwindigkeitsvorgaben.

Durch Umstellen der Fahrsituationen wird eine Strecke erstellt, die spezifische Fahrsituationen des NEFZ enthält. Analog zum Unterabschnitt 8.3.2.1 werden die Fahrsituationen aufgrund visueller Aspekte wieder in Grün oder Rot markiert. Die jeweilige Dauer der Manöver im Fahrscenario entspricht ebenfalls nicht denen der Operationen im NEFZ. Sie sind aufgrund ihrer Länge sowie der unterschiedlichen Fahrweisen der Fahrer verschieden. In Abbildung 48 ist die Übereinstimmung der entwickelten Strecke mit dem NEFZ visualisiert.

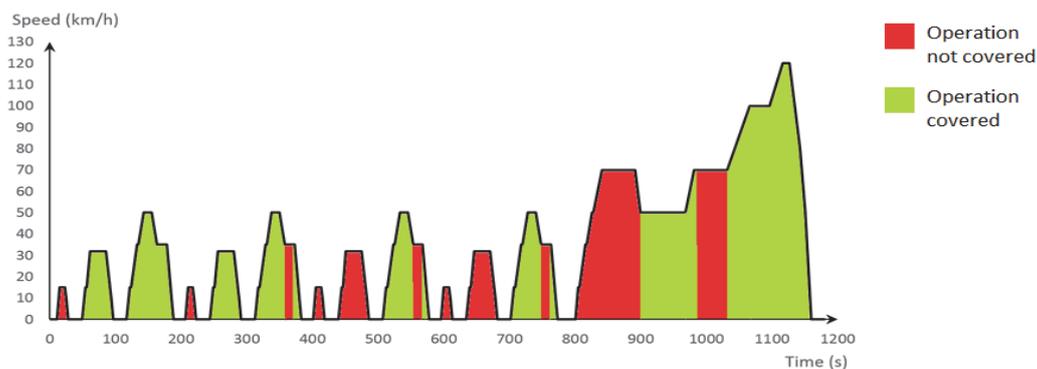


Abbildung 48: Strecken mit Autobahn – NEFZ-Abdeckung  
Quelle: Eigene Darstellung

Da beide Strecken denselben Pfad innerhalb des städtischen Segments enthalten, decken die korrespondierenden Fahrsituationen auch die gleichen Fahrsituationen in Bezug auf den NEFZ ab. Das betrifft alle Fahrsituationen mit einer Geschwindigkeit bis zu 50 km/h sowie den Abschnitt des NEFZ außerorts mit der Geschwindigkeit von 50 km/h, da es für das Fahrscenario in den städtischen Streckenabschnitt herangezogen wurde.

Der Streckenabschnitt außerorts ist im Vergleich zur Strecke ohne Autobahnabschnitt, welcher im Unterabschnitt 8.3.2.1 genauer beschrieben wurde, unterschiedlich. Während die zweite Strecke keinen Abschnitt enthält, indem der Fahrer mit einer Geschwindigkeit von 70 km/h fahren muss, enthält es einen Abschnitt auf der Autobahn, welcher dem 120-km/h-Segment des NEFZ ähnlich ist. Allerdings ist er aufgrund der empfohlenen Richtgeschwindigkeit mit 130 km/h substituiert. Am Autobahnende wird eine Verzögerung durch eine Bremsung auf die Geschwindigkeit von 50 km/h erwartet, gefolgt von einer Beschleunigung auf 100 km/h auf der außerstädtischen Straße. Diese Sequenz der Fahrsituationen deckt die zwei dazugehörigen Beschleunigungen des NEFZ von einmal 50 km/h auf 70 km/h und einmal von 70 km/h auf 100 km/h sowie das konstante Segment des NEFZ mit 100 km/h ab.

Abschließend deckt die Strecke 23 von 44 Fahrsituationen (52,3 %) innerhalb des städtischen Abschnitts und sieben von elf Fahrsituationen (63,6 %) im Abschnitt außerorts ab. Die Abdeckung beträgt insgesamt 54,5 %. Die entwickelte Strecke enthält ebenso elf weitere Fahrsituationen, welche nicht im NEFZ vorgesehen sind und der Erhöhung der Varianz im Energieverbrauch dienen.

#### **8.4 Diskussion der Fahrscenarios**

Die zwei entwickelten Strecken decken über 50 % des NEFZ ab. Die Strecke mit Autobahn besitzt die größte Abdeckung mit 54,5 %. Für eine Messung des Energieverbrauchs kann der NEFZ, wie in Unterkapitel 8.1 erörtert, gekürzt werden. Eine vollständige Abdeckung ist somit nicht erforderlich. Weitere Iterationen schaffen keine bessere Energieverbrauchsmessung, sondern nur eine höhere Abdeckung zum NEFZ. Folglich ist die Abdeckung hinreichend genau für die Experimente.

Bei fünf Runden dauert der Abschnitt ohne Autobahn rund 19 Minuten und mit Autobahn rund 23 Minuten. Bei der Zeitberechnung zur Durchführung der Experimente sind zusätzlich die Zeiten für das Einstellen des Fahrsimulators auf die Person wie Sitzhöhe und Sitzabstand zum Lenkrad mit zu berücksichtigen. Darüber hinaus kann es vorkommen, dass der Proband eine Runde wiederholen muss, beispielsweise bei Abweichung von der vorgegebenen Fahrstrecke. Dies erfordert weitere vier bis fünf Minuten je nach Strecke. Ein Überschreiten eines 30 Minutentaktes hätte zur Folge, dass pro Teilnehmer 45 bis 60 Minuten einkalkuliert werden müssten. Der Zeitraum von 30 Minuten sollte nicht überschritten werden. Unter der Berücksichtigung der zusätzlichen Zeit, welche als Puffer anzusehen ist, sind beide Strecken für ein Experiment geeignet.

Die wenigen Fahrzeuge innerhalb der Fahrscene sind nicht realistisch im Vergleich zum Verkehr in einer deutschen Stadt. Insbesondere bei der Wiederholung der Strecken kann es zu

Lerneffekten kommen, beispielsweise gilt dies für das links abbiegende Fahrzeug in Fahrsituation 13. Bei einer höheren Zahl von Fahrzeugen in der Simulation kommt es jedoch zu Einschränkungen in der Performanz. Aufgrund der Leistungsprobleme der Fahrsimulationsoftware ist die entwickelte Fahrscene auf Elemente begrenzt, die eine stabile Bildrate für die Fahrsimulation gewährleisten können.

Während der NEFZ den typischen Einsatz eines Fahrzeugs in Europa repräsentiert, konzentrierte sich die Fahrscene zunächst auf die Umsetzung, welche für die Fahrscenarien für die Bewertung von Eco-Driving-Feedbacksystemen geeignet ist. Die Fahrscene weicht daher in Teilen vom NEFZ ab. Des Weiteren war es wichtig, dass die Varianz des Kraftstoffverbrauchs erhöht wird und es zu möglichst vielen Verzögerungen und Beschleunigungen kommt. Abweichungen vom NEFZ können in der Anzahl der Wiederholungen, der Reihenfolge sowie des Ausschlusses bestimmter Fahrsituationen in Abhängigkeit von der gewählten vorgeschlagenen Strecke beobachtet werden. Beide Strecken decken etwa 50 % der Fahrsituationen des NEFZ ab und führen Fahrsituationen ein, mit denen in einem realistischen Szenario weitere Eco-Driving-Systeme getestet werden können. Für diese Arbeit ist jedoch die Messung eines möglichen Unterschiedes im Energieverbrauch hinsichtlich motivierter und nicht-motivierter Benutzer ausreichend.

Aufgrund des Autobahnabschnitts könnten Probanden testen wollen, wie schnell das Fahrzeug fahren kann. Das würde die Ergebnisse in zweierlei Hinsicht verfälschen. Zum einen gäbe es Fahrer, die extreme Verbräuche verursachen würden, und zum anderen ist die Messgenauigkeit, wie in Abschnitt 7.2 dargelegt wurde, nicht mehr gegeben. Demgemäß ist die Strecke ohne Autobahnabschnitt für die Experimente heranzuziehen.

Der Pretest enthält keinen demografischen Fragebogen, sodass eine präzise Auswertung nach dem Alter der Teilnehmer und der Fahrerfahrung nicht möglich ist. In dem Pretest wurden mehrere Fahrsituationen ausgewertet. Die Teilnehmer dieses Experiments waren Studierende an der TUM und externe Besucher des Tags der offenen Tür im Alter von etwa 20 Jahren. Der Pretest zeigte darüberhinaus, dass die Probanden die Geschwindigkeit schwer einschätzen konnten, was zu einer Verzerrung der Ergebnisse führen kann.

## 9 Implementierung der Energieverbrauchsfeedbacksysteme

Bevor mit der Implementierung der Feedbacksysteme begonnen werden kann, ist das Kombiinstrument mit dem Geschwindigkeitsmesser und der Motordrehzahlanzeige in einer Android-Applikation zu erstellen. Zu beachten ist, dass die Anzeige für die Feedbacksysteme ausreichend Raum für die Darstellung von visuellem Feedback vorsieht. Die Anzeige der Geschwindigkeit und der Motordrehzahl erfolgte in Anlehnung an das Original (Mercedes W112).

Das methodische Vorgehen wird in Anlehnung an Hevner (2007) durchgeführt. Die Relevanz und die Wissensbasis sind in Kapitel 3 dargelegt worden. Der iterative Prozess zur Erstellung eines Prototypen erfolgt durch agile Softwareprogrammierung mit einem Wiki (Beck et al. 2001a, 2001b). Außerdem sind wöchentliche Treffen, sogenannte „Sprints“, vereinbart, um den aktuellen Stand der Software im Team überprüfen zu können und die Weiterentwicklung sicherzustellen.

Die Kommunikation der Fahrsimulationssoftware zu den einzelnen Geräten erfolgt über ein eigenes WLAN. Die Fahrsimulationssoftware bietet eine eigene Schnittstelle. Es werden XML-Dateien zum Endgerät übertragen. Die Dateien werden dann von dem Smartphone oder dem Tablet geparkt und für die Vibration der Uhr oder Darstellung im Kombiinstrument aufbereitet.

### 9.1 Visuell

Das visuelle Feedback wird in Anlehnung an das Eco-Foot<sup>23</sup> von Jamson et al. (2015a) übernommen (vgl. Abschnitt 3.4.1). Die drei unterschiedlichen Status des visuellen Feedbacks zum Energieverbrauch sind in Abbildung 49 demonstriert.

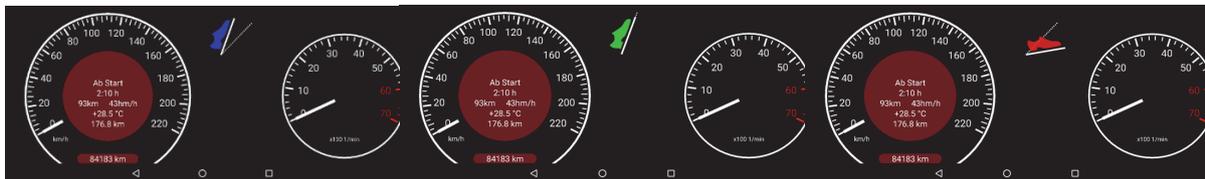


Abbildung 49: Eco-Driving-Status des visuellen Feedbacksystems  
Quelle: In Anlehnung an Jamson et al. (2015a)

Für die Umsetzung in der Fahrsimulationssoftware wird im ersten Schritt der Pedalerror kalkuliert. Für diese Berechnung ist die Änderung des Pedaldrucks, welcher auf die Anpassung im Pretest, der im Abschnitt 10.2 eingehender beschrieben wird, zurückzuführen ist, zum Pedalerror zu berücksichtigen. Im Unterschied zur Darstellung von Jamson et al. (2015a) befindet die Anzeige sich nicht im Teil des Motordrehzahlmessers, sondern ist größer und zentrierter zwischen den Anzeigen zu Geschwindigkeit und Motordrehzahl untergebracht.

In der Fahrsimulation wird, wie im Unterkapitel 7.2 geschildert, ein Automatikgetriebe verwendet. Eine Berechnung des Pedalerrors für jeden einzelnen Gang ist erforderlich.

<sup>23</sup> Vgl. Abschnitt 3.4.1

Zusätzlich sind im Fahrscenario in den Bereichen, in denen eine Beschleunigung stattfinden soll, Trigger-Punkte zu setzen, um eine Unterscheidung zwischen einer konstanten und einer nicht-konstanten Fahrweise vornehmen zu können.

## 9.2 Haptisch

Es werden die zwei Alternativen aus Unterkapitel 3.6 untersucht: Smartwatches und Fitnessarmbänder. **Fitnessarmbänder** bieten zwar die Möglichkeit der Übertragung der Signale, allerdings erfolgt die Kommunikation asynchron. Ein Signal wie Läuten oder Vibration muss jeweils per Software gesetzt und anschließend mit dem Armband synchronisiert werden. Die Synchronisation erfolgt bei Geräten des Herstellers Fitbit alle 15 bis 30 Minuten (Fitbit 2017). Für ein realitätsnahes Feedback ist die Zeitdauer zu lang. Die Synchronisation dauert ebenfalls einige Sekunden, sodass eine Vergleichbarkeit zum visuellen Feedback nicht mehr gegeben ist. Eine asynchrone Kommunikation ist für die Signalübertragung des haptischen Feedbacks nicht geeignet. **Smartwatches** bieten die Möglichkeit der synchronen Kommunikation und sind für die Experimente somit geeignet. Als Smartwatch standen die LG Urban und Asus Zen Watch zur Verfügung. Es wird ausschließlich die Uhr eingeblendet und die Vibrationsfunktion der Uhr genutzt. Weitere Benachrichtigungen wie SMS wurden ausgeschlossen. Die Android-Applikation läuft auf beiden Uhren. Die LG Urban wird im Weiteren als Beispiel verwendet und in Abbildung 50 gezeigt.



Abbildung 50: Haptisches Feedbacksystem via Smartwatch LG Urban  
Quelle: LG Newsroom (2015)

Für die Vibration werden in Android zwei verschiedene Status unterschieden: an und aus. Beim Überschreiten des Grenzwertes wird als Feedback sofort eine Vibration von 500 ms („an“) ausgelöst. Danach folgt eine Pause von 4500 ms („aus“). Die Pause ist aus zwei Gründen länger als die Vibration: Erstens, damit der Fahrer nicht dauerhaft gestört wird und zweitens, damit ausreichend Zeit vorhanden ist, das Verhalten anzupassen, falls sich der Energieverbrauch im nicht-optimalen Bereich befindet. Die Pause kann kürzer sein, wenn der Fahrer den optimalen Bereich erreicht. Wechselt er in weniger als 4500 ms wiederholt in den nicht-optimalen Bereich, wird ein erneutes Vibrieren ausgelöst.

Zusätzlich wurden weitere Vibrationsmuster getestet.

- Eines mit 300 ms für „an“ und dann jeweils um 100 ms kürzer werdende Zeitspannen, in denen das Feedback erfolgt. Der Fahrer soll durch die Erhöhung der Signalfrequenz veranlasst werden, dringend sein Verhalten zu ändern.
- Ein anderes Vibrationsmuster, bei welchem die Dauer des Status „an“ jeweils um 100 ms zunimmt und die Dauer der Pause wie beim ersten Vibrationsmuster um jeweils 100 ms abnimmt. Dadurch soll die Intensität der Vibration erhöht werden.
- Ein weiteres Vibrationsmuster ist eine Vibration für 100 ms mit einer anschließenden Pause von 100 ms. Der Vorgang wird fünfmal wiederholt. Das Muster ist stetig und wechselt im Vergleich zu den vorherigen Vibrationsmustern nicht in der Dauer. Es ist jedoch deutlich kürzer und ist auf eine Sekunde beschränkt. Der Vorteil ist, dass der Fahrer innerhalb einer Sekunde (Reaktionssekunde) in den optimalen Bereich wechseln kann und das Feedback damit endet. Während es bei den beiden ersten Mustern dazu kommen kann, dass die Vibrationen trotz Änderung des Fahrverhaltens noch erfolgen.

## 10 Fahrsimulatorexperiment: Pretest

Zur Vermeidung möglicher Verzerrungen im Experiment wurde ein Pretest in Form eines Pre-Experimentes durchgeführt (Van Teijlingen/Hundley 2001). Der Pretest fand im Zeitraum vom 17.10.2015 bis 02.02.2016 statt und wurde am 04.02.2016 durchgeführt. An dem Pretest des Fahrsimulators nahmen wissenschaftliche Mitarbeiter des Lehrstuhls für Wirtschaftsinformatik der Technischen Universität München und Schüler, die am Schülertag die Fakultät besuchten, teil. Am 04.02.2016 testeten 18 Personen den Fahrsimulator. Eine detaillierte Auswertung war aufgrund des Alters und des Ausfalls der Kameras nicht möglich. Der Pretest diente zur Prüfung, ob Energiedaten vom Fahrsimulator in die Logfiles geschrieben werden, um später Messungen durchführen zu können.

Die Aufzeichnungen der Pretests erfolgte durch die Beobachtung der Teilnehmer hinsichtlich der Steuerung des Fahrsimulators, der Auflösung, der Bildwiedergabe, des Ansprechverhaltens und weiterer Auffälligkeiten. Ergänzend wurden die Teilnehmer, welche den Fahrsimulator testeten, während und nach der Fahrt gefragt, was ihnen besonders gefällt und was nicht. Zusätzlich wurden die Teilnehmer beobachtet, um mögliche Verbesserungen auffinden zu können, beispielsweise Aussagen während der Fahrt, ob die Rückspiegel die Breite des Fahrzeugs wiedergeben etc.

Die Ergebnisse der Beobachtungen wurden in einem Wiki festgehalten. Im Weiteren diente das Wiki der kontinuierlichen Verbesserung des Fahrsimulators. Einfache Fehler, wie die Spiegelbreite und die Fahrzeugdimensionen, wurden direkt nach den Tests an den nächsten Probanden angepasst. Fehler in der Fahrumgebung wurden per E-Mail dokumentiert.

Die einzelnen zu bearbeitenden Punkte wurden mit einem selbst erstellten Rankingsystem kategorisiert. Das Rankingsystem ist in Tabelle 21 dargestellt.

Ausprägung strategische Relevanz für Nutzerexperimente	Ausprägung Risiko		
	Niedrig	Mittel	Hoch
Gering	Niedrig	Mittel	Hoch
Mittel	Mittel	Mittel	Hoch
Hoch	Hoch	Hoch	Hoch

Tabelle 21: Rankingsystem für die Fehlerbehebung des Fahrsimulators  
Quelle: Eigene Darstellung

Für die Experimente wurden zwei Feedbacksysteme nach Hevner (2007) entwickelt, welche im Abschnitt 10.1 eingehender untersucht werden.

### 10.1 Feedbacktests

Bisher sind Experimente sowie Umfragen mit haptischem Feedback anhand eines Gaspedals als Feedbackgeber durchgeführt worden (Abbink 2006; Adell et al. 2008; Coughlin 2009; ISO 2010; Azzi et al. 2011; Mulder et al. 2011; Staubach et al. 2012; Birrell et al. 2013). Es stellt sich die Frage, ob das Feedback von Probanden über die Smartwatch wahrgenommen wird. Einen Einblick in verschiedene Formen von haptischem Feedback geben Jamson et al. (2015a).

Für die Wahrnehmung ist es erforderlich, dass die Probanden das visuelle Feedback sehen können.

### **10.1.1 Visuell**

Die Fahrsignale sind dahingehend zu testen, dass die Übertragung von der Fahrsimulationssoftware an die Android-Applikation mit einer ausreichenden Geschwindigkeit für eine realitätsnahe Darstellung erfolgt. Dies bedeutet, dass die Bildwiederholungsrate bei mindestens 25 Hz liegen muss.

Es wird vermutet, dass es schwierig ist, nach den von Jamson et al. (2015a) festgelegten Werten optimal zu fahren. Eco-Driving erfordert offensichtlich ein langsames Beschleunigen, als es in der Realität der Fall ist. Ein Fahrstil, um das Fahrzeug im optimalen Bereich nach Jamson et al. (2015a) zu fahren, erfordert eine ständige Anpassung der Geschwindigkeit.

Das visuelle Feedback soll so gestaltet sein, sodass die Probanden es gleich wahrnehmen können. Somit sind die Bedingungen an den zeitlichen Rahmen (Thalen 2006), welcher in Unterabschnitt 3.1.1 eingehender untersucht wurden, erfüllt.

### **10.1.2 Haptisch**

Bezüglich des haptischen Feedbacks wurde in Unterkapitel 3.6 festgestellt, dass eine Smartwatch dafür geeignet ist.

- 1) Im ersten Schritt war die Übertragung der Signale zu testen. Für die Experimente standen die zwei Smartwatches LG Urban und Asus Zen Watch zur Verfügung. Die Asus Zen Watch zeigte im Pretest wahrnehmbare Verzögerungen beim Übertragen des Feedbacks an und gab daher Feedback, das nicht mit dem vom Fahrer gesehenen Feedback im Kombiinstrument übereinstimmt. Die Übereinstimmung war bei der LG Urban gegeben, wahrscheinlich weil die LG Urban im Vergleich zur Asus Zen Watch das Feedback über WLAN anstelle von Bluetooth überträgt.
- 2) Im zweiten Schritt wird überprüft, ob die Teilnehmer das Feedback überhaupt spüren. Alle Teilnehmer gaben an, das Feedback am Handgelenk wahrzunehmen.
- 3) Im dritten Schritt wird untersucht, inwieweit die Teilnehmer in der Lage sind, verschiedene Vibrationsmuster wahrzunehmen. Es wird ein eigenes Programm entwickelt. Hierfür werden die in Abschnitt 9.2 vorgestellten, unterschiedlichen Vibrationsmuster analysiert. Es wurde festgestellt, dass alle Muster von den Probanden wahrgenommen wurden. Muster mit einer Zeitdauer von über einer Sekunde waren zu lang und wurden von allen Probanden als irritierend empfunden. Dies liegt an der Dauer des haptischen Feedbacks, da visuelles und haptisches Feedback unterschiedlich wahrgenommen werden.

Das Feedback wird beim Eintreten in den nicht-optimalen Bereich mit einer Vibration von 500 ms und einer anschließenden Pause von 4500 ms gegeben. Dieses Intervall hat den Vorteil, dass sich die Nachrichten zur Situation wiedergegeben werden können.

### **10.1.3 Kombination der Feedbackarten**

Das Feedback soll innerhalb von einer Sekunde gegeben werden, damit der Fahrer darauf reagieren kann und das Feedback innerhalb der Reaktionssekunde erfolgt. Das ist sowohl beim visuellen als auch beim haptischen Feedback der Fall.

Beide Feedbackarten sollen von den Probanden wahrgenommen werden können. Dies wird durch Fragen der Teilnehmer in Bezug auf die Erkennbarkeit und Wahrnehmung ermittelt sowie von den Probanden positiv rückgemeldet.

Des Weiteren ist die Funktionalität der Kameras für die Datenaufzeichnung zu prüfen. Außerdem sind die Pedalanordnung und -betätigungen zu überprüfen, um mögliche Verzerrungen durch den Fahrsimulator ausschließen zu können. In diesem Zusammenhang soll die Gangschaltung analysiert werden.

Ferner wird nach sonstigen Auffälligkeiten gefragt und/oder besondere Beobachtungen notiert.

## **10.2 Ergebnisse des Pretest**

Der Pretest am Schülertag zeigte, dass die Smartwatch von der Akkukapazität mit der gewählten Vibrationseinstellung in der Lage ist, einen ganzen Tag zur Verfügung zu stehen, somit können zur Reduzierung von Verzerrungen die Experimente mit einer Uhr durchgeführt werden. Die LG Urban besitzt dabei die besten Verbindungseigenschaften und wird für die Experimente in Kapitel 12 herangezogen.

Der Pretest zeigt auch einige Schwachstellen auf. Die Kameraaufzeichnung funktionierte nicht. Diese schalteten sich aufgrund von Hitze aus. Das Hitzeproblem wurde behoben, indem die Kameras direkt (ohne Schutzhülle) auf den Stativen befestigt wurden.

Die Probanden waren nicht in der Lage mit der Gangschaltung das Fahrzeug zu bewegen. Zwei Aspekte sind die Ursache: Zum einen gibt es im Fahrsimulator keinen Druckpunkt der Kuppelung und zum anderen ist das Motorgeräusch des Fahrsimulators monoton. Ein Erahnen eines zu niedrigen oder zu hohen Ganges ist somit nicht möglich. Für eine manuelle Gangschaltung ist es erforderlich, dass der Druckpunkt der Gangschaltung fühlbar ist. Der Fahrsimulator wird daher mit einer Automatikgangschaltung verwendet, um sicherzustellen, dass es keine Verzerrungen der Daten aufgrund des Wechsels des Ganges kommt (Wager et al. 2014). Weitere Einflüsse, welche durch die Gangschaltung verursacht werden, erfordern keine weitere Betrachtung (Ngo et al. 2013).

Die Teilnehmer des Schülertages waren i. d. R. nicht im Besitz einer gültigen Fahrerlaubnis, sodass ein Testen der Schaltung und Pedale nur bedingt möglich war.

Es wurde bemängelt, dass die Pedale nicht realitätsnah sind. Dies hat verschiedene Ursachen.

Der Pretest zeigte, dass sich die Pedale beim Betätigen verschieben. Um die im Fahrsimulator auftretenden Kräfte abzufedern und eine Verschiebung der Pedale zu verhindern, wurden die Pedale fest in den Bodenplatten verankert. Weil sich der Fahrersitz und das Armaturenbrett auf

zwei verschiedenen Modulen befinden, verschob sich der Fahrersitz beim Bremsen nach hinten. Deshalb sind die Module mit Stahlplatten fixiert worden.

Außerdem wurde die Höhe der Pedalstellungen als nicht realistisch empfunden. Deshalb wurde der Abstand der Pedale in einem Serienfahrzeug von 2015 des BMW 118i gemessen und soweit wie möglich an dieses angepasst. Die Fanatec Pedale stehen folglich nicht vollständig plan auf der Bodenfläche, sondern sind im hinteren Teil um 4 cm angehoben, damit diese dem Serienfahrzeug ähnlicher sind. Dennoch bestehen weiterhin Einschränkungen, da die Pedale vom Befestigungswinkel her sich nach unten neigen, während sie sich im Serienfahrzeug nach hinten/oben neigen.

Der Druckpunkt des Bremspedals ist zwar spürbar, für eine Vollbremsung ist das Pedal jedoch gefühlt „stark“ zu drücken. Die Vibrationsmotoren am Bremspedal konnten von der Fahrsimulationsoftware nicht angesteuert werden. Daher ist das Simulieren von einem Anti-Blockiersystem und von blockierenden Reifen nicht möglich. Dies vermindert das Gefühl des Bremsvorgangs. Der Druckpunkt des Bremspedals wurde verringert, sodass ein realistischeres Gefühl gegeben wird. Dazu wurden die Bremssteifigkeit und der Pedalweg iterativ justiert und die Dämpfung des Bremspedals angepasst. Außerdem wurde der Druckpunkt des Bremspedals bemängelt. Der Dämpfer am Bremspedal wurde daher entsprechend verstellt.

Eine Ansteuerung des Vibrationsmotors am Gaspedal war mit der Fahrsimulationsoftware ebenfalls nicht möglich, sodass weder verschiedene Untergründe noch ein Verlust der Bodenhaftung simuliert werden konnten. Dies bedeutet, dass auch die Traktion nicht über die Vibrationsmotoren in den Pedalen simuliert werden konnte.

Ferner wurde der Blickwinkel des verwendeten BMW 1er Modell in OpenDS an einen BMW 118i aus dem Dezember 2015 auf 1,36 m angepasst. Dies entspricht der Augenhöhe einer 1,71 m großen Person. Die Sitzhöhe wurde dabei optimal ausgerichtet, sodass davon ausgegangen werden kann, dass größere oder kleinere Personen die Sitzhöhe entsprechend anpassen würden.

Die Geschwindigkeitsanzeige wurde auf eine eigens entwickelte Android-Applikation übertragen. Für eine „flüssige“ Darstellung sind 25 Bilder pro Sekunde (englisch: frames per second) notwendig, sodass die Darstellung mit einer Frequenz von 25 Hz sichergestellt wurde. Zusätzlich werden nur dann neue Werte an den Tacho der Applikation gesendet, wenn sich die Geschwindigkeit ändert, um die Datenmenge gering zu halten und die 25 Hz sicherstellen zu können. In den Pretests zeigte sich wiederholt ein „Sprung“ der Tachonadel von einer Geschwindigkeit X auf eine Geschwindigkeit Y, sodass die Darstellung der Fahrsignale als nicht realistisch beurteilt wurde. Mittels Interpolation der Werte wurden Zwischenwerte erstellt und somit die Anzahl der Bilder auf 50 Hz erhöht. Dies stellt die realitätsnahe Darstellung der Fahrsignale sicher und es kommt zu keinem „Sprung“ der Tachonadel.

Das Motorengeräusch wurde als zu leise empfunden. Die Wiedergabe erfolgte über die Projektoren und irritierte die Teilnehmer, sodass im Armaturenbrett jeweils links und rechts für ein realistischeres Fahrgefühl Lautsprecher verbaut wurden.

Der Fahrsimulator bietet keine Möglichkeit, die Signale des Lenkrads oder des Kombiinstruments an die Simulationssoftware zu übertragen, sodass eine Aufzeichnung nicht möglich ist. Für den Energieverbrauch sind die Signale nicht notwendig.

Das Lenkrad hatte softwarebedingt keine Force-Feedback-Funktion. Der Hersteller konnte eine Force-Feedback-Funktion für ein realistischeres Gefühl nachliefern. Jedoch unterstützt es keine Seitenkräfte, sodass die realitätsnahe Simulation bedingt möglich ist. Für eine bessere Wahrnehmung des Force-Feedback, ist die softwareseitig eingestellte Vibrationsstärke verdoppelt worden.

## 11 Fahrsimulatorexperiment: Durchführung

Das Laborexperiment fand vom 19. bis 29.02.2016 jeweils von 08:00 bis 20:00 Uhr im Labor 01.13.008 im Mathematik/Informatik Gebäude der Technischen Universität München statt. Das Experiment wurde mit den Teilnehmern der Lehrveranstaltung „Einführung in die Wirtschaftsinformatik (IN0021)“ durchgeführt.

Als Anreiz wurde ein Notenbonus vergeben. Der Notenbonus beinhaltete die Verpflichtung zur Teilnahme an vier Umfragen und dem Experiment sowie zur Verfassung eines abschließenden Kurzberichts. Für diese Arbeit ist jedoch ausschließlich das Experiment von Bedeutung. Der Notenbonus in Höhe von 0,3 wurde vergeben, sofern am Experiment und an mindestens drei Umfragen teilgenommen sowie ein Abschlussbericht eingereicht wurde. Zusätzlich mussten die Umfragen vollständig und die Testfragen korrekt beantwortet sein. Für die Vergabe ist die Abschlussnote in der Klausur von 4,0 oder besser notwendig gewesen. Der Notenbonus konnte nicht vergeben werden, wenn die Note in der Klausur besser als 1,3 war. Die Anzahl der Kursteilnehmer inkl. der Studierenden, welche den Kurs wiederholten, betrug 210. Den Notenbonus nahmen 123 Personen in Anspruch.

Vor dem Experiment bekamen die Probanden einen Umfragebogen zur Erhebung der demographischen Daten sowie die Instruktionen und Informationen zum Ablauf des Experimentes und der Verwendung der Daten (s. Anhang B.1). Zur Identifizierung und Anonymisierung erhielt jeder Teilnehmer eine ID.

Die Studierenden bekamen folgende Treatments<sup>24</sup>: ein visuelles, ein visuell-haptisches und ein haptisches. Es wurde beachtet, dass die einzelnen getesteten Treatments jeweils einen Anteil von einem Drittel der Grundgesamtheit ausmachen. Für eine statistische Auswertung sind je Treatment mindestens 30 Teilnehmer notwendig. Sobald diese Anzahl erreicht wurde, wurde das nächste noch nicht getestete Feedbacksystem herangezogen. Die letzten Probanden bekamen jeweils zufällig ein Treatment zugewiesen, sodass sich die Anzahl gleichmäßig je Treatment erhöhte. Um der Randomisierung gerecht zu werden, wurde den Teilnehmern ihr Treatment nicht mitgeteilt. Außerdem wurden zwei Treatments als Fahrszenarien<sup>25</sup>: „Pendler“ und „Familie“ vom selben Probanden gefahren.

### 11.1 Grundgesamtheit

Am Versuch nahmen 123 Probanden teil. Die Probanden waren zwischen 17 und 37 Jahre alt ( $M = 20,37$ ,  $SD = 2,74$ ). Die durchschnittliche Fahrerfahrung mit Automatikgetrieben beträgt 4,17,  $SD = 2,386$ . Die Daten für die Fahrerfahrung mit Automatikgetriebe sind nicht normalverteilt. Dabei sind die Angaben zur Erfahrung mit einem Automatikgetriebe unterschiedlich stark in beide Richtungen ausgeprägt, so geben 28 % der Teilnehmer an, keine oder wenig Erfahrung mit Automatikgetrieben zu haben („strongly disagree“) und 29 % geben an, dass sie viel Erfahrung im Umgang mit einem Automatikgetriebe gesammelt haben. Die Verteilung ist somit divergent und zeigt eine Polarisierung, die aufgrund der Ausprägung der Variablen zu erwarten war. Die restlichen Personen sind in der Mitte der 7er-Likert-Skala zu finden und sind

---

<sup>24</sup> Between-Subject s. Unterkapitel 4.3

<sup>25</sup> Within-Subject Design s. Unterkapitel 4.3

unentschlossen, ohne Fahrerlaubnis oder haben keine Angaben gemacht. Die durchschnittlichen gefahrenen Kilometer pro Jahr betragen 7122,44 km,  $SD = 8889,00$  km. Insgesamt besitzen 37 % der Probanden ein eigenes Fahrzeug. Zusätzlich ist die Frequenz der Nutzung von Fahrzeugen abgefragt worden ( $M = 3,30$ ). Dies bedeutet, dass die Teilnehmer im Durchschnitt das Fahrzeug einmal in der Woche bis zweimal im Monat verwenden und die durchschnittlichen Kilometer je Fahrt zwischen 136,97 km und 273,94 km liegen. 23 % der Teilnehmer sind weiblich.

## 11.2 Fahraufgabe

Die Fahraufgabe fand in einem hoch-exakten Fahrsimulator (*high fidelity driving simulator*) statt, welcher im Unterkapitel 11.3 näher betrachtet wird. Die Probanden mussten entlang einer festgelegten Strecke fahren, welche in Unterabschnitt 8.3.2.1 beschrieben ist. Die Distanz der Strecke beträgt im Durchschnitt 3,1 km. Die Probanden wurden angewiesen, die Verkehrsregeln einzuhalten und so realitätsnah wie möglich zu fahren. Die StVO war einzuhalten.

Die Fahraufgabe wurde in fünf Teile aufgeteilt: Eingewöhnungsrunde („familiarization“), Baseline 1, Szenario 1, Baseline 2 und Szenario 2. In der Eingewöhnungsrunde sollten sich die Teilnehmer mit dem Fahrsimulator und dessen Eigenschaften vertraut machen. Dadurch soll der Fahrer ein Gefühl für das Ansprechen der Pedale, die Lenkung, die Beschleunigung und Verzögerung sowie das Kurvenverhalten des Fahrzeuges in der Fahrsimulation erhalten. Baseline 1 und Szenario 1 gehören jeweils zusammen. Die Baseline kann als Messung der Kontrollinstanz zum Fahrscenario 1 verstanden werden. Ebenso verhält es sich mit der Baseline 2 und Szenario 2. Die Baseline 2 ist sogar notwendig, um mögliche Lerneffekte herausrechnen zu können. Diese Effekte werden in der Literatur auch als „*Maturation Effect*“ bezeichnet (Lewis-Beck et al. 2004).

## 11.3 Fahrsimulator

Der Fahrsimulator hat eine hoch-exakte Genauigkeit im Hinblick auf Messwerte und die Abbildung der Realität. Die eingesetzte Software auf dem Fahrsimulator ist OpenDS in der Version 3.5 und ist speziell für den wissenschaftlichen Einsatz entwickelt worden (Math et al. 2013). Die Simulationssoftware lief auf einem sogenannten Gaming PC mit CPU Intel® Core™ i7-5820K (15 MB Cache, bis zu 3,60 GHz), Motherboard ASUS X99-A, Grafikkarte ASUS Strix GeForce GTX 980 DC2OC mit 4 GB RAM und Taktfrequenz von 1.279 MHz, 16 GB DDR4-2133-Speicher und Betriebssystem Windows 8.1 auf einer SATA Crucial MX100 SSD 512 GB. Der Simulator besteht aus einem Teil einer Mercedes E Klasse. Eingesetzt wurden die beiden Frontsitze und das Armaturenbrett. Die Frontsitze sind in Höhe und Neigung sowie Abstand zum Lenkrad verstellbar. Das Kombiinstrument W212 im Armaturenbrett wurde durch ein HTC Nexus 9 Tablet mit einer eigens entwickelten Android-Applikation ersetzt. In Abbildung 51 ist die Nutzerperspektive dargestellt.

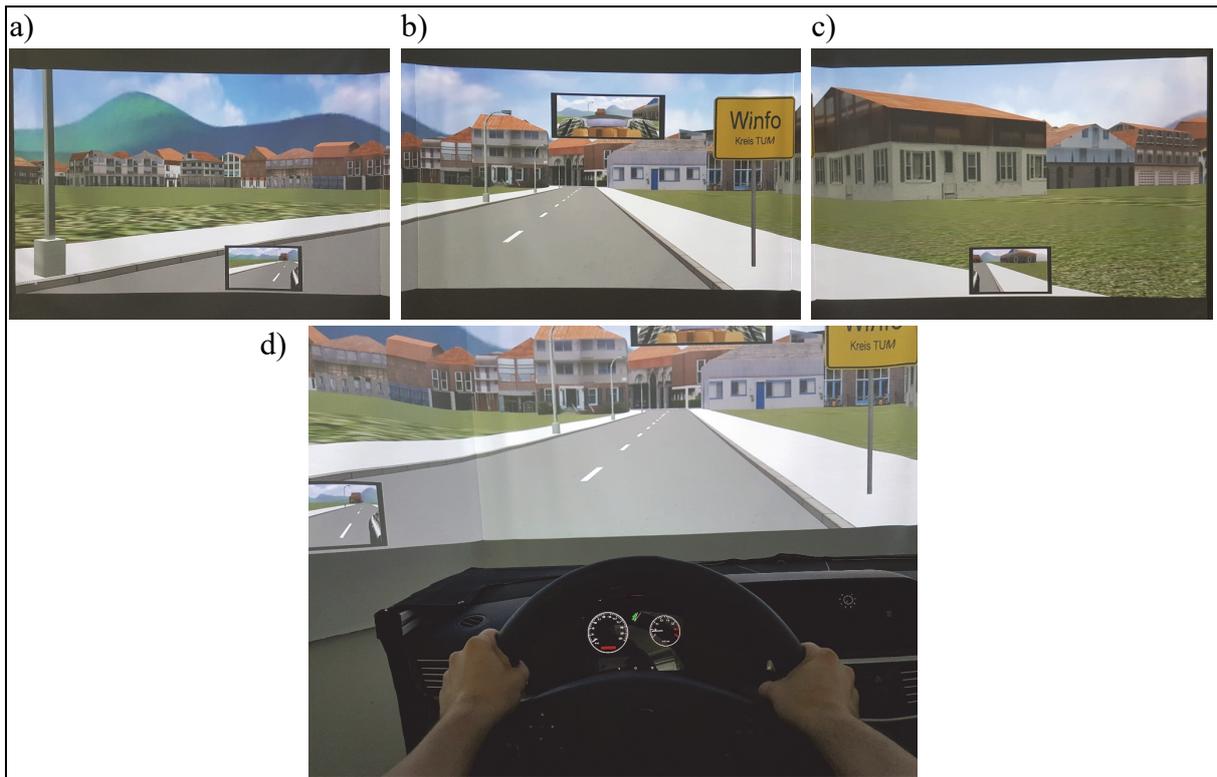


Abbildung 51: Nutzerperspektive: Fahrsimulator: a) Blick nach links, b) Blick nach vorne, c) Blick nach rechts und d) Fahrscene aus Fahrerperspektive  
 Quelle: Eigene Darstellung

Die Android-Applikation erhält über WLAN von der Fahrsimulationssoftware über ein verfügbares XML-Schema die Fahrsignale wie Geschwindigkeit und RPM. Es war notwendig das Schema zu erweitern, sodass die Geschwindigkeitsdaten aufgezeichnet und angezeigt werden konnten. Zusätzlich musste die Datenrate zur Übertragung der Fahrsignale angepasst werden, um die gesendeten Signale so schnell zu übertragen, dass der Fahrer die Fahrsignale als „fließend“ empfindet. Die Aktualisierungsrate der Daten ist daher von 1 s auf 20 ms herabgesenkt worden. Aus den Erkenntnissen des Pretests aus dem Abschnitt 10.2 wurde zusätzliche eine Interpolation verwendet, sodass eine Bildfrequenz von 50 Hz vorlag. Zur Sicherstellung der Netzwerkqualität wurde ein exklusives WLAN mit IEEE 802.11b/g Standard verwendet.

Des Weiteren ist die Lenkung mit einer Wheelbase von Fanatec (ClubSport Wheel Base V2.5) umgesetzt worden (Endor AG 2017). Die Lenkung weist eine hohe Genauigkeit (1000 Hz) auf und verfügt über eine Force-Feedback-Funktion (Endor AG 2017). Und die Lenkung ermöglicht zudem einen Lenkeinschlag von 900° (Endor AG 2017). Ergänzt wurde die Lenkung um eine Schaltung (ClubSport Shifter SQ V 1.5) mit sieben Gängen inklusive Rückwärtsgang und Pedale (ClubSports Pedale V3) mit einer Auflösung von 4096 Werten je Pedal von Fanatec (Endor AG 2017). Die Pedale unterscheiden sich von denen in Serienfahrzeugen, wie in Abschnitt 10.2 erörtert wurde.

Die Motorgeräusche werden monoton über zwei Lautsprecher, welche jeweils links und rechts im Armaturenbrett verbaut sind, simuliert.

Das Projektionssystem besteht aus drei Vorwärtskanälen mit einer Auflösung von jeweils 1280 x 1024 Pixeln. Das Bild ist ohne Ränder (edge-blended), um eine Gesamt-Horizontal-Ansicht von 170° zu erhalten. Die virtuelle Welt wird vor den Fahrer projiziert. Es werden drei Projektoren, welche auf einer Leinwand mit einer Gesamtlänge von 5,6 m auf den drei Bildschirmen, die im 45°-Winkel zueinander aufgestellt sind, verwendet. Die Bildwiederholungsrate wurde auf eine konstante Frequenz von 60 Hz festgelegt. Die Frequenz gleicht der Wiederholungsrate der Darstellung der Fahrsimulationssoftware. Die Seiten- und Rückspiegel sind auf der Vorderseite in der Mitte dargestellt (vgl. Abbildung 51 a, b und c). Der Rückspiegel zeigt für ein realitätsnäheres Fahrgefühl in der unteren Hälfte die hintere Sitzbank an (vgl. Abbildung 51 b). In Abbildung 52 ist der Aufbau des Fahrsimulators in der Versuchsumgebung dargestellt.



Abbildung 52: Aufbau der Versuchsumgebung: Fahrsimulator  
Quelle: Eigene Darstellung

#### 11.4 Messgrößen und Experimentdesign

Das Experimentdesign ist eine Mischung aus einem Between- und Within-Subject-Design, wie in Unterkapitel 4.3 eingehender erörtert wurde. Zur Messung des Experimentes wird als abhängige Variable der Energieverbrauch herangezogen. Alle Teilnehmer starten mit einem Volumen an Energie, in diesem Fall 60 Liter Diesel. Zusätzlich wird für jede Runde der Start- und Endzeitpunkt gemessen, um mit der Durchschnittsgeschwindigkeit pro Runde die Distanz jeder Runde messen zu können. Die Durchschnittsgeschwindigkeiten könnten aufgrund unterschiedlicher Kurvenfahrten geringfügig voneinander abweichen. Dadurch ist es möglich, einen normierten Energieverbrauch zu kalkulieren, welcher als „mileage“ bezeichnet wird (Truschin et al. 2011) und in Deutschland als Effektivmaß in l/100 km bekannt ist.

Die unabhängigen Variablen des Experimentes sind: kein Feedback, welches als Referenzfahrt eine „Baseline“ darstellt (Abkürzung: b), und drei „Treatments“: visuelles (v), haptisches (h)

und visuell-haptisches (v-h) Feedback. In der Baseline werden dem Fahrer Angaben zur aktuellen Geschwindigkeit in km/h und der Motordrehzahl in RPM angezeigt. Die Treatments sind zusätzlich in der Anzeige dargestellt und als intermittierendes Signal zu verstehen (Kircher et al. 2014), welches auf den Erkenntnissen von Jamson et al. (2015a) aufbaut. Die verwendeten Werte, welche für die Experimente herangezogen werden, sind im Abschnitt 9.1 im Detail untersucht worden.

- Das visuelle Feedback wird im Kombiinstrument zwischen Geschwindigkeitsmesser und Motordrehzahlanzeige eingeblendet, wie es in heutigen Serienfahrzeugen üblich ist. Des Weiteren handelt es sich um ein sogenanntes intermittierendes Eco-Driving-Feedback (Kircher et al. 2014).
- Das haptische Feedback wurde mit einer Smartwatch umgesetzt, welche vibriert, wenn das Gaspedal außerhalb des beschriebenen Pedalwinkels nach den Erkenntnissen von Jamson et al. (2015a) lag. Das haptische Feedback wird gegeben, wenn der Fahrer keinen optimalen Pedalwinkel hat. Dies geschieht sofort für die Dauer von 500 ms mit anschließender Unterbrechung für 4500 ms, wenn der Pedalwinkel außerhalb des optimalen Pedalerrors ist. Anschließend wiederholt sich der Vorgang, sofern der Fahrer nicht optimal fährt. Zusätzlich wird den Probanden gesagt, dass die Uhr lediglich Fahrinformationen überträgt, sodass keine nicht-fahrbezogenen Nachrichten an die Uhr zugestellt werden. Dies sollte sicherstellen, dass die Uhr als reiner Feedbackgeber fungiert. Die detaillierten Daten zum Feedback sind in Kapitel 9 beschrieben worden.
- Das visuell-haptische Feedback ist die Kombination von den oben dargestellten Feedbacksystemen.

Als Moderator wird das Energiebewusstsein anhand der in Kapitel 6 entwickelten Energiebewusstseinskala (s. Anhang B.2) sowie die ebenda aus der Psychologie adaptierte Motivationskala herangezogen.

### **11.5 Durchführung**

Die Teilnehmer des Experimentes bekamen jeweils eine eindeutige Identifikationsnummer (ID) zugewiesen. Den Teilnehmern wurde zufällig („fully randomized“) ein bestimmtes Treatment zugeordnet. Bei der Zuweisung des Treatments wurde darauf geachtet, dass die Verteilung der Treatments gleichmäßig ist, da homogene Gruppenverteilungen mit ähnlicher Grundgesamtheit die Auswertung des Between-Subject-Designs erleichtern.

Nach dem Ausfüllen des Fragebogens bekamen die Teilnehmer eine Einweisung in die Einstellungen des Fahrsimulators. Diese beinhaltete eine Erklärung, wie die Sitzposition optimal eingestellt werden kann, dass die Verkehrsregeln zu beachten sind und weitere Hinweise zum verwendeten Fahrzeug, den angepassten BMW 118i aus OpenDS (s. Kapitel 10).

Danach wurde den Teilnehmern das Experiment erklärt und eine Runde zur Eingewöhnung gefahren, damit die Probanden sich an das Fahren mit dem Fahrsimulator gewöhnen und sich mit dem Steuerungsverhalten, der Beschleunigung, der Navigationsanzeige und der zu fahrenden Strecke vertraut machen. Anschließend an die Eingewöhnungsrunde wurde eine Baseline

gefahren, das heißt ohne ein Feedbacksystem. Nach der ersten Baseline (Baseline 1) wurde das Szenario „Pendler“ gefahren.

Im Szenario „Pendler“ wurde den Probanden die Anweisung gegeben: „Sie befinden sich auf dem Weg zur Arbeit und sollen rechtzeitig dort sein.“ Es wurde absichtlich auf weiteren Zeitdruck verzichtet, damit die Teilnehmer nicht die zulässige Geschwindigkeit überschreiten. Ferner sollte diese Situation intuitiv dazu führen, dass die Probanden in diesem Szenario geneigt sind nicht-motiviert zu sein, um energiesparend zu fahren und sich daher weniger für das Energieverbrauchsfeedback zu interessieren.

Nach dem Szenario „Pendler“ wurde eine weitere Baseline (Baseline 2) gefahren, gefolgt von einem Szenario 2.

Szenario 2 unterstellt eine Familien-Situation. Den Probanden wurde die Anweisung gegeben: „Sie befinden sich auf einem Ausflug mit ihrer Familie und haben die eigenen Kinder auf dem Rücksitz.“ Dies sollte dazu dienen, dass die Probanden möglichst sicher und damit hinsichtlich des Energieverbrauchs motivierter fahren. Insbesondere der Gedanke an die Verantwortung für die eigenen Kinder auf dem Rücksitz sollte dies verstärken.

Das Labor war in zwei Bereiche eingeteilt: Fahrsimulator und Vorraum. Die Bereiche sind mit einer Trennwand voneinander separiert worden, sodass der Fahrer nicht den Eindruck hat, von hinten beobachtet zu werden. Der Experimentator nahm den Beifahrersitz während der Fahrt neben dem Probanden ein.

Die Umfragen wurden in einem Nebenraum durchgeführt. Die Umfragen wurden unter Aufsicht eines zweiten Experimentators ausgefüllt. Während der Proband den Bogen ausfüllte, wurden die Fragebögen, als auch dazugehörigen Unterlagen mit der ID des Probanden für die spätere Auswertung und Dokumentation versehen.

Nach dem Ausfüllen des Fragebogens erhielten die Teilnehmer die Anweisung, nicht mit den anderen Studierenden der Vorlesung zu sprechen, um mögliche Verzerrungen durch Vorwissen ausschließen zu können. Den Teilnehmern wurden dabei keine Details über das Experiment genannt, um sicherzustellen, dass die Messgröße nicht bekannt ist und Verzerrungen der Ergebnisse vermieden werden.

## 12 Fahrsimulatorexperiment: Auswertung

Bevor eine detailliertere Auswertung erfolgt, wurden mögliche Ausreißer, welche das Messergebnis verzerren könnten, identifiziert und nähergehend untersucht.

In dem Experiment konnten Ausreißer identifiziert werden.

- Die Ausreißer, welche besonders auffällig waren, waren 16 Teilnehmer, die nicht in Besitz einer gültigen Fahrerlaubnis waren. Sie waren zum einen stark damit beschäftigt überhaupt das Fahrzeug zu führen und zum anderen waren diese Fahrten von großer Unsicherheit beim Lenken sowie dem Durchführen der Fahraufgabe geprägt. Dies äußerte sich auch dahingehend, dass die Eingewöhnungsrunden mehrfach wiederholt werden mussten und das Experiment zum Teil abgebrochen werden musste. Probanden ohne Führerschein wurden vom Experiment danach ausgeschlossen.
- Ebenso wurden Fahrer, welche das Experiment offensichtlich nicht mit der nötigen Ernsthaftigkeit durchführten, ausgeschlossen. Es betraf eine Person, welche in der Stadt mit 130 km/h und mehr fuhr und das Experiment als Rennspiel verstand.
- Zusätzlich gab es Personen, die einen signifikant hohen oder niedrigen Verbrauch hatten. Auffällig sind dabei die hohen Werte der gefahrenen Kilometer je Fahrt von 136,97 km bis 273,94 km, das heißt, die Messstrecke wurde nicht eingehalten. Die Messwerte konnten für eine valide Auswertung nicht herangezogen werden.

### 12.1 Fahrszenarien

Im nächsten Schritt wurden die Fahrszenarien miteinander verglichen und anschließend eine genauere Analyse der Treatments in den einzelnen Fahrszenarien durchgeführt. Die beiden Fahrszenarien sind im Unterabschnitt 4.2.1.2 vorgestellt worden. Für die bessere Darstellung der Ergebnisse wird das Fahrszenario „Pendler“ als S1 und „Familie“ als S2 bezeichnet.

Bevor mit der Auswertung fortgefahren werden kann, wird der verbleibende Datensatz auf Ausreißer durch Boxplots (Hoaglin et al. 1986) zur Vermeidung von Verzerrungen geprüft (Bortz/Schuster 2010, 170). Eine Überprüfung auf nicht gültige Datensätze wurde ebenfalls durchgeführt. Ausreißer führen bei einer ANOVA zu Verzerrungen der Ergebnisse. Insgesamt sind 26 Ausreißer identifiziert worden.

Für S1 ergibt sich eine Schiefe von 3,321 und Kurtosis von 26,720 ( $M = 0,2805$ ,  $SD = 0,8199$ ) mit den Grenzen des 95 %-Konfidenzintervalls 0,1310 (unten) und 0,4300 (oben). Als signifikante Ausreißer werden die Fahrer mit den IDs 31, 117 und 123 identifiziert. Extremwerte weisen die Fahrer mit den IDs 10 und 34 auf. Die genauere Betrachtung der Daten zeigt, dass bis auf den Fahrer mit der ID 10 Gemeinsamkeiten bestehen. So ist im Vergleich zum Mittelwert mit einer sehr langsamen Geschwindigkeit gefahren worden (10 bis 20 km/h). Die niedrige Geschwindigkeit hat zur Folge, dass der Energieverbrauch höher ist wegen des Fahrens in einem niedrigeren Gang. Die Person mit der ID 10 weist eine zu hohe Geschwindigkeit auf und fuhr in der Stadt nach Betrachtung der Videoaufnahmen um die 80 km/h. Auch der Kommentar des Probanden zeigt, dass die Person nicht in der Lage war, die gefahrene Geschwindigkeit zutreffend einzuschätzen. Die Extremwerte und Ausreißer liegen sowohl oberhalb als auch unterhalb des Boxplots und werden für die weitere Analyse nicht herangezogen.

Für S2 ergibt sich eine Schiefe von 9,820 und Kurtosis von 103,214 ( $M = -0,0785$ ,  $SD = 1,2504$ ) mit den Grenzen des 95 %-Konfidenzintervalls  $-0,3065$  (unten) und  $0,1495$  (oben). Als signifikante Ausreißer werden die Fahrer mit den IDs 3, 29 und 75 identifiziert. Der Fahrer mit der ID 34 weist einen Extremwert auf. Auch hier zeigte sich eine zu niedrige Geschwindigkeit als Gemeinsamkeit der Werte. Die Person mit der ID 34 besitzt keine Fahrerlaubnis und war bereits in S1 als Extremwert auffällig. Die Ausreißer und Extremwerte werden bei der weiteren Analyse nicht berücksichtigt.

Von 123 fehlen fünf Datensätze aufgrund des Versuchsabbruchs. Nach der Ausreißeranalyse verbleibt ein Datensatz mit 97 Probanden.

### 12.1.1 Vergleich der Fahrscenarien „Pendler“ und „Familie“

Für das Prüfen der Fahrscenarien sind die Daten nach Szenarien transformiert worden. Aufgrund der Transformation des Datensatzes entstehen 246 Datensätze. Es fehlen zehn Fälle wegen des Experimentabbruchs. Für die Auswertung werden die Kriterien aus Unterkapitel 4.5 herangezogen. Durch die unterschiedlichen Ausreißer ergeben sich 99 Datensätze für S1 und 100 Datensätze für S2.

Die Szenarien sind jeweils im Energieverbrauch auf 1/100 km normiert. Zusätzlich wurden Lerneffekte durch die Baselines herausgerechnet. Die gefahrenen Baselines je Proband wurden zunächst gemittelt. Anschließend ist der Mittelwert von den dazugehörigen Ergebnissen des Energieverbrauchs vom jeweiligen Fahrscenario abgezogen worden. Die Baseline stellt somit die x-Achse an der Stelle null dar. Dies ergibt einen um die Baseline normierten Energieverbrauch in 1/100 km.

Der Test der Homogenität der Varianzen nach Levene (Levene 1960; Bortz/Schuster 2010, 129) ergab Heteroskedastizität,  $F(1,197) = 23,089$ ,  $p = 0,000$ . Die ANOVA weist signifikante Unterschiede zwischen den Runden auf,  $F(1,197) = 63,179$ ,  $p = 0,000$ , mit signifikanten Robustheitstests Welch-Test und Brown-Forsythe jeweils  $F(1,157,549) = 62,866$ ,  $p = 0,000$ . Die Mittelwerte weisen einen Vorzeichenwechsel auf  $M_{S1} = 0,253$ ,  $SD_{S1} = 0,454$  und  $M_{S2} = -0,166$ ,  $SD_{S2} = 0,265$ . Die Prozentsätze für Kolmogorov-Smirnov ( $D(97) = 0,109$ ,  $p = 0,007$ ) und Shapiro-Wilk ( $D(97) = 0,967$ ,  $p = 0,015$ ) weisen für S1 keine Normalverteilung auf. Hingegen weist die Prozentsätze für Kolmogorov-Smirnov ( $D(97) = 0,063$ ,  $p = 0,200$ ) und Shapiro-Wilk ( $D(97) = 0,976$ ,  $p = 0,069$ ) für S2 eine Normalverteilung auf. Außerdem wird auf Schiefe und Kurtosis geprüft. Beide Fahrscenarien weisen keine signifikante Schiefe auf, da der Quotient aus dem Wert und dem Standardfehler innerhalb der Grenzwerte  $-1,96$  und  $1,96$  liegt (S1:  $0,470$ ,  $SE_{S1} = 0,245$ , S2:  $-0,417$ ,  $SE_{S2} = 0,245$ ). Die Kurtosis ist in beiden Szenarien negativ (S1:  $-0,222$ , S2:  $-0,258$ ) und nicht signifikant. Ein Indiz für eine Normalverteilung. Eine Normalverteilung ist bei der Verwendung von nicht-parametrischen Tests keine Voraussetzung (Shirley 1977; Philip et al. 1999).

Die Stichproben der Fahrscenarien sind im Within-Subject-Design erhoben worden und führen zu einer Abhängigkeit untereinander. Es wird zusätzlich der Test über zwei verbundene Stich-

proben des nicht transponierten Datensatzes durchgeführt (Bortz/Schuster 2010, 133f.). Die deskriptiven Statistiken belegen in den Szenarien ebenfalls ein Vorzeichenwechsel im Mittelwert auf ( $M_{S1} = 0,2366$ ,  $SD_{S1} = 0,4438$ ,  $M_{S2} = -0,1639$ ,  $SD_{S2} = 0,2675$ ). Der Wilcoxon-Vorzeichen-test weist darauf hin, dass S1 ( $Mdn = 0,1561$ ) einen signifikant höheren Energieverbrauch als S2 ( $Mdn = 0,1561$ ) hat,  $z = -6,630$ ,  $p = 0,000$ ,  $r = 0,6731$ . Damit sind die Unterschiede der Energieverbräuche in den Fahrscenarien groß (Cohen 1992).

Es ist zu berücksichtigen, dass der Datensatz in S1 nicht normalverteilt ist, daher werden die Daten logarithmiert. Anschließend weisen die Prozentsätze nach Kolmogorov-Smirnov ( $D_{S1}(26) = 0,182$ ,  $p_{S1} = 0,026$ ,  $D_{S2}(26) = 0,198$ ,  $p_{S2} = 0,010$ ) und Shapiro-Wilk ( $D_{S1}(26) = 0,915$ ,  $p_{S1} = 0,035$ ,  $D_{S2}(26) = 0,807$ ,  $p_{S2} < 0,0005$ ) für beide Fahrscenarien keine Normalverteilung auf. Der Wilcoxon-Vorzeichentest zeigt nach der Transformation, dass S1 ( $Mdn = -0,4859$ ) einen signifikant höheren Energieverbrauch als S2 ( $Mdn = -0,9148$ ) hat  $z = -2,756$ ,  $p = 0,006$ ,  $r = 0,540$  und ein großer Effekt vorliegt (Cohen 1992).

Der Friedman-Test ist nicht auf eine Normalverteilung angewiesen und untersucht, ob es eine tendenzielle Unterscheidung zwischen zwei verbundenen Stichproben gibt (Methodenberatung Universität Zürich 2016). Der Test wird den nicht-parametrischen Tests zugeordnet. Für  $df = 1$  ist der kritische Wert auf 3,84 festgelegt. Der Friedman-Test weist einen höheren Wert auf. Somit ist der Unterschied des Fahrscenario 1 ( $Mdn = 0,1561$ ) zu Fahrscenario 2 ( $Mdn = -0,1409$ ) signifikant mit  $\chi^2(1) = 38,361$ ,  $p < 0,0005$ ,  $N = 97$  (Methodenberatung Universität Zürich 2016). Ein Post-Hoc-Test ist nicht notwendig, da kein Vergleich zu weiteren Gruppen gezogen werden muss.

Der Test auf Messwiederholung nach Greenhouse-Geisser zeigt ebenfalls, dass der Energieverbrauch mit dem Fahrscenario zusammenhängt ( $F(1,88) = 66,820$ ,  $p = 0,000$ ,  $\eta^2 = 0,432$ ,  $N = 87$ ). Paarweise nach Bonferroni korrigierte Vergleiche weisen in der Pendler-Situation ( $M = 0,3118$ ,  $SD = 0,5188$ ) einen signifikant höheren Energieverbrauch als in der Familien-Situation ( $M = -0,1980$ ,  $SD = 0,2994$ ) auf. Die Effektstärke  $f$  nach Cohen (1988) liegt bei 0,872 und entspricht einem starken Effekt.

Der Vergleich weist eine Einsparung an Energie im Szenario „Familie“ auf, hingegen einen höheren Energieverbrauch im Szenario „Pendler“ als in der Baseline. Es kommt bei den beiden Fahrscenarien zu einem signifikanten Unterschied.

Im Abschnitt 3.4.2 ist nach Birrell et al. (2013) festgestellt worden, dass keine signifikanten Unterschiede zwischen Fahrzeiten je Runde bestehen. Somit stellt sich die Frage, ob es Effekte in Bezug auf die Fahrzeiten je Runde gibt. Somit wird die Dauer je Runde eingehender betrachtet. Die durchschnittliche Zeit für S1 beträgt 226.483,11 ms ( $SE = 2938,42$ ,  $SD = 28.940,09$ ) und weist eine Schiefe von -0,032 ( $SE = 0,245$ ) sowie eine Kurtosis von -0,294 ( $SE = 0,485$ ) auf. Für die Fahrscene S2 beträgt die durchschnittliche Zeit 253.144,91 ms ( $SE = 3418,575$ ,  $SD = 33.669,058$ ) und weist eine Schiefe von 0,057 ( $SE = 0,245$ ) sowie eine Kurtosis von -0,282 ( $SE = 0,485$ ) auf. Die Quotienten aus den Werten und dem Standardfehler sind innerhalb der Grenzwerte -1,96 und 1,96, sodass keine signifikante Schiefe (S1: 0,131, S2: 0,233) und keine signifikante Kurtosis (S1: 0,606, S2: 0,581) festzustellen ist. Die Prozentsätze nach

Kolmogorov-Smirnov ( $D(97) = 0,042, p = 0,200$ ) und Shapiro-Wilk ( $D(97) = 0,993, p = 0,903$ ) belegen, dass keine Unterschiede zwischen der Stichprobe und einer Normalverteilung für die Fahrzeiten in S1 bestehen. Für S2 weisen die Prozentsätze nach Kolmogorov-Smirnov ( $D(97) = 0,069, p = 0,200$ ) und Shapiro-Wilk ( $D(97) = 0,990, p = 0,662$ ) ebenfalls eine Normalverteilung auf. Es kann daher ein t-Test für verbundene Stichproben durchgeführt werden. Die Mittelwerte der beiden Messzeitpunkte (S1 und S2) unterscheiden sich signifikant ( $t(96) = -8,661, p = 0,000, N = 97$ ). Die Probanden fahren in dem Fahrscenario „Familie“ ( $M = 253144,91, SD = 33669,058$ ) signifikant langsamer (26,66 s) als beim Fahrscenario „Pendler“ ( $M = 226483,11, SD = 28940,09$ ). Die Effektstärke nach Cohen (1992) liegt bei  $r = 0,662$  und entspricht einem starken Effekt.

Bei Berücksichtigung der Lerneffekte, welche über die Baselines B1 und B2 herausgerechnet wurden, zeigte der t-Test erneut, dass die Probanden im Fahrscenario S1 ( $M = -22481,57, SD = 24402,18$ ) signifikant ( $t(96) = -8,661, p = 0,000, N = 97$ ) langsamer (26,66 s) als beim Fahrscenario S2 ( $M = 4180,22, SD = 1877,93$ ) fahren.

Das Ergebnis ist zu erwarten gewesen, da die Lerneffekte in diesem Fall nur eine Verschiebung der Daten bewirken, sich jedoch nicht auf den Effekt oder die Effektstärke auswirken. Somit ist  $r = 0,662$  und entspricht einem starken Effekt nach Cohen (1992).

Für das Fahrscenario beträgt für ein  $\alpha = 0,05$  der kritische Wert 1,671 bei  $df = 60$  oder 1,658 bei  $df = 120$  (Bortz/Schuster 2010, 590). Der Betrag der Teststatistik ist in beiden Fahrscenarien höher als der kritische Wert und folglich ist der Unterschied signifikant.

Nach der Untersuchung der zeitlichen Dimension kann die Durchschnittsgeschwindigkeit der jeweiligen Fahrscene untersucht werden. In der ersten Baseline fahren die Teilnehmer im Durchschnitt ( $M = 42,26$  km/h,  $SE = 0,538, SD = 5,30$ ) langsamer als im Fahrscenario S2 ( $M = 43,93$  km/h,  $SE = 0,622, SD = 6,13$ ). Im Fahrscenario „Pendler“ fahren die Probanden jedoch signifikant ( $t(96) = 8,451, p = 0,000, n = 97$ ) schneller ( $M = 49,40$  km/h,  $SE = 0,670, SD = 6,59$ ) als im Fahrscenario „Familie“ ( $M = 44,27$  km/h,  $SE = 0,622, SD = 6,129$ ).

In der zweiten Baseline vor dem Fahrscenario „Familie“ fahren die Probanden im Durchschnitt ( $M = 48,15$  km/h,  $SE = 0,649, SD = 6,394$ ) schneller als in dem Fahrscenario selbst ( $M = 44,27, SE = 0,622, SD = 6,129$ ).

Die Durchschnittsgeschwindigkeiten sind nach Kolmogorov-Smirnov (S1:  $D(97) = 0,084, p = 0,088$ , S2:  $D(97) = 0,065, p = 0,200$ ) normalverteilt und nach Shapiro-Wilk (S1:  $D(97) = 0,964, p = 0,009$ , S2:  $D(97) = 0,963, p = 0,007$ ) nicht.

Das Fahrscenario S1 hat eine Schiefe von 0,675 ( $SE = 0,245$ ) und eine Kurtosis von 0,161 ( $SE = 0,485$ ). Die Schiefe weist einen Quotienten von 2,76 auf und ist folglich positiv signifikant. Das Fahrscenario S2 weist eine Schiefe von 0,703 ( $SE = 0,245$ ) sowie eine Kurtosis von 0,694 ( $SE = 0,485$ ) auf. Die Schiefe ist mit einem Quotienten von 2,87 oberhalb des Grenzwertes und damit positiv signifikant. Beide Fahrscenarien haben eine positive Schiefe und können somit nicht normalverteilt sein.

Es wurde daher der Wilcoxon-Test herangezogen (Bortz/Schuster 2010, 133f.). Die Geschwindigkeit ist im Fahrscenario „Pendler“ signifikant höher ( $Mdn = 48,55$ ) als im Fahrscenario „Familie“ ( $Mdn = 43,65$ ; asymptotischer Wilcoxon-Test:  $z = -6,594$ ,  $p = 0,000$ ,  $N = 97$ ) und besitzt nach Cohen (1992) einen starken Effekt ( $r = 0,67$ ).

Offensichtlich liegt kein Unterschied in der Streckenlänge vor ( $M = 3,06$  km).

### 12.1.2 Vergleich der Feedbacksysteme

Bei der Betrachtung der Fahrscenarien sind Unterschiede zwischen den Feedbacksystemen zu erkennen. Das visuelle Feedback führte im Fahrscenario 2 („Familie“) zur energieeffizientesten Fahrweise. Während es im Fahrscenario 1 („Pendler“) zur ineffizientesten Fahrweise führte. Beide Fahrscenarien deuten darauf hin, dass die Erkenntnisse von Landau et al. (2014) nicht bestätigt werden konnten, da diese nicht zum energieeffizientesten Fahrstil führten.

Des Weiteren könnte es sein, dass die Ergebnisse eine Verzerrung aufweisen, welche in einem weiteren Schritt in Bezug auf das Zusammenspiel der Feedbacksysteme zu untersuchen ist. In Abbildung 53 sind die Fahrscenarien mit den jeweiligen Feedbacksystemen dargestellt. Die Baseline entspricht in Abbildung 53 der x-Achse an der Stelle null.

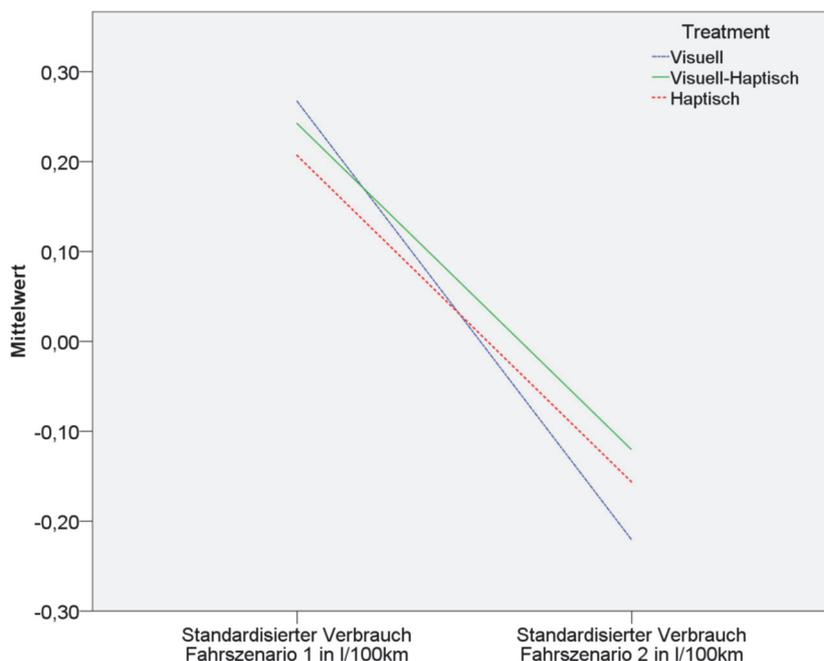


Abbildung 53: Vergleich der standardisierten Energieverbräuche je Treatment in Abhängigkeit zur Fahrscene  
Quelle: Eigene Darstellung

Die Abbildung 53 zeigt, dass die Hypothesen H1 und H2 bestätigt werden können, während H1.1, H1.2a und H1.2b abgelehnt werden. Der Effekt wird eingehender in den Abschnitten 12.1.2.1 und 12.1.2.2 untersucht. Für die Untersuchung wird das in den Unterkapiteln 4.4 und 4.5 beschriebene Vorgehen angewendet. Außerdem werden die gleichen Ausreißer wie beim Vergleich der Fahrscenarien berücksichtigt, welche in Unterabschnitt 12.1.1 beschrieben wurden.

### 12.1.2.1 Fahrscenario „Pendler“

Die Feedbacksysteme weisen für das visuelle Feedback ein  $N = 29$  ( $M = 0,2671$ ,  $SD = 0,4886$ ), das visuell-haptische Feedback ein  $N = 32$  ( $M = 0,2422$ ,  $SD = 0,4812$ ) und das haptische ein  $N = 36$  ( $M = 0,2068$ ,  $SD = 0,3774$ ) auf.

Der Test der Homogenität der Varianzen nach Levene (Levene 1960; Bortz/Schuster 2010, 129) ergab keine signifikanten Unterschiede,  $F(2,94) = 1,484$ ,  $p = 0,232$ . Die ANOVA weist keine signifikanten Unterschiede zwischen den Treatments auf,  $F(2,94) = 0,150$ ,  $p = 0,861$ , mit nicht signifikanten Robustheitstests Welch-Test:  $F(2,58,826) = 0,160$ ,  $p < 0,852$  und Brown-Forsythe:  $F(2,84,646) = 0,146$ ,  $p < 0,865$ . Da keine signifikanten Unterschiede ermittelt werden können, ist eine Auswertung mittels Post-Hoc-Tests nicht sinnvoll.

Für das visuelle Feedback weisen der Prozentsatz nach Kolmogorov-Smirnov ( $D(29) = 0,096$ ,  $p = 0,200$ ) und Shapiro-Wilk ( $D(29) = 0,971$ ,  $p = 0,576$ ) keine Normalverteilung auf. Ebenso für das visuell-haptische Feedback, Kolmogorov-Smirnov:  $D(32) = 0,135$ ,  $p = 0,149$  und Shapiro-Wilk:  $D(32) = 0,964$ ,  $p = 0,348$ . Für das haptische Feedback weisen die Prozentsätze nach Kolmogorov-Smirnov ( $D(36) = 0,151$ ,  $p = 0,038$ ) und Shapiro-Wilk ( $D(36) = 0,902$ ,  $p = 0,004$ ) eine Normalverteilung auf. Ein Vorzeichenwechsel in den Mittelwerten ist nicht gegeben (visuell:  $M = 0,2671$ ,  $SD = 0,4886$ , visuell-haptisch:  $M = 0,2424$ ,  $SD = 0,4812$ , haptisch:  $M = 0,2068$ ,  $SD = 0,3774$ ). Die Schiefe beträgt visuell:  $0,193$ ,  $SE = 0,434$ , visuell-haptisch:  $0,436$ ,  $SE = 0,414$ , haptisch:  $0,884$ ,  $SE = 0,393$  und die Kurtosis visuell:  $-0,823$ ,  $SE = 0,845$ , visuell-haptisch:  $0,154$ ,  $SE = 0,809$ , haptisch:  $0,183$ ,  $SE = 0,768$ . Für das haptische Feedback liegt eine signifikante Schiefe mit dem Quotienten von  $2,250$  vor und es entspricht somit keiner Normalverteilung. Alle sonstigen Quotienten liegen innerhalb der Grenzwerte von  $-1,96$  und  $1,96$ .

Da die Daten nicht über alle Treatments normalverteilt sind, werden die Daten zusätzlich mit nicht-parametrischen Tests analysiert (Shirley 1977; Philip et al. 1999). Es handelt sich um drei unabhängige Stichproben, daher wird der Kruskal-Wallis-Test herangezogen (Bortz/Schuster 2010, 214). Der Test weist für das Fahrscenario S1 ( $\chi^2(2) = 0,279$ ,  $p = 0,870$ ) keine Signifikanz auf.

Es gibt somit keine Unterschiede bezüglich der zentralen Tendenzen der Energieverbrauchsfeedbacksysteme.

### 12.1.2.2 Fahrscenario „Familie“

Den Feedbacksystemen werden folgende Teilnehmerzahlen zugrunde gelegt: visuelles  $N = 29$  ( $M = -0,2208$ ,  $SD = 0,2103$ ), visuell-haptisches  $N = 32$  ( $M = -0,1206$ ,  $SD = -0,2634$ ) und haptisches  $N = 36$  ( $M = -0,1565$ ,  $SD = -0,3082$ ).

Für die Auswertung der ANOVA wird auf Heteroskedastizität geprüft. Der Test der Homogenität der Varianzen nach Levene (Levene 1960; Bortz/Schuster 2010, 129) ergibt keine signifikanten Unterschiede,  $F(2,94) = 2,341$ ,  $p = 0,102$ . Die ANOVA weist auch für das Fahrscenario „Familie“ keine signifikanten Unterschiede zwischen den Treatments auf,  $F(2,94) = 1,091$ ,

$p = 0,340$  und die Robustheitstests Welch-Test:  $F(2,62,556) = 1,418$ ,  $p = 0,250$  und Brown-Forsythe:  $F(2,91,411) = 1,135$ ,  $p = 0,326$  sind ebenfalls nicht signifikant. Eine Auswertung mittels Post-hoc-Tests ist aufgrund der nicht-signifikanten Unterschiede nicht sinnvoll.

Aus der Analyse der Fahrscenarien aus Unterabschnitt 12.1.1 ist bekannt, dass das Fahrscenario „Familie“ nicht normalverteilt ist. Die Stichprobengröße der einzelnen Treatments ist unterschiedlich und deutlich kleiner als bei der Analyse der Fahrscenarien und somit ist nicht klar, ob eine Normalverteilung bei den einzelnen Treatments vorliegt. Für das visuelle und visuell-haptische Feedback weisen die Prozentsätze nach Kolmogorov-Smirnov (visuell:  $D(29) = 0,093$ ,  $p = 0,200$ , visuell-haptisch:  $D(32) = 0,121$ ,  $p = 0,200$ ) und Shapiro-Wilk (visuell:  $D(29) = 0,976$ ,  $p = 0,473$ , visuell-haptisch:  $D(32) = 0,965$ ,  $p = 0,385$ ) eine Normalverteilung auf. Für das haptische Feedback weisen die Prozentsätze nach Kolmogorov-Smirnov ( $D(36) = 0,157$ ,  $p = 0,026$ ) und Shapiro-Wilk ( $D(36) = 0,921$ ,  $p = 0,013$ ) keine Normalverteilung auf. Ein Vorzeichenwechsel in den Mittelwerten ist nicht gegeben (visuell:  $M = -0,2208$ ,  $SD = 0,2103$ , visuell-haptisch:  $M = -0,1206$ ,  $SD = 0,2633$ , haptisch:  $M = -0,1565$ ,  $SD = 0,2634$ ). Die Schiefe beträgt visuell:  $0,373$ ,  $SE = 0,434$ , visuell-haptisch:  $-0,290$ ,  $SE = 0,414$ , haptisch:  $-0,852$ ,  $SE = 0,393$  und die Kurtosis ist visuell:  $-0,221$ ,  $SE = 0,845$ , visuell-haptisch:  $-0,711$ ,  $SE = 0,809$ , haptisch:  $0,010$ ,  $SE = 0,768$ . Das haptische Feedback weist mit einem Quotienten von  $-2,168$  eine signifikante negative Schiefe auf und entspricht somit keiner Normalverteilung. Alle sonstigen Quotienten liegen innerhalb der Grenzwerte von  $-1,96$  und  $1,96$ .

Es wird der nicht-parametrische Test von Kruskal-Wallis angewendet, um die nicht normalverteilten Treatments im Fahrscenario S2 auszuwerten (Bortz/Schuster 2010, 214; Shirley 1977; Philip et al. 1999). Der Test weist für S2 keinen signifikanten Unterschied in den Tendenzen der Varianzen auf,  $\chi^2(2) = 3,113$ ,  $p = 0,211$ .

Ein signifikanter Unterschied kann zwischen den Feedbacksystemen nicht festgestellt werden.

## 12.2 Moderatoren

Es wurden zahlreiche Moderatoren erhoben. Der interessanteste ist energiebewusstes Fahren, da er die Forschungsfragen 2 und 3 beantwortet. Alle weiteren Moderatoren werden zur Vollständigkeit analysiert.

Das Programm PROCESS unterscheidet anhand der gewählten Variablen, welche Methodik für die Moderatoren zur Auswertung verwendet wird (Hayes 2013). Das verwendete Modell für die Analyse mit PROCESS ist das Modell 1 (Hayes 2013). Für die Moderatoren wird ein Konfidenzintervall von 95 % verwendet.

### 12.2.1 Alter

Das Alter der Teilnehmer liegt zwischen 17 und 29 Jahren ( $M = 20,15$ ,  $SD = 2,12$ ) und ist mit einer Schiefe von  $1,794$  ( $SE = 0,245$ ) und einer Kurtosis von  $3,768$  ( $SE = 0,485$ ) nicht normalverteilt. Das Alter besitzt eine positive Schiefe und eine positive Kurtosis. Die Stichprobe ist als jung anzusehen. Eine Auswertung in Bezug auf das Alter ist nur bedingt möglich, da die

meisten Probanden zwischen 18 und 22 Jahre alt sind. Unterschiede sind somit nicht zu erwarten.

Zunächst wird das Modell hinsichtlich des Fahr Szenarios „Pendler“ (S1) untersucht. Das Modell zeigt insgesamt keine Signifikanz auf,  $F(3,93) = 1,78$ ,  $N = 97$ ,  $p = 0,16$ ,  $R^2 = 0,0412$ . Für das Fahr Szenario S1 kann kein signifikanter Moderationseffekt für die Variable Alter auf die abhängige Variable Energieverbrauch ausgehend vom Energieverbrauchsfeedbacksystem festgestellt werden ( $b = 0,03$ ,  $t(93) = 0,93$ ,  $SE = 0,03$ ,  $p = 0,35$ ).

Nach der Untersuchung des Fahr Szenarios „Pendler“ kann das Fahr Szenario „Familie“ (S2) eingehender untersucht werden. Bei der Untersuchung des Fahr Szenarios S2 zeigt sich ebenfalls kein signifikanter Effekt ( $b = 0,0013$ ,  $t(93) = 0,1033$ ,  $SE = 0,0124$ ,  $p = 0,9180$ ). Das Modell insgesamt zeigt keine Signifikanz auf ( $F(3,93) = 1,2219$ ,  $N = 97$ ,  $p = 0,3062$ ,  $R^2 = 0,04$ ,  $R^2 = 0,0292$ ).

### 12.2.2 Computerspiele

Der Moderator Computerspiele untersucht, ob das Spielen von Rennsimulations-Computerspielen einen Einfluss auf das Messmodell hat. Insbesondere, da der Fahr Simulator einer Rennsimulation ähnlich erscheint. Konsequenterweise war aufgrund der Lerneffekte erwartet worden, dass Personen, die Rennsimulationsspiele spielen, eine größere Erfahrung haben als welche, die keine Rennsimulationsspiele spielen. Zusätzlich dient dieser Moderator dazu herauszufinden, ob diese Spieler eher dazu neigen weniger energiebewusst zu fahren als Nicht-Spieler. Es zeigt sich kein signifikanter Effekt für das Fahr Szenario S1 ( $b = -0,1349$ ,  $t(91) = -1,4034$ ,  $SE = 0,0961$ ,  $p = 0,1639$ ). Für das Gesamtmodell ergibt sich kein signifikanter Effekt ( $F(3,91) = 0,7548$ ,  $N = 95$ ,  $p = 0,5224$ ,  $R^2 = 0,025$ ). Für das Fahr Szenario S2 zeigt sich auch kein signifikanter Effekt ( $b = -0,0155$ ,  $t(91) = -0,2644$ ,  $SE = 0,0586$ ,  $p = 0,7920$ ). Das Gesamtmodell weist keinen signifikanten Wert auf ( $F(3,91) = 0,3111$ ,  $N = 95$ ,  $p = 0,8173$ ,  $R^2 = 0,0111$ ).

### 12.2.3 Geschlecht

Es gab 18 weibliche Teilnehmer im Alter von 18 bis 22 ( $M = 19,89$ ,  $SD = 1,37$ ) und 79 männliche im Alter von 17 bis 29 ( $M = 20,22$ ,  $SD = 2,263$ ).

Aus den Daten geht hervor, dass im Fahr Szenario S1 kein signifikanter Moderationseffekt von der Variable Geschlecht auf den Energieverbrauch in Bezug auf das Feedbacksystem festgestellt werden kann ( $b = 0,0117$ ,  $t(93) = 1,4384$ ,  $SE = 0,17$ ,  $p = 0,15$ ). Für das Gesamtmodell ergibt sich kein signifikanter Effekt ( $F(3,93) = 1,1418$ ,  $N = 97$ ,  $p = 0,3339$ ,  $R^2 = 0,03$ ). Das Fahr Szenario S2 weist keinen signifikanten Wert für den Moderator Geschlecht auf ( $b = -0,0113$ ,  $t(93) = -0,1280$ ,  $SE = 0,0879$ ,  $p = 0,8984$ ), ebenso für das Gesamtmodell ( $F(3,93) = 1,0839$ ,  $N = 97$ ,  $p = 0,3599$ ,  $R^2 = 0,0350$ ).

### 12.2.4 Fahrerfahrung

Die Fahrerfahrung stützt sich auf verschiedene Variablen.

Die Teilnehmer ( $N = 87$ ) fahren zwischen 0 und 50.000 km pro Jahr ( $M = 7091,94$ ,  $SD = 8859,78$ ). Die Daten sind nicht normalverteilt mit einer Schiefe von 2,03 ( $SE = 0,258$ ) und einer Kurtosis von 5,73 ( $SE = 0,511$ ). Im Fahrscenario S1 kann kein signifikanter Moderationseffekt von der Fahrerfahrung in km pro Jahr auf den Energieverbrauch festgestellt werden ( $b = 0,000$ ,  $t(83) = -0,0359$ ,  $SE = 0,00$ ,  $p = 0,97$ ,  $R^2 = 0,0068$ ). Für das Modell insgesamt ergibt sich kein signifikanter Effekt ( $F(3,83) = 0,1881$ ,  $N = 87$ ,  $p = 0,9042$ ). Das Fahrscenario S2 weist keinen signifikanten Wert auf ( $b = 0,000$ ,  $t(83) = -0,4489$ ,  $SE = 0,0000$ ,  $p = 0,6547$ ), ebenso für das Gesamtmodell ( $F(3,83) = 1,60$ ,  $N = 87$ ,  $p = 0,1956$ ,  $R^2 = 0,0517$ ).

Teilnehmer ohne gültige Fahrerlaubnis wurden als Ausreißer identifiziert, somit kann ein Moderationseffekt nicht bestimmt werden.

Die Fahrerfahrung in Jahren ist von 97 Probanden zwischen null und zehn Jahren ( $M = 2,77$ ,  $SD = 1,89$ ) angegeben worden. Die Verteilung stimmt mit der Variable Alter überein. Ebenso liegt die durchschnittliche Fahrerfahrung bei 2,77 Jahren. Die Fahrerfahrung in Jahren ist, mit einer Schiefe von 1,39 ( $SE = 0,245$ ) und Kurtosis von 1,98 ( $SE = 0,485$ ) nicht normalverteilt. Im Fahrscenario S1 kann kein signifikanter Moderationseffekt von der Fahrerfahrung in Jahren auf den Energieverbrauch festgestellt werden ( $b = 0,0096$ ,  $t(93) = 0,3729$ ,  $SE = 0,00257$ ,  $p = 0,71$ ). Für das Modell insgesamt ergibt sich kein signifikanter Effekt ( $F(3,93) = 1,5917$ ,  $N = 97$ ,  $p = 0,1967$ ,  $R^2 = 0,0355$ ). Auch für das Fahrscenario S2 zeigt sich kein signifikanter Effekt ( $b = -0,0078$ ,  $t(93) = -0,6302$ ,  $SE = 0,0124$ ,  $p = 0,5301$ ). Das Modell weist ebenso keinen signifikanten Effekt auf ( $F(3,93) = 2,1105$ ,  $N = 97$ ,  $p = 0,1042$ ,  $R^2 = 0,0368$ ).

Die Erfahrung mit Automatikgetrieben ist in der Mitte der 7er-Likert-Skala<sup>26</sup> einzuordnen ( $M = 4,13$ ,  $SD = 2,37$ ). Die Erfahrung mit Automatikgetrieben ist mit einer Schiefe von -0,15 ( $SE = 0,254$ ) und einer Kurtosis von -1,56 ( $SE = 0,503$ ) nicht normalverteilt. Die Schiefe ist im Toleranzbereich und lediglich die Kurtosis weicht negativ signifikant ab. Im Fahrscenario S1 kann kein signifikanter Moderationseffekt von der Erfahrung mit Automatikgetrieben auf den Energieverbrauch festgestellt werden ( $b = 0,0203$ ,  $t(86) = 0,8762$ ,  $SE = 0,0232$ ,  $p = 0,38$ ). Für das Modell insgesamt ergibt sich kein signifikanter Effekt ( $F(3,86) = 0,6472$ ,  $N = 90$ ,  $p = 0,5868$ ,  $R^2 = 0,0255$ ). Im Fahrscenario S2 kann ebenfalls kein signifikanter Moderationseffekt festgestellt werden ( $b = -0,0049$ ,  $t(86) = -0,3811$ ,  $SE = 0,0129$ ,  $p = 0,7041$ ). Für das Modell ist kein signifikanter Effekt zu erkennen ( $F(3,86) = 0,9372$ ,  $N = 90$ ,  $p = 0,4264$ ,  $R^2 = 0,0258$ ).

Die Häufigkeit, in der gefahren wird, wird im Mittel mit „einmal in der Woche“ angegeben ( $M = 3,29$ ,  $SD = 1,84$ ). Dies entspricht bei der mittleren Fahrleistung von 7091 km im Jahr und etwa 136 km pro Woche. Die Schiefe weist einen Wert von 0,372 ( $SE = 0,246$ ) auf und die Kurtosis hat einen Wert von -1,31 ( $SE = 0,488$ ), somit sind die Daten nicht normalverteilt. Im Fahrscenario S1 kann kein signifikanter Moderationseffekt von der Erfahrung mit Automatikgetrieben auf den Energieverbrauch festgestellt werden ( $b = 0,0114$ ,  $t(92) = 0,4742$ ,  $SE = 0,0241$ ,  $p = 0,64$ ). Für das Modell insgesamt ergibt sich kein signifikanter Effekt ( $F(3,92) = 0,5274$ ,  $N = 96$ ,  $p = 0,6646$ ,  $R^2 = 0,0134$ ). Für das Fahrscenario S2 ergibt sich kein

---

<sup>26</sup> S. Unterkapitel 4.4

Moderationseffekt ( $b = 0,0119$ ,  $t(92) = 0,8853$ ,  $SE = 0,0134$ ,  $p = 0,3783$ ), jedoch ein signifikanter Effekt für das Modell ( $F(3,92) = 2,8082$ ,  $N = 96$ ,  $p = 0,0439$ ,  $R^2 = 0,0647$ ). Die Interaktion zwischen der Häufigkeit und dem Treatment weist einen signifikanten Unterschied auf ( $b = 0,0402$ ,  $t(92) = 2,4757$ ,  $SE = 0,0162$ ,  $p = 0,0151$ ). Es stellt sich die Frage, wie die Interaktion aussieht, so zeigt sich, dass für 1 SD über dem Mittel liegender Wert ein signifikanter Effekt von 0,1025 ( $p = 0,0095$ ) bei  $t(92) = 2,6482$  ( $SE = 0,0387$ ) vorliegt. Die Ergebnisse lassen erkennen, dass bei Personen, die relativ weniger fahren (1 SD über dem Mittel), das Treatment einen positiven Effekt auf den Energieverbrauch hat. Wenn eine Person relativ wenig fährt (0,8239, entspricht zweimal im Monat) und relativ viel Energie verbraucht (1,8348 l/100 km), so hat sie einen geschätzten Wert von -0,0629 bei der Verwendung des Treatments. Wenn eine Person relativ wenig fährt (0,8239, entspricht zweimal im Monat) und relativ wenig Energie verbraucht (-1,8348 l/100 km), so hat sie einen geschätzten Wert von -0,1928 bei der Verwendung des Treatments. Wenn eine Person relativ viel fährt (-0,8239, entspricht zweimal die Woche) und relativ wenig Energie verbraucht (-1,8348 l/100 km), so hat sie einen geschätzten Wert von -0,1539 bei der Verwendung eines Treatments. Je mehr Fahrerfahrung, desto weniger wird das Energieverbrauchsfeedbacksystem verwendet und umgekehrt. Die genauen Werte sind in Abbildung 54 visualisiert.

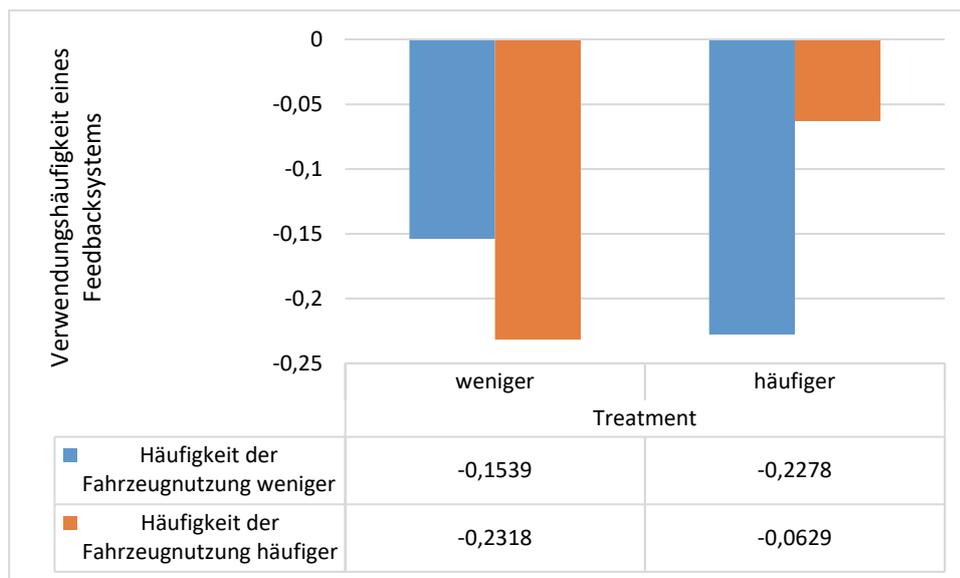


Abbildung 54: Verwendungshäufigkeit eines Energieverbrauchsfeedbacksystems im Vergleich zur Häufigkeit der Nutzung eines Fahrzeugs

Quelle: Eigene Darstellung,  $N = 96$

### 12.2.5 Energiebewusstes Fahren

Der Moderator energiebewusstes Fahren der Energiebewusstseinskala weist für das Modell mit den Fahrscenarien eine Signifikanz auf,  $F(3,90) = 9,7624$ ,  $N = 94$ ,  $p = 0,0000$ ,  $R^2 = 0,2150$ . In Bezug auf die Skala selbst ist keine Signifikanz zu erkennen ( $b = -0,0139$ ,  $t(90) = -0,2702$ ,  $SE = 0,0516$ ,  $p = 0,7876$ ). Jedoch kann bezogen auf das Szenario ein signifikanter Wert festgestellt werden ( $b = -0,4042$ ,  $t(90) = -5,3699$ ,  $SE = 0,0753$ ,  $p = 0,0000$ ). Eine signifikante Interaktion kann dabei nicht festgestellt werden ( $b = -0,1054$ ,  $t(90) = -1,1286$ ,  $SE = 0,0934$ ,  $p = 0,2621$ ).

Die Untersuchung des konditionalen Effekts zwischen der Ergebnisvariablen des Energieverbrauchs und des Fahrzenarios zeigt für Probanden, welche einen Fahrstil mit relativ geringem Energiebewusstsein haben (1 SD unter dem Mittel), dass es einen signifikanten Zusammenhang, mit einem Effekt von  $-0,3117$ , zwischen dem Fahrzenario und dem Energieverbrauch gibt ( $t(90) = -2,9387$ ,  $SE = 0,1061$ ,  $p = 0,0042$ ). Gleiches zeigt sich bei Personen, welche einen relativ hohen Energieverbrauch haben (1 SD über dem Mittel) mit einem Effekt von  $-0,4968$  ( $t(90) = -4,2710$ ,  $SE = 0,1163$ ,  $p = 0,0000$ ). Personen die im Mittel liegen, weisen ebenfalls einen signifikanten Effekt von  $-0,4042$  auf ( $t(90) = -5,3699$ ,  $SE = 0,0753$ ,  $p = 0,0000$ ).

Fährt eine Person im Fahrzenario mit relativ geringem Verbrauch ( $-0,4043$  l/100 km) und ist relativ wenig energiebewusst ( $-0,8778$ ), so ist der Energieverbrauch um einen geschätzten Wert von  $0,2504$  höher. Falls eine Person im Fahrzenario mit hohem Verbrauch fährt ( $0,5957$  l/100 km) und relativ wenig energiebewusst ( $-0,8778$ ) ist, so ist der Energieverbrauch um den geschätzten Wert von  $-0,0613$  niedriger. Falls eine Person in einem Fahrzenario mit relativ hohem Energieverbrauch fährt ( $0,5957$  l/100 km) und relativ viel Energiebewusstsein ( $0,8778$ ) hat, so ist der Energieverbrauch geschätzt um einen Wert von  $-0,1961$  niedriger. In einem Fahrzenario mit niedrigem Energieverbrauch wird mehr Energie eingespart als in einem Fahrzenario mit hohem Energieverbrauch, wenn die Person energiebewusster ist. Der Einfluss des Energiebewusstseins auf das Fahrzenario ist in Abbildung 55 demonstriert.

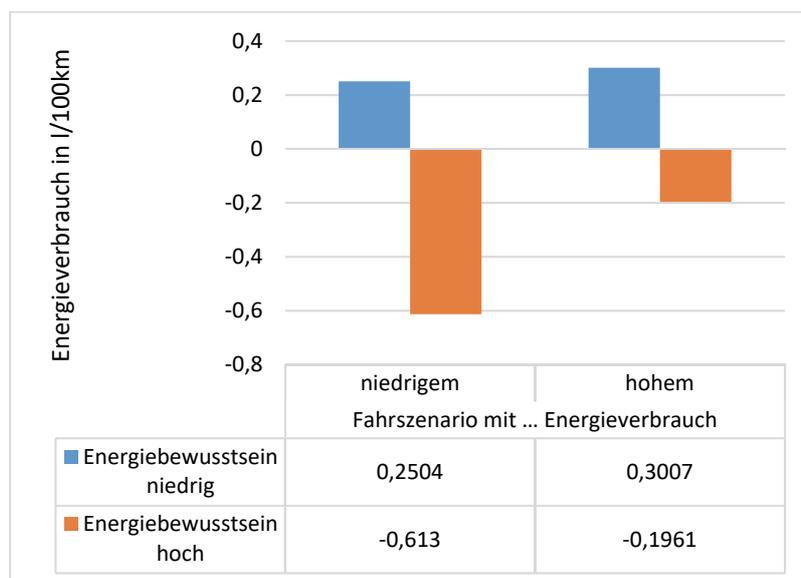


Abbildung 55: Einfluss des Energiebewusstseins auf Energieverbrauch je Fahrzenario  
Quelle: Eigene Darstellung,  $N = 90$

Aus der Untersuchung der Motivationsskala folgt ein signifikanter Wert des Modells ( $F(3,90) = 9,3818$ ,  $N = 94$ ,  $p = 0,0000$ ,  $R^2 = 0,2086$ ) und der Fahrzenarien ( $t(90) = -5,1410$ ,  $SE = 0,0806$ ,  $p = 0,0000$ ). Hingegen ist der Wert der Motivationsskala nicht signifikant ( $t(90) = -0,7343$ ,  $SE = 0,0558$ ,  $p = 0,4647$ ).

Die Untersuchung des konditionalen Effekts zwischen der Ergebnisvariablen des Energieverbrauchs und des Fahrzenarios zeigt für Probanden, welche einen Fahrstil mit relativ geringem

Energiebewusstsein aufweisen (1 SD unter dem Mittel), dass es einen signifikanten Zusammenhang mit einem Effekt von -0,3941 zwischen dem Fahrscenario und dem Energieverbrauch gibt ( $t(90) = -3,3567$ ,  $SE = 0,1174$ ,  $p = 0,0012$ ). Personen, die im Mittel liegen, weisen ebenfalls einen signifikanten Effekt von -0,4143 auf ( $t(90) = -5,1410$ ,  $SE = 0,0806$ ,  $p = 0,0000$ ). Ebenso ist der Effekt signifikant bei Personen, welche einen relativ hohen Energieverbrauch haben (1 SD über dem Mittel) mit einem Effekt von -0,4345 ( $t(90) = -4,1836$ ,  $SE = 0,1038$ ,  $p = 0,0001$ ).

Fährt eine Person im Fahrscenario mit relativ geringem Verbrauch (-0,4043 l/100 km) und ist relativ wenig motiviert (-0,7523), so ist der Energieverbrauch um einen geschätzten Wert von 0,3074 höher. Falls eine Person im Fahrscenario mit relativ hohem Verbrauch fährt (0,5957 l/100 km) und relativ wenig motiviert ist (-0,7523), so ist der Energieverbrauch um den geschätzten Wert von -0,0866 niedriger. Falls jedoch eine Person in einem Fahrscenario mit relativ hohem Energieverbrauch fährt (0,5957 l/100 km) und relativ hoch motiviert ist (0,7523), so ist der Energieverbrauch geschätzt um einen Wert von -0,1723 niedriger. Bei hoher Motivation wird weniger Energie als bei niedriger Motivation verbraucht, wie der Einfluss der Motivation auf den Energieverbrauch je Fahrscenario in Abbildung 56 darstellt. Allerdings zeigt die Abbildung 56 auch, dass die Motivation vom Fahrscenario selbst abhängig ist.

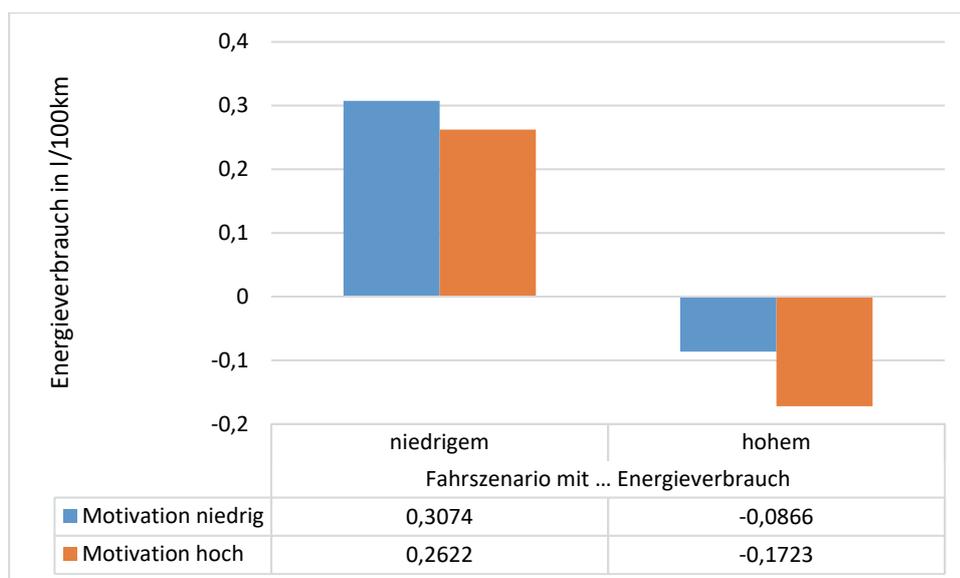


Abbildung 56: Einfluss der Motivation auf den Energieverbrauch je Fahrscenario  
Quelle: Eigene Darstellung,  $N = 90$

Die Ergebnisse zeigen für das Fahrscenario S1 für die einzelnen Treatments keine Signifikanz,  $F(3,93) = 0,6240$ ,  $N = 97$ ,  $p = 0,6012$ ,  $R^2 = 0,0277$ . Es kann auch kein signifikanter Moderationseffekt für die Motivationsskala auf die abhängige Variable Energieverbrauch ausgehend vom Energieverbrauchsfeedbacksystem festgestellt werden ( $b = 0,0899$ ,  $t(93) = 1,1679$ ,  $SE = 0,077$ ,  $p = 0,2458$ ).

Für das Fahrscenario S2 weist das Modell für die einzelnen Treatments keine Signifikanz auf,  $F(3,93) = 2,2112$ ,  $N = 97$ ,  $p = 0,0920$ ,  $R^2 = 0,0567$ . Es kann ein signifikanter Moderationseffekt

für die Motivationsskala auf die abhängige Variable Energieverbrauch ausgehend vom Energieverbrauchsfeedbacksystem festgestellt werden ( $b = -0,0806$ ,  $t(93) = -2,0182$ ,  $SE = 0,04$ ,  $p = 0,0465$ ). Das Modell erklärt 5,67 % mehr an Varianz, ist jedoch nicht signifikant. Die Bedingungen für eine Moderation weist keinen signifikanten Wert auf ( $p = 0,5699$ ). Folglich kann keine signifikante Moderation festgestellt werden.

Die Energiebewusstseinskala belegt für die Energieverbrauchsfeedbacksysteme im Fahrscenario S1 keine signifikanten Moderationseffekte ( $b = 0,0398$ ,  $t(93) = 0,6288$ ,  $SE = 0,0633$ ,  $p = 0,5310$ ). Es konnte keine signifikante Verbesserung des Modells abgeleitet werden  $F(3,93) = 0,2989$ ,  $N = 97$ ,  $p = 0,8261$ ,  $R^2 = 0,0089$ .

Für das Fahrscenario S2 weist die Analyse keinen signifikanten Moderationseffekt auf ( $b = -0,0473$ ,  $t(93) = -1,4075$ ,  $SE = 0,0336$ ,  $p = 0,1626$ ). Ebenso zeigt sich keine signifikante Verbesserung des Modells  $F(3,93) = 1,3877$ ,  $N = 97$ ,  $p = 0,2515$ ,  $R^2 = 0,0321$ .

Der Einfluss von Energieverbrauchsfeedbackanzeigen auf das Fahrverhalten ist nicht signifikant. Somit werden die Forschungsfragen 2 und 3 für motivierte und nicht-motivierte Benutzern aus Unterkapitel 1.3 beantwortet.

## 12.3 Diskussion

Es konnten signifikante Unterschiede in den Fahrscenarien festgestellt werden. Die Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass der Fahrkontext einen Einfluss auf das Fahrverhalten hat. Das Fahrverhalten wird nicht signifikant von Energieverbrauchsfeedbacksystemen beeinflusst. Die Ergebnisse weisen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Energieverbrauchsfeedbacksystemen auf.

Die Energieverbrauchsfeedbacksysteme und der Energieverbrauch im einzelnen Fahrscenario werden im Weiteren eingehender diskutiert.

### 12.3.1 Fahrscenarien

Der Vergleich der Fahrscenarien zeigt, dass im Szenario „Familie“ ( $M = -0,1639$ ,  $SD = 0,2675$ ) Energie eingespart wurde und beim Szenario „Pendler“ ( $M = 0,2366$ ,  $SD = 0,4438$ ) mehr Energie, sogar mehr als in der Baseline, verbraucht wurde. Die Ergebnisse belegen einen signifikanten Unterschied in den Fahrscenarien (Friedman-Test:  $\chi^2(1) = 38,361$ ,  $p < 0,0005$ ,  $N = 97$ ). Das Fahrscenario hat somit einen entscheidenden Einfluss auf den Energieverbrauch. Die Erkenntnisse von Fogg (2002) werden beim Fahrscenario „Familie“ wie erwartet bestätigt. Allerdings legen die Daten im Fahrscenario „Pendler“ den Schluss nahe, dass ein Energieverbrauchsfeedbacksystem nicht zu einem signifikanten Effekt geführt hat (Fogg 2009b). Andererseits muss berücksichtigt werden, dass das Fahrscenario „Pendler“ so konstruiert wurde, dass die Dimensionen von Fogg (2009b) nicht zu einer Verhaltensänderung führen konnten.

Die Daten weisen für das Fahrscenario S1 eine Heteroskedastizität auf und sind nicht normalverteilt. Der Friedman-Test zeigt einen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Fahr-

szenarien,  $\chi^2(1) = 38,361, p < 0,0005$ . Aufgrund der in Unterabschnitt 4.2.1.2 aus der Psychologie abgeleiteten Fahrszenarien ist erwartet worden, dass im Fahrszenario „Familie“ weniger Energie verbraucht wird als im Fahrszenario „Pendler“. Demgemäß entspricht das Ergebnis den Erwartungen. Andererseits ist ebenfalls zu bedenken, dass das Feedback im Fahrszenario „Pendler“ zu einem höheren Energieverbrauch als in der Baseline führt. Nach den Erkenntnissen aus Abschnitt 2.2.3 spielt die Motivation nach Maslow (1970) eine entscheidende Rolle. Zu keiner Zeit war der Fahrer in den Fahrszenarien einer lebensbedrohlichen Situation ausgesetzt, somit wäre der Einfluss aufgrund eines Grundbedürfnisses auszuschließen. Die Ergebnisse werden durch die negativen Energieverbrauchswerte der Motivationskala bei nicht-motivierten und motivierten Nutzern bestätigt. Ein niedriges Energiebewusstsein führt zwar zum höheren Verbrauch, jedoch ist die Situation selbst der signifikante Einflussfaktor.

Die Daten belegen einen signifikanten Einfluss der Zeit. Dagegen sprechen die Erkenntnisse von Birrell et al. (2013). Ericsson (2001) bestätigt, dass die Geschwindigkeit selbst keinen großen Effekt hat. Die Vermutung, dass das Fahrerverhalten einen Effekt haben könnte, stützt jedoch das Ergebnis (Birrell et al. 2013). Die Ergebnisse dieser Arbeit fokussieren auf das Fahrverhalten und untermauern die Vermutung von Ericsson (2001). Fraglich ist, inwieweit eine Fahrerausbildung im Sinne einer energieeffizienten Fahrweise den Effekt verstärken könnte (Ericsson 2001).

Die Moderatoren Energiebewusstsein und Motivation haben in den Fahrszenarien einen unterschiedlichen Einfluss. Die Ergebnisse belegen, dass ein hohes Energiebewusstsein bei einem Fahrszenario mit niedrigem Energieverbrauch zu einem verringerten Energieverbrauch führt. Hingegen zeigen die Daten für die Motivation, dass der Energieverbrauch gegenüber einer niedrigen Motivation zwar sinkt, aber in einem Fahrszenario mit niedrigem Energieverbrauch positiv ist und somit zu keiner effizienteren Fahrweise führt. Das Energiebewusstsein scheint stärker zu wirken als die Motivation. Dieses Ergebnis wurde nicht erwartet.

Unter der Betrachtung des erweiterten kognitiven Modells der Motivationspsychologie von Heckhausen/Heckhausen (2010, 5) wird klar, dass die Situation einen wesentlichen Einfluss auf die Handlung und das erwartete Ergebnis hat. Beim Autofahren ist der Kontext und somit das Fahrszenario entscheidend. Eine energieeffiziente Fahrweise wird vermutlich hinter die Bedürfnisse der primären Fahraufgabe gestellt, welche das Überleben sichert und somit nach Maslow (1970) ein Grundbedürfnis darstellt. Der Mensch handelt bedingt von seiner Person und der Situation (Heckhausen/Heckhausen 2010). Die Handlung erfolgt, wie die Ergebnisse zeigen, nicht unter energieeffizienten Gesichtspunkten. Somit führt der Fahrkontext dazu, dass der Mensch sein Handeln beim Autofahren im Hinblick auf eine energieeffiziente Fahrweise nicht autonom steuern kann.

Die Energieverbrauchsfeedbacksysteme in den Fahrszenarien weisen keine signifikanten Unterschiede in ihrer Wirkung auf Motivation und Energiebewusstsein auf. Daraus folgt, dass die Probanden nicht abhängig von der Art des Feedbacks sind. Hieraus lässt sich schließen, dass visuelle Feedbacksysteme durch andere Feedbacksysteme ersetzt werden können, da visuelle

Feedbacksysteme zu einer stärkeren Fahrerablenkung führen, wie in Unterabschnitt 3.1.1 gezeigt. Die Ergebnisse sprechen für eine Empfehlung von haptischen Feedbacksystemen (Kircher et al. 2014).

In einer Pendelsituation ist der Energieverbrauch positiv, während in einer familiären Situation der Verbrauch im Vergleich zur Baseline negativ ist (vgl. Abbildung 53). Eine Pendler-Situation hat zur Folge, dass es auch bei Verwendung von Energieverbrauchsfeedbacksystemen kein energieeffizientes Fahren gibt. Im Gegenteil, in einer Pendler-Situation entsteht ein ineffizienter Fahrstil. Es überrascht, dass der Effekt von „persuasive“ Technologien, wie von Fogg (2002) untersucht wurde, nicht beim Führen eines Fahrzeuges zu funktionieren scheint. Weiterhin zeigt die Abbildung 53, dass es einen Effekt gibt, aber im Vergleich zur Baseline mehr an Energie verbraucht wird. Im Gegensatz dazu ist beim Fahrscenario „Familie“ der Energieverbrauch negativ und bestätigt die Erkenntnisse von Fogg (2002). Feedbacksysteme scheinen in der Familien-Situation effektiver als in der Pendler-Situation zu wirken. Die Art der Fahrscene, genauer der Kontext, in dem sich der Fahrer befindet, führt zu unterschiedlichen Ausprägungen des Energieverbrauchs. Während in einer Pendler-Situation der Energieverbrauch im Vergleich zur Baseline höher ist, ist in einer familiären Situation der Verbrauch geringer. Die Unterschiede sind in Abbildung 53 mit den verdeutlicht worden. In den Abschnitten 12.3.2 und 12.3.3 werden die Unterschiede eingehender diskutiert.

### **12.3.2 Fahrscenario „Pendler“**

Bei Betrachtung der Mittelwerte im Vergleich zur gefahrenen Baseline wird deutlich, dass der Verbrauch insgesamt positiv ist (visuell:  $M = 0,2671$ , visuell-haptisch:  $M = 0,2422$ , haptisch:  $M = 0,2068$ ). Daraus ergibt sich, dass keines der Feedbacksysteme zu einer energieeffizienten Fahrweise beiträgt. Der Vergleich der Mittelwerte belegt Unterschiede in den einzelnen Feedbacksystemen.

Die Ergebnisse verifizieren die Hypothese H1.1. So besitzt das visuelle Feedback den höchsten Verbrauch, während das haptische Feedback den geringsten Energieverbrauch aufzeigt. Der Energieverbrauch bei visuell-haptischem Feedbacks liegt zwischen den Werten des visuellen und des haptischen Feedback. Die Werte lassen den Schluss zu, dass die Hypothesen H1.2a und H1.2b verworfen werden müssen, da multimodale Feedbacksysteme nicht den besten Wert aufweisen.

Die bisher gefundenen Ergebnisse belegen, dass in der untersuchten Stichprobe keines der Feedbacksysteme zu einer energieeffizienteren Fahrweise führt. Die Erkenntnisse von Landau et al. (2014) weisen zwar eine signifikant positive, subjektive Wahrnehmung auf, berücksichtigen aber nicht explizit den Energieverbrauch. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass Landau et al. (2014) die Attraktivität von Feedbackarten vergleichen. Die Attraktivität der Feedbackart hat nicht zur Folge, dass der Energieverbrauch signifikant besser oder schlechter wird. Abbildung 57 präsentiert die Mittelwerte im Vergleich zur Baseline der einzelnen Treatments im Fahrscenario „Pendler“.

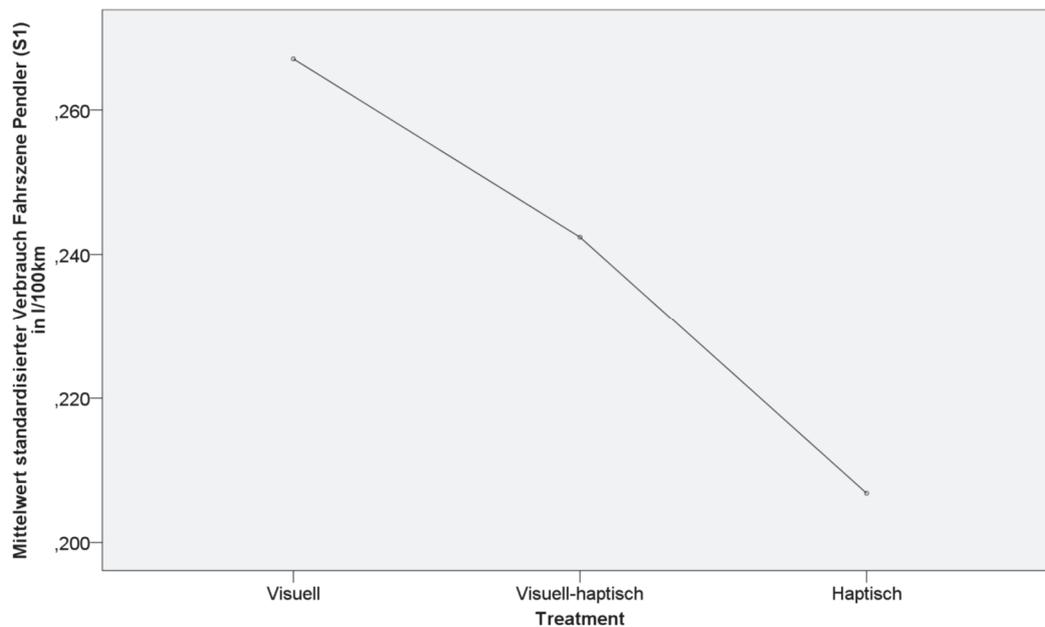


Abbildung 57: ANOVA Fahrscenario „Pendler“. Unterschiede im normalisierten Energieverbrauch je Treatment  
Quelle: Eigene Darstellung

Die Hypothese H1 kann nicht verifiziert werden. Die ANOVA weist keine signifikanten Unterschiede zwischen den Energieverbrauchsfeedbacksystemen auf. Kruskal-Wallis:  $\chi^2(2) = 0,279$ ,  $p = 0,870$  ergab auch keine signifikanten Unterschiede in den Tendenzen. Die Ergebnisse sprechen für die Erkenntnisse von Azzi et al. (2011), dass es keinen Unterschied zwischen visuellem und haptischem Feedback gibt. Die Anzahl der Teilnehmer ist mit 28 ähnlich hoch wie in dieser Untersuchung. Allerdings wurden die Teilnehmer noch einmal in vier Gruppen aufgeteilt. Der Alpha-Wert ist identisch und die Strecke besteht ebenfalls aus einem Stadtkurs mit einer Landstraße, sodass die Ergebnisse vergleichbar sind. Andererseits kann nicht bestätigt werden, dass es einen signifikanten Effekt von dem visuell-haptischen Feedback gibt (Azzi et al. 2011). Aus den Erkenntnissen von Azzi et al. (2011) geht hervor, dass der Einsatz von haptischem Feedback zu bevorzugen ist. Dagegen könnte vorgebracht werden, dass das in dieser Arbeit verwendete Feedback sich am Handgelenk befindet und kein Gaspedal ist. Hier liegt die Frage nahe, ob der Unterschied hierin begründet sein könnte. Andererseits ist zu bedenken, dass Hibberd et al. (2015) einen signifikanten Unterschied feststellten und auch Jamson et al. (2015a) einen signifikanten Unterschied fanden, welcher nicht bestätigt werden kann. Die Hypothesen H1.2a und H1.2b sind somit abzulehnen.

Es könnte auch mit einer möglichen Latenz zu tun haben, welche durch das verwendete System entstanden sein könnte. Hibberd et al. (2015) und Jamson et al. (2015a) verwenden kein verteiltes System für das Feedback. Kapitel 13 überprüft eingehender die Frage nach dem Einfluss des verteilten Systems.

Der höhere Energieverbrauch könnte auf eine stärkere Erregung zurückzuführen sein, wie in Unterabschnitt 6.2.1.3 erläutert wurde. Fraglich ist allerdings, ob eine direkte Messbarkeit möglich ist. Zukünftige Studien könnten zusammen mit Psychologen und Neurowissenschaftlern beispielsweise zusätzlich kognitive Last und Hautleitwert messen, um tiefere Erkenntnisse zu erhalten.

### 12.3.3 Fahrscenario „Familie“

Die Betrachtung der Mittelwerte für das Fahrscenario „Familie“ zeigte keine signifikanten Unterschiede (ANOVA:  $p = 0,340$ , Kruskal-Wallis:  $\chi^2(2) = 3,113$ ,  $p = 0,211$ ) bei der Verwendung von Feedback. Abbildung 58 veranschaulicht Unterschiede in den Mittelwerten, wobei das visuelle Feedback den geringsten Energieverbrauch aufweist, welches nicht den Erwartungen entspricht. Das visuell-haptische Feedback weist den höchsten Mittelwert auf, somit sind die Hypothesen H1.2a und H1.2b abzulehnen. Das haptische Feedback weist im Vergleich zum visuell-haptischen Feedback einen niedrigeren Mittelwert auf. Jedoch ist er deutlich höher als der Mittelwert des visuellen Feedbacks. Somit muss H1.1 abgelehnt werden. In Abbildung 58 sind die Mittelwerte der einzelnen Feedbacksysteme vergleichend dargestellt. Zusätzlich zeigt sich in Abbildung 58, dass die Mittelwerte grundsätzlich negativ sind und somit Energie im Vergleich zur Baseline durch persuasive Technologien eingespart wird (Fogg 2009b).

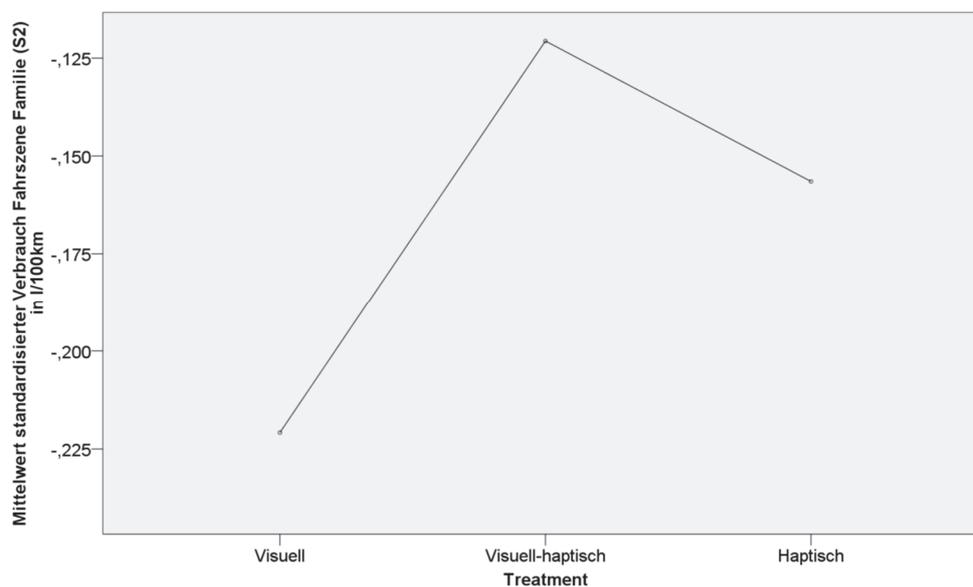


Abbildung 58: ANOVA Fahrscenario „Familie“. Unterschiede im normalisierten Energieverbrauch je Treatment  
Quelle: Eigene Darstellung

Die Daten der einzelnen Treatments waren bis auf das haptische Feedback nicht normalverteilt. Darüber hinaus ist die Stichprobengröße je Treatment kleiner als 40 und verzerrt die Ergebnisse der ANOVA (Bortz/Schuster 2010, 214). Daher wurde ein nicht-parametrischer Test über die grundlegenden Tendenzen der Unterschiede herangezogen (Bortz/Schuster 2010, 214ff). Die Ergebnisse verifizieren die Hypothesen H1, H1.2a und H1.2b nicht und sind abzulehnen. Lediglich H1.1 kann aufgrund der möglichen Gleichheit zwischen den Energieverbräuchen von visuellem und haptischem Feedback beibehalten werden. Die in Abbildung 58 dargestellten Unterschiede sind somit auch in der Tendenz als gleich anzusehen.

Hypothese H3 kann nicht nachgewiesen werden. Die Moderationseffekte für die Energiebewusstseinskala weisen keine signifikanten Werte auf ( $p < 0,05$ ).

Das haptische Feedback ist als einziges normalverteilt. Es stellt sich die Frage, ob das Feedback nicht verstanden wurde oder es an technischen Aspekten wie Frequenz oder Vibration liegt. In Kapitel 13 wird mit einem Reaktionstest das Feedback eingehender evaluiert.

#### 12.3.4 Sonstiges

Für die Auswertung der Feedbacksysteme bei einem großen Effekt von  $> 0,5$  nach Cohen (1992) wären bei einem  $\chi^2$ -Test mit  $df = 2$  nach einer G\*Power-Analyse mindestens 62 Teilnehmer je Treatment notwendig (Faul et al. 2007). Bei einer mittleren Effektgröße nach Cohen (1992) wären 172 Probanden je Treatment erforderlich (Faul et al. 2007). Jedoch ist die Effektgröße bei den Feedbacksystemen als klein anzusehen. Somit wären nach der G\*Power Analyse für einen  $\chi^2$ -Test mit  $df = 2$  1545 Probanden je Treatment notwendig (Faul et al. 2007). Eine mögliche Ursache könnte die fehlende Varianz von der manuellen Schaltung im Energieverbrauch sein, wie von Ngo et al. (2013) dargelegt wurde.

Hingegen wurde ein Automatikgetriebe verwendet, während manuelle Getriebe einen signifikanten Einfluss aufweisen (Ngo et al. 2013). Technik, welche dem Menschen komplexe Fahraufgaben abnimmt, wie das Schalten eines Ganges, führen zu einem energieeffizienteren Fahren mit weniger Varianz im Energieverbrauch. Es zeigte sich bei der Erstellung des Messmodells in Kapitel 5, dass energieeffizientes Fahren für den Menschen zu komplex ist. Die Komplexität ist allein durch die Fahraufgabe bereits gegeben. Und die Komplexität lässt sich beispielsweise in den verschiedenen Aussagen über optimale Motordrehzahlen erkennen. Die Berechnungen für ein energieeffizientes Fahren können während des Fahrens vom Menschen nicht durchgeführt werden. Autonomes Fahren ermöglicht eine energieeffizientere Fahrweise als es der Mensch kann. Das Automatikgetriebe führt dazu, dass die Effektstärke gering ist. Das Ergebnis wirft die Frage auf, wie Energieeffizienz in Zukunft beim autonomen Fahren erzielt werden kann.

Je mehr Fahrerfahrung ein Proband hat, desto weniger benutzt er ein Energieverbrauchsfeedbacksystem. Fahrer handeln mit steigender Fahrerfahrung möglicherweise mehr nach dem Gefühl als nach Messinstrumenten. Zu fragen ist hier, welche Effektstärke bei älteren Probanden zu erwarten wäre. Zusätzliche Langzeitstudien sind zu diesem Punkt denkbar.

Eine beispielhafte wirtschaftliche Betrachtung der Feedbacksysteme zeigt: Die Differenz zwischen dem Mittelwert des visuellen Feedbacks und dem haptischen Feedback beträgt auf 100 km 0,0603 Liter in S1. Bei den heutigen Benzinpreisen<sup>27</sup> von ca. 1,30 Euro betragen die wirtschaftlichen Mehrkosten für 100 km weniger als 0,08 Euro bei einem visuellen Feedback gegenüber dem haptischen. Bei einer durchschnittlichen Fahrleistung von 15.000 km pro Jahr und der Ersparnis bei einem haptischen Feedback ( $M = 0,2068$ ) entspräche dies Kosten in Höhe von 40,33 Euro. Die Verringerung des Verbrauchs beträgt im Fahrscenario S2  $M = -0,2208$  beim visuellen Feedback auf 100 km und entspräche einer jährlichen Verringerung von Benzinkosten bei einer Fahrleistung von 15.000 km um 43,06 Euro. Je nach gefahrener Kilometermenge gleichen sich diese Werte bei den Szenarien nahezu an. Die Wirtschaftlichkeit ist somit fraglich. Der zu erreichende Effekt von Energieverbrauchsfeedbacksystemen erscheint gering.

Ein hohes Energiebewusstsein führt zu einem geringeren Energieverbrauch unabhängig vom Fahrscenario. Die Gestaltung von Feedback ist somit stärker auf das Energiebewusstsein auszurichten. Eine Veränderung des Bewusstseins kann jedoch nach psychologischen Aspekten

---

<sup>27</sup> Super E5

nur von der Person selbst kommen. Hierbei können die Erkenntnisse von Fogg (2009a) für ein gezieltes Inzentivieren genutzt werden. Einflüsse auf das Feedbacksystem selbst konnten nicht gefunden werden. Feedbacksysteme sollten daher zu einer Fahrerentlastung beitragen, in dem der visuelle Interaktionskanal für die primäre Fahraufgabe vorbehalten bleibt. Die Ergebnisse sprechen für die Nutzung von haptischen Energieverbrauchsfeedbacksystemen am Handgelenk als Alternative.

Die Ergebnisse im Hinblick auf die Motivation waren nicht erwartet. Insbesondere dass es keinen Unterschied beim Feedbacksystem gab. Der Kontext des Autofahrens erfordert eine kognitive Aufmerksamkeit, die sich auf die Situation selbst richtet. Ein bewusstes Steuern des Energieverbrauchs ist in Situationen möglich. Zu berücksichtigen ist der Aspekt, dass die Laborsituationen, bis auf die Vorstellung, sich in einer bestimmten Situation zu befinden, identisch sind. Psychologische Effekte scheinen folglich beim Autofahren eine größere Wirkung als technische zu haben. Automatisiertes Fahren kann somit dazu führen, dass energieeffizienter gefahren wird, da psychisch bedingte Aspekte von der Maschine nicht berücksichtigt werden.

#### **12.4 Limitationen**

Aufgrund des verwendeten Laborexperimentes gibt es keine externe Validität.

Die Population weist einen hohen Bildungsgrad auf. Die Studierenden waren technikaffin und dies schränkt die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf weniger technikaffine Menschen möglicherweise ein. Des Weiteren schränkt das relativ geringe Alter der Gruppe die Übertragbarkeit auf andere Altersgruppen ein (Varianz 4 Jahre).

Des Weiteren kann der Fahrsimulator selbst Einfluss auf die Teilnehmer gehabt haben, so wurde eine Gangschaltung mit Automatikgetriebe verwendet. Es gaben 28 % an solche Gangschaltung nicht zu kennen und dies kann zu einer Verzerrung geführt haben. Zusätzlich könnte das Kupplungspedal, welches bei den Pedalen von Fanatec nicht demontiert werden konnte, irritierend gewirkt haben. Die Bedienung der Pedale wurde den Probanden zwar vor Beginn des Experiments erklärt und in der Eingewöhnungsrunde erprobt. Trotzdem könnte dadurch das Laborexperiment beeinflusst worden sein.

Alle Teilnehmer fuhren zunächst das Fahrszenario „Pendler“ und dann das Fahrszenario „Familie“, sodass es zu Lerneffekten gekommen sein kann. Lerneffekte reduzieren die Robustheit des Experiments. Die Vergabe von Treatments erfolgte vollständig zufällig. Allerdings unter der Besonderheit, dass die Vergabe von Treatments nicht zwingenderweise gleichmäßig verteilt gewesen sein musste.

Das Motorengeräusch war monoton und trotz der Lautsprecher im Armaturenbrett nicht sehr laut. Beim Starten des Motors war es aber deutlich zu hören. Probanden könnten höhere Geschwindigkeiten und/oder Motordrehzahlen weniger stark wahrgenommen haben. Zwar wird durch das hier verwendete Automatikgetriebe ein fehlerhaftes Schalten verhindert, jedoch konnte kein akustischer Unterschied zwischen den Gängen wahrgenommen werden.

Die Lenkung besitzt eine ForceFeedback-Einheit zur Wiedergabe von Seitenkräften. Ohne Seitenkräfte ist das realitätsnahe Empfinden der Geschwindigkeit eingeschränkt. Die gefühlte Geschwindigkeit kann daher zu hoch gewesen sein und die Ergebnisse verzerren.

Die Videoanalyse und die Kommentare zeigen, dass einige Probanden nach Abschluss des Experiments die Aussage treffen, dass das Testobjekt der „Stresslevel“ war. Die Aussage ist zum einen positiv, da davon ausgegangen werden kann, dass keine Verzerrung der Messergebnisse auftreten. Zum anderen zeigt die Aussage, dass das Verständnis des Feedbacks nicht zwingend gegeben war. Ferner weisen die Ergebnisse mit einem haptischen Feedback eine höhere Varianz auf als das visuelle Feedback. Unter Umständen kann eine Verzerrung im haptischen Feedback vorliegen. Das haptische Feedback wird in einem weiteren Experiment im Kapitel 13 genauer untersucht.

## 13 Experiment zur Überprüfung des haptischen Feedbacks

Als haptisches Feedback ist die Smartwatch ein geeignetes Gerät zur Messung der Qualität und könnte in einem weiteren Schritt zur Verbesserung des Fahrerlebnisses eingesetzt werden (Miller 2015, 119ff., p. 119ff). Letzteres wurde in verschiedenen Studien bereits untersucht (Ríos-Aguilar et al. 2015; Li et al. 2015; Liu et al. 2015).

Die Hypothese wird abgeleitet aus der Diskussion und den Limitationen des Experimentes mit dem Fahrsimulator (vgl. Kapitel 12) und lautet: Gibt es einen signifikanten Unterschied in der mittleren Reaktionszeit zwischen dem visuellen und dem haptischen Feedback?

Daraus ergibt sich die Nullhypothese  $H_0: \mu_v = \mu_h$  sowie die Gegenhypothese  $H_1: \mu_v \neq \mu_h$ . Es wird ein  $\alpha = 0,05$  festgelegt.

Bevor das haptische Feedback genauer untersucht werden kann, wird die Implementierung des Feedbacks durch eine Smartwatch genauer betrachtet, um eine fehlerhafte Implementierung auszuschließen. Auszugsweise wurden in Gottlieb et al. (2018b) Teile dieses Kapitels veröffentlicht.

### 13.1 Implementierung und Netzwerkinfrastruktur der Versuchsumgebung

Eine fehlerhafte Implementierung des Feedbacks in der Smartwatch lässt sich nicht erkennen. Die Vibration erfolgt in dem vorgegebenen Muster und in den zeitlich vorgesehenen Abständen. Pausen sind im Code nicht vorhanden.

Eine entscheidende Herausforderung in der Übertragung, insbesondere bei zeitkritischen Daten, ist die Latenz, welche die Zeitspanne zwischen Sender und Empfänger ist.

Bevor die Latenz näher betrachtet werden kann, ist die verwendete Kommunikationsinfrastruktur zu betrachten. Insbesondere, welche Sender und Empfänger im Netzwerk vorhanden sind. Der Fahrsimulator sendet Daten mittels einer XML-Schnittstelle an das interne Netzwerk mit der SSID: OpenDS. Das Netzwerk ist nicht mit dem Internet verbunden und ausschließlich mit Endgeräten, welche zur Durchführung des Experimentes notwendig sind, um Störungen zu vermeiden. Als Endgeräte sind mit dem OpenDS-Netzwerk verbunden: der Rechner des Fahrsimulators, das Android-Tablet zur Darstellung des Kombiinstrumentes und das Smartphone zum Empfangen von Feedback. Das Smartphone selbst ist mit dem Internet via Eduroam verbunden, ebenso die Smartwatch. Zusätzlich ist das Smartphone mit der Smartwatch mittels Bluetooth LE in Version 4.0 gekoppelt. In Abbildung 59 ist die Netzwerkinfrastruktur der Versuchsumgebung dargestellt.

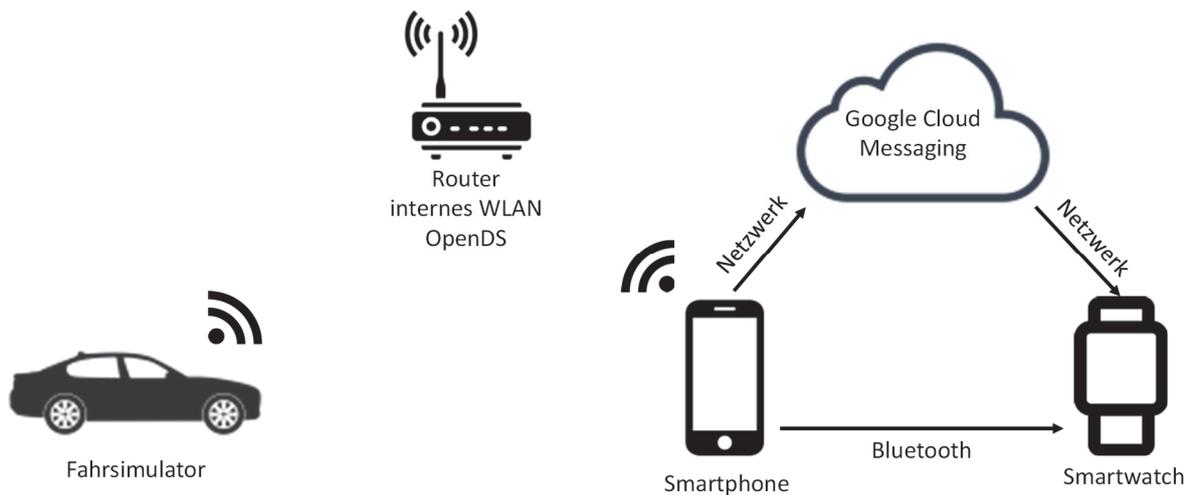


Abbildung 59: Netzwerkinfrastruktur der Versuchsumgebung  
 Quelle: In Anlehnung an Gottlieb et al. (2018b)

Aus der Kommunikationsinfrastruktur lassen sich für die Latenz bei der Implementierung folgende Faktoren als abhängige Größen ableiten: die Hard- und Software der Smartwatch sowie des Smartphones, die Netzwerkverbindung und die Intermediäre zwischen den einzelnen Geräten sowie die physikalische Umgebung der Netzwerkinfrastruktur.

### 13.2 Definition des Untersuchungsobjektes

Zunächst ist die Eignung der Smartwatch für das Laborexperiment zu überprüfen. Sollte eine Verzerrung vorliegen, stellt sich die Frage inwieweit die Ergebnisse von ihr beeinflusst werden. Zur Prüfung kann ein Reaktionstest verwendet werden. Dazu kann der Zeitunterschied zwischen der Nachricht vom Server zum Client und zum Server zurück gemessen werden. Für die Messung wird ein sogenannter Timestamp  $t_1$  beim Senden und ein Timestamp  $t_2$  beim Empfangen der Bestätigung gespeichert. Nach dem Cristian-Algorithmus (Cristian 1989) wird die Round-Trip-Time (RTT) ermittelt, indem  $t_1$  von  $t_2$  subtrahiert wird.

Zur Messung der Latenz ist ein eigener Latenzserver „LatencyServer“ aufgesetzt worden. LatencyServer ist eine Applikation, welche sogenannte Acknowledgements (ack) empfängt, um die Laufzeit zu korrigieren. Es wird angenommen, dass diese beim Senden und Empfangen identisch sind. Daher kann die RTT nach Cristian (1989) durch zwei geteilt werden. Für die Berechnung der eingestellten Reaktionszeitwerte für die Latenz wird die halbe RTT von der gemessenen Reaktionszeit subtrahiert, welche in der folgenden Gleichung dargestellt wird:

$$t_{h,adj} = t_h - RTT/2 \quad 13.1$$

Der Ansatz, die Hälfte der RTT zu verwenden, erfordert Symmetrie der RTT innerhalb des Netzwerkes. Daher ist die Verwendung eines sogenannten Wide Area Networks hinderlich und sie hätte einen signifikanten Einfluss auf die Messung (Claffy et al. 1993). Deshalb wird ein eigenes WLAN für die Messung verwendet. Abbildung 60 zeigt das Netzwerksequenzdiagramm, welches den Nachrichtenaustausch zwischen Simulator (OpenDS), Smartwatch und

Smartphone darstellt. Darüber hinaus stellt diese einen Überblick über das entwickelte Timestamp-Austausch-Protokoll dar. Insgesamt werden acht Timestamps benötigt: auslösendes Ereignis ( $t_1$ ), Empfang der Nachricht am Smartphone ( $t_2$ ), Senden der Nachricht vom Smartphone ( $t_3$ ), Empfang der Nachricht am Smartwatch ( $t_4$ ), Senden der Nachricht vom Smartwatch ( $t_5$ ), Smartphone empfängt Bestätigung von der Smartwatch ( $t_6$ ), Smartphone sendet Bestätigung an den LatencyServer ( $t_7$ ) und LatencyServer speichert die Gesamtzeit ( $t_8$ ). Die Speicherung erfolgt als UnixTimestamps in ms. Jeder mögliche Timestamp wird für jedes Gerät aufgezeichnet. Die Timestamps  $t_1$  und  $t_8$  sind für die Berechnung notwendig.

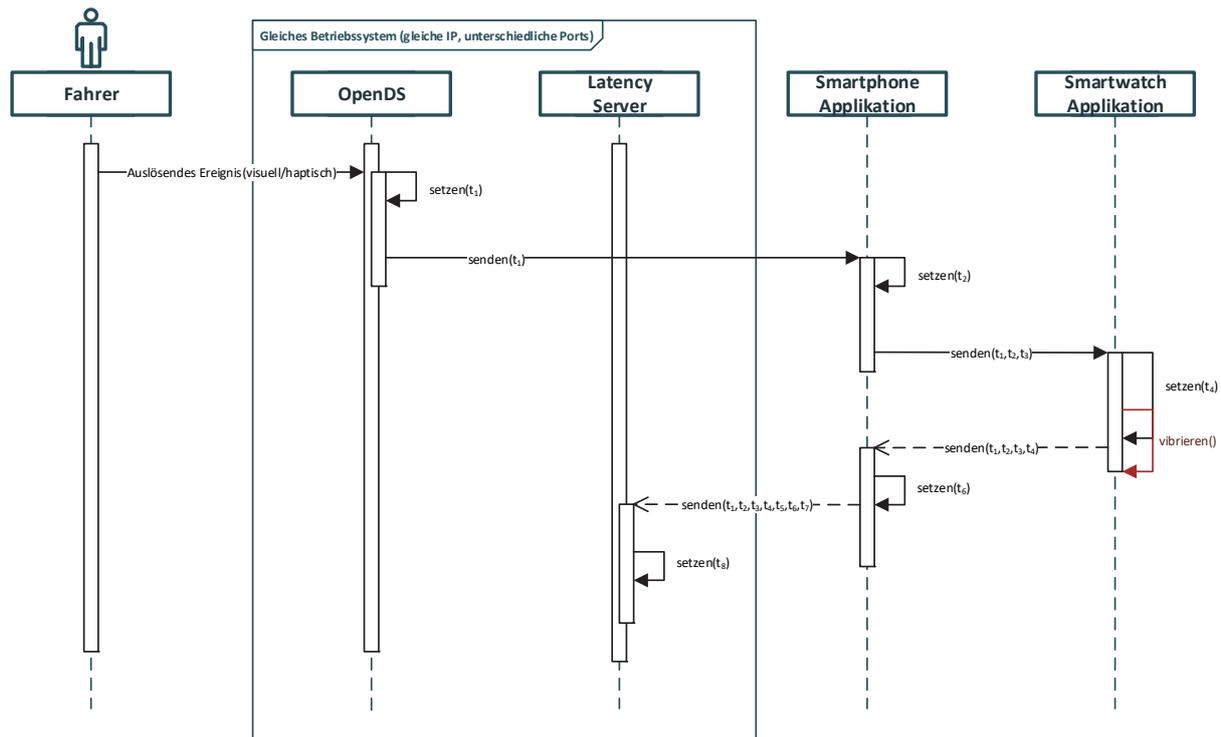


Abbildung 60: Sequenzdiagramm der Timestamps ( $t_1$ - $t_8$ ) von Latenz-Nachrichten  
Quelle: Eigene Darstellung

Die abhängige Variable ist die Reaktionszeit. Für die Überprüfung wird der ReactionTask in OpenDS als Fahrerszenario verwendet.

Ein Timer wurde automatisch eingestellt, sobald das visuelle oder haptische Feedback an einer Autobahnbrücke im ReactionTask ausgelöst wurde. Der Timer stoppt, sobald der Fahrer das Bremspedal drückt. Bleibt der Fahrer für weniger als zwei Sekunden auf der Bremse, sieht der ReactionTask vor, den Wert als ungültig mit zehn Sekunden zu markieren. OpenDS berechnet pro Proband die Differenz zwischen den Zeitstempeln Start und Ende.

Beim visuellen Signal wurde gemessen, sobald der Fahrer begann zu lenken und die Spur zu wechseln. Wurde die Spur nicht innerhalb von zwei Sekunden erreicht, so wurde der Wert mit dem Fehlerwert von zehn Sekunden markiert.

Zur Vollständigkeit wird der Begriff „Reaktionszeit“ vereinfacht verwendet. Nach Klebelsberg (1982) wird die Reaktionszeit des Fahrers und die Zeit bis zum Betätigen der Bremse gemessen.

Sie wird in der Literatur als „operating time“ bezeichnet. Dies kann als Ausführungszeit verstanden werden, welche die Verzögerung zwischen dem Drücken des Bremspedals und dem tatsächlichen Bremsvorgang beschreibt. In der Fahrsimulation ist dies die Eingangsverzögerung zwischen Bremspedal und OpenDS.

### 13.3 Experimentdesign

Es ist ein vollständig zufälliges Within-Subject-Design-Experiment durchgeführt worden. Die Probanden fahren zwei Runden auf einer fünfspurigen Autobahn mit einer Geschwindigkeitsanzeige mit einer Landschaft als Hintergrund.

Die abhängige Variable ist die Reaktionszeit, gemessen in Millisekunden. Zur Messung der Reaktionszeit wird der „ReactionTask“ von OpenDS verwendet (Math et al. 2013).

Als unabhängige Variable wurden zwei Treatments herangezogen, um den Bremsvorgang einzuleiten: (1) ein rotes visuelles Feedback und (2) ein haptisches Feedback mit einer vibrierenden Smartwatch. Beim roten Feedback oder der Vibration waren die Probanden angehalten zu bremsen. Das Bremspedal musste für mindestens zwei Sekunden gedrückt werden. Zusätzlich wurde in beiden Runden ein grünes visuelles Signal zwischen den Treatments gegeben, um einen Spurwechsel herbeizuführen und ein Erraten des Signals nicht zu ermöglichen. Das rote und das grüne visuelle Feedback erschienen an einer Autobahnbrücke. Abbildung 61 stellt das zugrunde gelegte Forschungsmodell dar.



Abbildung 61: Forschungsmodell: Reaktionszeit  
Quelle: Eigene Darstellung

Nach dem Experiment mussten die Teilnehmer einen Fragebogen zu demografischen Daten ausfüllen, um eine Vergleichbarkeit zu den Experimenten aus Kapitel 11 zu ermöglichen.

### 13.4 Reaktionstest: Experiment

An dem Experiment nahmen 13 weibliche und 22 männliche Probanden teil, im Alter von 19 bis 42 Jahren ( $M = 25,97$ ,  $SD = 4,649$ ). Die gefahrenen Kilometer pro Jahr lagen zwischen 0 und 45.000 km ( $M = 10.220$  km,  $SD = 11573,37$  km). Die Teilnehmer waren im Durchschnitt 8,26 Jahre ( $SD = 4,736$  Jahre) im Besitz einer Fahrerlaubnis.

Die Probanden ähneln somit denen aus dem ersten Experiment, sind jedoch im Durchschnitt älter und haben eine höhere Fahrleistung pro Jahr.

#### 13.4.1 Durchführung

Die Durchführung des Experimentes findet mit dem Unterkapitel 11.3 eingesetzten Fahrsimulator statt. Die Daten sind aufgrund der identischen Messumgebung vergleichbar. Zusätzlich wird, wie in Unterkapitel 13.2 eingehender beschrieben, ein separater LatencyServer zur Messung von möglichen Zeitdifferenzen verwendet. Getestet wird die Wirkung des haptischen

Feedbacks durch Smartwatch aus den Experimenten, welche in Abschnitt 9.2 vorgestellt wurden.

Als Anreiz zur Teilnahme am Experiment wurden drei Amazon-Gutscheine im Wert von jeweils 20 Euro unter den Teilnehmern verlost. Die Datenspeicherung für die Amazon-Gutscheine erfolgte getrennt von den Teilnehmerdaten, sodass eine vollständige Anonymisierung gewährleistet ist.

Bevor das Experiment durchgeführt wurde, machten sich die Probanden mit dem Fahrsimulator in einer Eingewöhnungsrunde vertraut.

Im Experiment wurden den Probanden insgesamt drei Bildschirme mit den Fahrinstruktionen gezeigt. Neben der Darstellung wurden die Instruktionen vom Experimentator vorgelesen. Die Anweisung stammt vom ursprünglichen ReactionTest und ist an das haptische Feedback angepasst.

Die Probanden sind angewiesen worden, ausschließlich den rechten Fuß für das Gaspedal und die Bremse zu verwenden, um mögliche Unterschiede ausschließen zu können. Die Fahrhinweisungen unterscheiden sich für das visuelle (Fahrhinweisung 2a) und das haptische (Fahrhinweisung 2b) Feedback. Es werden den Probanden für das visuelle und das haptische Feedback ebenfalls unterschiedliche Darstellungen der Feedbackinformationen gegeben, sodass den Probanden bewusst war, auf welches Feedback sie achten mussten. Folgende Fahrhinweisungen wurden den Probanden auf dem Bildschirm gezeigt:

Fahrhinweisung 1<sup>28</sup>: *In this simulation you will be driving on a five-lane straight road. Your task will be to drive in the center lane at full speed (60 km/h) and to stay in lane as good as possible. Note: the car's speed is fixed between 20 km/h and 60 km/h. You will pass different sign gantries.*

Fahrhinweisung 2a<sup>29</sup>: *Your task is to react as fast as possible on appearing signs. If a red sign (x) shows up, you will have to slow down as fast as possible to 20 km/h without leaving the center lane. If a green sign (arrow) appears, you will have to steer your car to the indicated lane as fast as possible without getting any slower.*

Fahrhinweisung 2b<sup>30</sup>: *Your task is to react as fast as possible on appearing signs. If no sign appears and the Smartwatch vibrates, you will have to slow down as fast as possible to 20 km/h without leaving the center lane. [...]*

Fahrhinweisung 3<sup>31</sup>: *In a short distance after each sign gantry an acoustic signal will be played which indicates the end of the current reaction measurement. When you hear this signal please*

---

<sup>28</sup> In Anlehnung an Fahrhinweisung vom Reaktionstest aus der Software OpenDS (Math/Müller 2015)

<sup>29</sup> In Anlehnung an Fahrhinweisung vom Reaktionstest aus der Software OpenDS (Math/Müller 2015)

<sup>30</sup> In Anlehnung an Fahrhinweisung vom Reaktionstest aus der Software OpenDS (Math/Müller 2015)

<sup>31</sup> In Anlehnung an Fahrhinweisung vom Reaktionstest aus der Software OpenDS (Math/Müller 2015)

*accelerate to full speed (60 km/h) and make sure to return to the center lane for the next sign. If you have questions, please contact the supervisor.*

Zur Vermeidung von möglichen Verzerrungen wurde ein Pre-Experiment mit zehn Studierenden durchgeführt (Van Teijlingen/Hundley 2001).

### 13.4.2 Ergebnisse

Die Pre-Experimentergebnisse des einfachen t-Tests für verbundene Stichproben belegen, dass zwischen dem visuellen und haptischen Feedback kein signifikanter Unterschied besteht und sind in Tabelle 22 dargestellt.

<i>N</i> = 10	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>SE</i>	95 % CI (diff.)		Testwert = 1250 ms		
				untere	obere	<i>M</i> (diff.)	<i>t</i> (9)	<i>p</i>
visuell	1196,8	151,205	47,815	-161,366	54,966	-53,2	-1,113	0,295
haptisch	1184,3	126,761	40,085	-156,380	24,980	-65,7	-1,639	0,136

Tabelle 22: Ergebnisse des Pretests der Reaktionszeiten  
Quelle: Eigene Darstellung, CI = Konfidenzintervall

Für jede gemessene Reaktionszeit eines Probanden-Treatments werden jeweils zehn Werte zu einem Mittelwert zusammengefasst. Davon werden das arithmetische Mittel und der Median berechnet, welche als Tupel vorliegen.

Ungültige Werte werden vom standardisierten Reaktionstest mit einem Wert von 10.000 ms markiert und von der Berechnung als Ausreißer ausgeschlossen. Es wurden drei Werte als Ausreißer markiert. Abzüglich der Ausreißer beträgt die Stichprobengröße  $N = 347$ .

Die statistische Analyse wurde auf Grundlage von Unterschieden in der zentralen Tendenz der Reaktionszeiten von den jeweiligen Probanden-Treatments ausgewertet. Das visuelle Feedback weist eine Reaktionszeit von  $M_v = 1276,97$  ms ( $SD_v = 292,278$ ) auf. Die um die Latenz korrigierten haptischen Werte haben einen Mittelwert von  $M_{h,adj} = 1290,99$  ms ( $SD_{h,adj} = 283,57$ ). Hingegen weisen die haptischen Werte mit Latenz einen größeren Mittelwert auf  $M_h = 1572,88$  ms ( $SD_h = 313,161$ ). Die Schiefe (visuell: 4,669,  $SE = 0,131$ , haptisch ohne Latenz: 4,265,  $SE = 0,261$ , haptisch mit Latenz: 3,284,  $SE = 0,261$ ) ist positiv signifikant. Die Kurtosis ist ebenfalls signifikant (visuell: 41,616,  $SE = 0,261$ , haptisch ohne Latenz: 41,121,  $SE = 0,261$ , haptisch mit Latenz: 29,506,  $SE = 0,261$ ).

Zusätzlich sind für die nähere Betrachtung die Werte je Proband aggregiert und die Durchschnittswerte miteinander verglichen worden. Der Vergleich von den aggregierten Reaktionswerten wird unterschieden in Mittelwert und Median. Das visuelle Treatment zeigt eine positive Schiefe, welche im Median signifikant ist. Die Abweichung zu den von Green (2000) vorgeschlagenem Wert mit 1250 ms ist sehr gering.

In Tabelle 23 sind die Ergebnisse der Tests auf Homoskedastizität und Normalverteilung der Reaktionszeit dargestellt. Die Tests ergaben inkonsistente Ergebnisse für den arithmetischen Mittelwert und den Median. Beide Werte ergaben unterschiedliche Ergebnisse für die Homos-

kedastizität und Normalverteilung. Der Test nach Kolmogorov-Smirnov zeigt einen signifikanten p-Wert für den visuellen Mittelwert und den haptischen Medianwert ( $p < 0,05$ ,  $\alpha = 0,05$ ). Der Test nach Shapiro-Wilk zeigt einen signifikanten Wert  $p = 0,028$  ( $\alpha = 0,05$ ) für den Wert des visuellen Medians. Daher können die Annahmen verzerrt sein und die Validität der Ergebnisse ist mit Vorsicht zu betrachten.

	Levene		Kolmogorov–Smirnov		Shapiro–Wilk	
	$W(1,33)$	$p$	$D(35)$	$p$	$W(35)$	$p$
$M_v$ [ms]	3,048	0,090	0,157	0,030	0,943	0,070
$M_h$ [ms]	0,051	0,823	0,108	0,200 <sup>a</sup>	0,960	0,232
$Median_v$ [ms]	10,406	0,003	0,108	0,200 <sup>a</sup>	0,930	0,028
$Median_h$ [ms]	0,340	0,564	0,144	0,063	0,944	0,076

<sup>a</sup> Lilliefors Signifikanzkorrektur angewendet

Tabelle 23: Tests auf Homoskedastizität und Normalverteilung der Reaktionszeit  
Quelle: Eigene Darstellung

Sowohl die longitudinalen Daten als auch die Daten des zentralen Richtungswertes weisen eine positive Verzerrung auf. Dieses Phänomen ist eine charakteristische Eigenschaft bei Reaktionszeitstudien (Baayen/Milin 2015; Whelan 2008). Der Effekt wurde erstmals in der Theorie der Erinnerungs-Rückgewinnung von Ratcliff (1978) beschrieben. Die Erklärung für diese Asymmetrie ergibt sich daraus, dass die Verteilung der Reaktionszeiten keine Gaussche Normalverteilung darstellt, sondern eine exponentielle Gaussche Verteilung (ExGaussian, englisch: Exponentially Modified Gaussian Distribution) (Whelan 2008; Ratcliff 1993).

Die ExGaussian ist eine Kombination der Normal- und Exponentialverteilung. Anhand des arithmetischen Mittels  $\mu$ , der Standardabweichung  $\sigma$  und des Parameters  $\tau$  kann die ExGaussian bestimmt werden.  $\tau$  stellt dabei eine Kombination des arithmetischen Mittels  $\mu$  und der Standardabweichung  $\sigma$  der exponentiell-verteilten Komponente dar. Allerdings verletzen die ExGaussian-verteilten Daten die Annahmen der generellen Test-Statistiken, beispielsweise in Bezug auf den t-Test und ANOVA. Die Anwendung dieser Methoden gefährden die Validität der statistischen Schlussfolgerungen. Beispielsweise zeigte Ratcliff (1993) die mangelnde Robustheit der ANOVA als anwendbare Methode bei verzerrten Daten und Ausreißern auf.

In einem ersten Schritt wird eine Sichtprüfung durchgeführt, um die Verteilung der Datensätze einschätzen zu können. Im nächsten Schritt ist es möglich einen Vergleich der einzelnen Datensätze anzustellen. Es werden anhand von Boxplots die einzelnen Treatments und deren Mittel- und Medianwerte miteinander verglichen. Die Mittelwerte und Mediane bekunden augenscheinlich keine signifikanten Unterschiede in den Varianzen. Das Geschlecht stellt jedoch eine mögliche Kovariable (Warshawsky-Livne/Shinar 2002; Zhang et al. 2007) in Bezug auf Reaktionszeiten dar. Da die Kovariable eine dichotome Ausprägung besitzt, kann dies mit Boxplots gezeigt werden. Die Interquartilsabstände der weiblichen Probanden sind größer und dies könnte in Anbetracht der ebenso größeren Standardabweichung an der kleineren Menge an weiblichen Probanden liegen. Ein Boxplot zum Vergleich der Mittelwerte der Treatments und der Unterschiede nach Geschlecht ist in Abbildung 62 visualisiert.

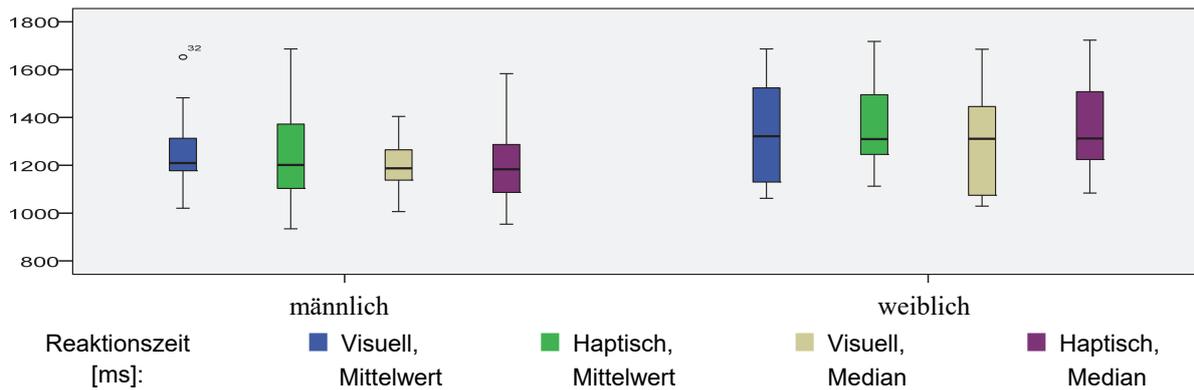


Abbildung 62: Vergleich der Mittelwerte der Treatments nach Geschlecht  
Quelle: In Anlehnung an Gottlieb et al. (2018b)

Insgesamt zeigt sich, dass eine signifikante, positive Schiefe vorliegt. Zur Vervollständigung wurde die Untersuchung auf mögliche geschlechterspezifische Differenzierungen hin zusätzlich betrachtet. So ist bei den männlichen Teilnehmern eine höhere positive Schiefe als bei den weiblichen Teilnehmern vorhanden.

In Tabelle 24 sind die Reaktionszeiten sowohl für den Mittelwert als auch den Median für die Reaktionszeiten mit visuellen und haptischen Feedback inklusive Schiefe aufgelistet. Die Werte in Tabelle 24 indizieren nach Ratcliff (1993) und Whelan (2008) eine ExGaussian Verteilung.

		<i>N</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>SE</i>	Schiefe ( <i>SE</i> )	Kurtosis ( <i>SE</i> )
Reaktionszeit (visuell, Mittelwert)	Männlich	22	1246,364	149,1042	31,7891	0,980 (0,491)	1,484 (0,953)
	Weiblich	13	1329,431	205,0037	56,8578	0,221 (0,616)	-1,209 (1,191)
	Insgesamt	35	1277,217	173,8471	29,3855	0,703 (0,398)	-0,174 (0,778)
Reaktionszeit (haptisch, Mittelwert)	Männlich	22	1249,391	185,9705	39,6490	0,696 (0,491)	0,003 (0,953)
	Weiblich	13	1358,915	173,7106	48,1786	0,584 (0,616)	-0,168 (1,191)
	Insgesamt	35	1290,071	186,8005	31,5751	0,505 (0,398)	-0,314 (0,778)
Reaktionszeit (visuell, Median)	Männlich	22	1190,636	98,6974	21,0424	0,033 (0,491)	0,073 (0,953)
	Weiblich	13	1311,538	220,1826	61,0677	0,239 (0,616)	-1,105 (1,191)
	Insgesamt	35	1235,543	163,2189	27,5890	0,970 (0,398)	0,887 (0,778)
Reaktionszeit (haptisch, Median)	Männlich	22	1219,250	162,8454	34,7188	0,889 (0,491)	0,506 (0,953)
	Weiblich	13	1356,269	178,9981	49,6451	0,506 (0,616)	-0,179 (1,191)
	Insgesamt	35	1270,143	179,4426	30,3313	0,661 (0,398)	-0,188 (0,778)

Tabelle 24: Deskriptive Statistiken: Reaktionstest  
Quelle: Eigene Darstellung, Werte in ms

Die Ergebnisse des einfachen t-Tests für verbundene Stichproben zeigen, dass zwischen dem visuellen und haptischen Feedback kein signifikanter Unterschied besteht. In Tabelle 25 sind die jeweiligen Mittelwerte und die Mediane dargestellt.

<i>N</i> = 35	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>SE</i>	95 % CI (diff.)		Testwert = 1250 ms		
				untere	obere	<i>M</i> (diff.)	<i>t</i> (34)	<i>p</i>
<i>M<sub>v</sub></i>	1277,217	173,8471	29,3855	-32,501	86,936	27,2	0,926	0,361
<i>M<sub>h</sub></i>	1290,071	186,8005	31,5751	-24,097	104,240	40,1	1,269	0,213
<i>Mdn<sub>v</sub></i>	1235,543	163,2189	27,5890	-70,525	41,611	-14,5	-0,524	0,604
<i>Mdn<sub>h</sub></i>	1270,143	179,4426	30,3313	-41,498	81,784	20,1	0,664	0,511

Tabelle 25: t-Test für Reaktionszeiten: Mittelwert und Median  
Quelle: Eigene Darstellung, CI = Konfidenzintervall

Da eine ExGaussian-Verteilung der Daten vorliegt, wird die Maximum-Likelihood-Methode angewendet. Tabelle 26 zeigt die Ergebnisse der Maximum-Likelihood Methode.

	Normal distribution			ExGaussian distribution			
	<i>M</i>	<i>SD</i>	loglik	<i>M</i>	<i>SD</i>	$\tau$	loglik
<i>M<sub>v</sub></i>	1227,2171	171,3456	-229,6917	1104,2761	74,1335	172,9910	-227,6622
<i>M<sub>h</sub></i>	1290,7140	184,1126	-232,2070	1123,0981	106,0318	166,8009	-231,5470
<i>Mdn<sub>v</sub></i>	1235,5429	160,8703	-227,4838	1088,4929	78,5555	147,0449	-224,6453
<i>Mdn<sub>h</sub></i>	1270,1429	176,8605	-230,8005	1092,8017	78,9559	177,3363	-229,0059

Tabelle 26: Maximum Likelihood angepasste Werte für Normal- und ExGaussian-Verteilung  
Quelle: Eigene Darstellung

In vorhergehenden Forschungen wurden einige Methoden zur Bearbeitung der Daten entwickelt, um eine Normalverteilung herzustellen (Ratcliff 1993; Whelan 2008) wie die Eliminierung von Ausreißern (Werte von  $< 200$  ms,  $> 2500$  ms oder  $3\sigma$  ms), die Transformation der Daten in Geschwindigkeit (reziproke Reaktionszeit) oder durch einen natürlichen Logarithmus, die Verwendung des Medianes.

Für die Studie wurden die Daten bereits anhand der Treatments je Proband aggregiert und 35 visuelle und haptische Reaktionszeitenpaare gebildet. Ausreißer wurden durch die Gruppierung abgeschwächt. Zusätzlich wurde jedes Wertepaar des arithmetischen Mittelwertes mit dem Wertepaar des Medianes verglichen. Dies ermöglicht die doppelte Überprüfung der Ergebnisse.

Die Treatments sind mit demselben Probanden durchgeführt worden, daher wird der t-Test für verbundene Stichproben zur Ermittlung des Mittelwerts und Medians herangezogen. Das Within-Subjekt-Design verursacht eine stochastische Abhängigkeit und ermöglicht die Nutzung des t-Tests für verbundene Stichproben. Somit wird für das Between-Subjekt-Design ein t-Test mit unabhängigen Stichproben verwendet. Der t-Test für verbundene Stichproben toleriert bestimmte Verletzungen der Normalverteilung, aber er ist nicht gegen Stichprobendaten einer asymmetrisch verteilten Grundgesamtheit robust. Tabelle 27 gibt einen Überblick der deskriptiven Statistiken des t-Tests für verbundene Stichproben.

<i>N</i> = 35		<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>SE</i>
Paar 1	<i>M<sub>v</sub></i> [ms]	1277,217	173,8471	29,3855
	<i>M<sub>h</sub></i> [ms]	1290,071	186,8005	31,5751
Paar 2	<i>Median<sub>v</sub></i> [ms]	1235,543	163,2189	27,5890
	<i>Median<sub>h</sub></i> [ms]	1270,143	179,4426	30,3313

Tabelle 27: Statistik der Paarungen des t-Tests für verbundene Stichproben  
Quelle: Eigene Darstellung

Die Ergebnisse belegen keine signifikanten Unterschiede ( $p > 0,05$  mit einem  $\alpha = 0,05$ ) zwischen den Treatments, sowohl von der Betrachtung der Mittelwerte ( $t(34) = -0,459$ ,  $M = -12,8543$ ,  $SD = 165,6717$ ,  $SE = 28,0036$ ,  $p = 0,649$ ) als auch der Mediane ( $t(34) = 1,705$ ,  $M = -34,6$ ,  $SD = 120,071$ ,  $SE = 20,2957$ ,  $p = 0,097$ ).

Des Weiteren wurden die Daten für eine Normalverteilungsnachbildung transformiert. Tabelle 28 zeigt die stabilere Normalverteilung der reziproken und logarithmischen Transformationen.

<i>N</i> = 35	1/RT (Mittelwerte)		1/RT (Mediane)		log <sub>10</sub> RT (Mittelwerte)		log <sub>10</sub> RT (Mediane)	
	Visuell	Haptisch	Visuell	Haptisch	Visuell	Haptisch	Visuell	Haptisch
<i>M</i>	0,000796	0,000791	0,000822	0,000802	3,103	3,106	3,088	3,100
<i>SD</i>	0,000102	0,000111	0,000101	0,000108	0,057	0,062	0,055	0,060
<i>W</i> (35)	0,974	0,978	0,975	0,974	0,963	0,975	0,958	0,964
<i>p</i>	0,567	0,680	0,590	0,548	0,280	0,596	0,203	0,298

Tabelle 28: Deskriptive Statistiken und Shapiro-Wilk Normalverteilungstest auf die transformierten Daten des Reaktionstests  
Quelle: Eigene Darstellung, RT = Reaktionszeit

Ähnlich wie beim vorherigen Test zeigte der t-Test für die reziprok und logarithmisch transformierten Daten, dass keine signifikanten Unterschiede ( $p > 0,05$  mit  $\alpha = 0,05$ ) zwischen den Ergebnissen für die Treatment zu erkennen sind; dies ist sowohl beim arithmetischen Mittel als auch beim Median der Fall. In Tabelle 29 sind die detaillierten Ergebnisse dargelegt.

		<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>SE</i>	95 % CI (diff.)		<i>t</i> (34)	<i>p</i>
					untere	obere		
1/RT	<i>M</i>	0,000006	0,000093	0,000016	-0,000026	0,000038	0,366	0,716
	<i>Median</i>	0,000020	0,000074	0,000013	-0,000005	0,000046	1,606	0,118
log <sub>10</sub> RT	<i>M</i>	-0,003779	0,053393	0,009025	-0,022120	0,014562	-0,419	0,678
	<i>Median</i>	-0,011414	0,040609	0,006864	-0,025364	0,002536	-1,663	0,106

Tabelle 29: t-Test für verbundene Stichproben der transformierten Reaktionstestdaten  
Quelle: Eigene Darstellung, CI = Konfidenzintervall

Als nächstes wird ein t-Test mit unabhängigen Stichproben mit nicht-transformierten Daten durchgeführt, um mögliche geschlechtsspezifische Unterschiede erkennen zu können. Das Geschlecht stellt eine bedeutende Kovariable bezüglich der Reaktionszeit dar (Warshawsky-Livne/Shinar 2002; Zhang et al. 2007). Da sie eine Variable mit einer Nominalskala ist, kann ein separater statistischer Test für jedes Treatment durchgeführt werden. Dabei werden potenzielle Unterschiede zwischen den Geschlechtern aufgedeckt. Das Resultat weist auf signifikante Unterschiede der Mediane in den Reaktionszeiten zwischen männlichen und weiblichen Teilnehmern hin ( $p < 0,05$ ,  $\alpha = 0,05$ ), wie in Tabelle 30 an den Ergebnissen zu sehen ist, wenn Homoskedastizität vorausgesetzt werden kann.

	homosc. assumed	<i>M</i> (diff.)	<i>SE</i> (diff.)	95 % CI (diff.)		<i>t</i> (34)	df	<i>p</i>
				untere	obere			
Visuell, <i>M</i>	ja	-83.0671	60.0132	-205.1648	39.0306	-1.384	33	.176
	nein	-83.0671	65.1411	-219.1355	53.0012	-1.275	19.581	.217
Haptisch, <i>M</i>	ja	-109.5245	63.5311	-238.7794	19.7305	-1.724	33	.094
	nein	-109.5245	62.3957	-237.6065	18.5575	-1.755	26.748	.091
Visuell, <i>Median</i>	ja	-120.9021	54.0003	-230.7666	-11.0376	-2.239	33	.032
	nein	-120.9021	64.5913	-258.6569	16.8527	-1.872	14.899	.081
Haptisch, <i>Median</i>	ja	-137.0192	59.0848	-257.2281	-16.8104	-2.319	33	.027
	nein	-137.0192	60.5808	-262.2192	-11.8192	-2.262	23.409	.033

Tabelle 30: Ergebnisse unabhängiger Stichproben des t-Tests zwischen den Geschlechtern  
Quelle: Eigene Darstellung, in ms, CI = Konfidenzintervall

Eine Varianzanalyse mit Messwiederholung zeigt, dass es keinen Zusammenhang zwischen dem visuellen und dem haptischen Feedback ohne Latenz gibt ( $F(1,346) = 0,542$ ,  $p = 0,462$ ,  $\eta_p^2 = 0,002$ ,  $N = 347$ ). Bonferroni-korrigierte paarweise Vergleiche zeigen, dass das visuelle Feedback ( $M = 1276,97$ ,  $SD = 292,278$ ) nicht signifikant höher ist als das haptische Feedback

ohne Latenz ( $M = 1290,99$ ,  $SD = 283,570$ ) und es somit keinen Unterschied zwischen diesen beiden Messungen gibt. Jedoch gibt es einen signifikanten Unterschied zwischen dem haptischen Feedback ohne und mit Latenz ( $F(1,346 = 3607,029$ ,  $p = 0,000$ ,  $\eta_p^2 = 0,912$ ,  $N = 347$ ). Der nach Bonferroni-korrigierte paarweise Vergleich zeigt, dass das haptische Feedback mit Latenz ( $M = 1572,885$ ,  $SD = 313,161$ ) signifikant ( $p = 0,000$ ) höher ist als das haptische Feedback ohne Latenz ( $M = 1290,99$ ,  $SD = 283,570$ ). Die Effektstärke  $f$  nach Cohen (1988) liegt bei 3,219 und entspricht einem starken Effekt. Ein ähnlicher signifikanter Unterschied liegt zwischen dem visuellen Feedback und dem haptischen Feedback mit Latenz vor ( $F(1,346 = 216,597$ ,  $p = 0,000$ ,  $\eta_p^2 = 0,385$ ,  $N = 347$ ). Bonferroni-korrigierte paarweise Vergleiche bekunden, dass das haptische Feedback mit Latenz ( $M = 1572,88$ ,  $SD = 313,161$ ) signifikant ( $p = 0,000$ ) höher ist als das visuelle Feedback ( $M = 1276,97$ ,  $SD = 292,278$ ). Die Effektstärke  $f$  nach Cohen (1988) liegt bei 0,791 und entspricht einem starken Effekt.

Ein weiterer möglicher Ansatz ist die Verwendung von sogenannten nicht-parametrischen Tests, welche keine Normalverteilung für eine Durchführung voraussetzen (Shirley 1977; Philip et al. 1999). Der Ansatz ist bereits bei der Auswertung des Fahrsimulatorexperimentes (s. Kapitel 12) verwendet worden.

Der Wilcoxon-Test ist analog zu dem des t-Tests für verbundene Stichproben geeignet (Bortz/Schuster 2010, 133f.). Wie beim t-Test für verbundene Stichproben zeigten sich keine signifikanten Differenzen ( $p > 0,05$ ,  $\alpha = 0,05$ ) der Ergebnisse für visuelles und haptisches Treatment, weder für das arithmetische Mittel ( $z = -0,860$ ,  $p = 0,397$ ) noch für den Median ( $z = -1,482$ ,  $p = 0,141$ ). Dies würde die Ergebnisse von André (2004) bestätigen. In Tabelle 31 sind die detaillierten Ergebnisse aufgeführt. Alternativ kann der robuste t-Test für verbundene Stichproben nach Fradette et al. (2003) genutzt werden. Die Effektstärke nach Cohen (1992) liegt für den Mittelwert bei  $r = 0,15$  und entspricht einem schwachen Effekt sowie für den Median bei  $r = 0,25$  und entspricht einem mittleren Effekt.

			<i>N</i>	Mittlerer Rank	Summe der Diff.	<i>z</i>	<i>p</i>
Mittelwert	(-)	haptisch < visuell	14	18,75	262,50	-0,860	0,397
	(+)	haptisch > visuell	21	17,50	367,50	-	-
Median	(-)	haptisch < visuell	14	16,04	224,50	-1,482	0,141
	(+)	haptisch > visuell	21	19,31	405,50	-	-

Tabelle 31: Ergebnisse Wilcoxon-Test für Reaktionszeit

Quelle: Eigene Darstellung

Um den Effekt der Kovariablen auf das Resultat zu untersuchen, wird die sogenannte Messwiederholungsanalyse von Kovarianzen (englisch: repeated measures Analysis of Co-Variances, kurz: rANCOVA) durchgeführt. Dabei wird anstatt des p-Werts die Effektgröße fokussiert  $\eta_p^2$  (Eta-Koeffizient), welches mit dem Ansatz von Cohen (1988) bestätigt wird.

Die Effektgröße ist ein standardisierter Index und schätzt einen Parameter, welcher unabhängig von der Stichprobengröße ist und quantifiziert die Größe der Differenz zwischen Populationen oder der Beziehung zwischen exogenen und endogenen Variablen (Olejnik/Algina 2003).

Der Vorteil der Effektgrößen-Messung besteht darin, dass bei der Verwendung der rANCOVA in Kombination mit verletzter Normalverteilung und Homoskedastizität noch geeignete Ergebnisse für valide Schlussfolgerungen erreicht werden (Olejnik/Algina 1987). Die Effektgröße wird als *klein* für  $\eta_p^2 > 0,02$ , *mittel* für  $\eta_p^2 > 0,13$  und *groß* für  $\eta_p^2 > 0,26$  definiert (Bakeman 2005). Tabelle 32 zeigt, dass alle Kovariablen einen kleinen oder keinen Effekt ( $\eta_p^2 < 0,13$ ) auf die Reaktionszeit des Subjekts haben. Dabei wurden die Kovariablen Alter, durchschnittlich gefahrene km pro Jahr, Jahre in Besitz einer gültigen Fahrerlaubnis und Geschlecht kontrolliert. Das Alter und die Fahrerlaubnis in Jahren hatte einen mittleren Effekt ( $\eta_p^2 < 0,13$ ) auf die Reaktionszeit der Subjekte, während andere Variablen einschließlich des Geschlechts keinen signifikanten Effekt hatten.

		<i>F</i> (1,30)	Intersubjekt	Alter	Durchschnittliche km pro Jahr	Fahrerlaubnis in Jahren	Geschlecht
Within Subjects	Treatment (Mean)	<i>F</i>	4,297	3,994	0,084	3,376	0,836
		<i>p</i>	0,047	0,055	0,774	0,076	0,368
		$\eta_p^2$	0,125	0,117	0,003	0,101	0,027
	Treatment (Mediane)	<i>F</i>	3,968	3,483	1,869	3,597	0,428
		<i>p</i>	0,056	*0,072	0,182	0,068	0,518
		$\eta_p^2$	0,117	<b>0,104</b>	0,059	0,107	0,014
Between Subjects	Treatment (Mean)	<i>F</i>		6,627	0,110	7,666	0,833
		<i>p</i>		*0,015	0,742	*0,010	0,369
		$\eta_p^2$		<b>0,181</b>	0,004	<b>0,204</b>	0,027
	Treatment (Mediane)	<i>F</i>		6,618	0,864	7,698	2,404
		<i>p</i>		*0,015	0,360	*0,009	0,132
		$\eta_p^2$		<b>0,181</b>	0,028	<b>0,204</b>	0,074

Tabelle 32: Ergebnisse Reaktionstest rANCOVA  
Quelle: Eigene Darstellung, \*  $p < 0,05$

Letztlich soll der Einfluss der Latenzzeit auf die gemessenen Reaktionszeitwerte beurteilt werden. Ein t-Test für verbundene Stichproben wurde durchgeführt, um die gemessenen Reaktionszeitwerte mit den um die Latenzzeit bereinigten Werte, die beide nicht aggregiert wurden, zu vergleichen. Es wurde ein signifikanter Unterschied der Ergebnisse für die gemessenen Werte ( $M = 1572,88$ ,  $SD = 313,16$ ) und der um Latenz bereinigten Werte ( $M = 1290,99$ ,  $SD = 283,57$ ,  $t(346) = 60,06$ ,  $p < 0,0005$ ) festgestellt. Bei den Ergebnissen für das visuelle ( $M = 1572,38$ ,  $SD = 311,91$ ) und dem haptischen Feedback mit Latenz ( $t(346) = 14,72$ ,  $p < 0,0005$ ) gab es ebenfalls signifikante Differenzen. In Tabelle 33 ist die deskriptive Statistik zu den Reaktionszeiten abgebildet.

<i>N</i> = 347	<i>M</i>	<i>SE</i>	<i>SD</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Schiefe</i> ( <i>SE</i> = 0,131)	<i>Kurtosis</i> ( <i>SE</i> = 0,261)
Reaktionszeit (v, ohne L)	1276,97	15,690	292,278	889	4454	4,669	41,616
Reaktionszeit (h, ohne L)	1290,99	15,223	283,570	697	4391	4,265	41,121
Reaktionszeit (h, mit Lz)	1572,88	16,811	313,161	959	4739	3,284	29,506
Reaktionszeit log (v, ohne L)	3,098092	3,087426	0,0788892	2,9489	3,6488	1,784	7,565
Reaktionszeit log (h, ohne L)	3,189561	3,186674	0,0767346	2,9818	3,6757	0,729	4,158
Reaktionszeit log (h, mit Lz)	3,102911	3,089905	0,0801544	2,8432	3,6426	1,086	5,805

Tabelle 33: Deskriptive Statistik zu den Reaktionszeiten in ms  
Quelle: Eigene Darstellung, *Min* = Minimum, *Max* = Maximum, *h* = haptisch, *v* = visuell, *L* = Latenz

Der t-Test für verbundene Stichproben mit logarithmisch transformierten Daten resultierte in einem signifikanten Unterschied zwischen haptischem Feedback mit und ohne Latenz ( $p < 0,0005$ ). Es gibt keinen signifikanten Unterschied zwischen dem visuellen und dem haptischen Feedback, wenn die Latenz subtrahiert wird. In Tabelle 34 sind die detaillierten Testergebnisse dargestellt.

<i>N</i> = 347		<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>SE</i>	95% <i>CI</i> (diff.)		<i>t</i> (346)	<i>p</i>
					<i>Untere</i>	<i>Obere</i>		
Pair 1	Reaktionszeiten: (h, mit L) - (h, ohne L)	281,890	87,432	4,694	272,659	291,122	60,059	0,000
Pair 2	Reaktionszeiten: (h, mit L) - (v, ohne L)	295,911	374,541	20,106	256,365	335,457	14,717	0,000
Pair 1	Reaktionszeiten: log (h, mit L) - (h, ohne L)	0,0914692	0,0893666	0,0047975	0,0820334	0,1009051	19,066	0,000
Pair 2	Reaktionszeiten: log (h, mit L) - (v, ohne L)	0,0866500	0,0250523	0,0013449	0,0840048	0,0892952	64,430	0,000

Tabelle 34: Test bei unabhängigen Stichproben in ms

Quelle: Eigene Darstellung, CI = Konfidenzintervall, L = Latenz, h = haptisch, v = visuell

Die Daten lassen den Schluss zu, dass keine signifikanten Unterschiede zwischen den Reaktionszeiten der visuellen und haptischen Treatments bestehen. Andererseits existieren signifikante Unterschiede der Reaktionszeiten zwischen männlichen und weiblichen Teilnehmern, obwohl die Effektgröße der Kovariable klein ist. Dies und die Latenzzeit haben signifikanten Einfluß auf die Zeit.

### 13.4.3 Diskussion

Die Reaktionszeitwerte bestätigen die Werte von Green (2000) über „unerwartete, aber übliche“ Bremszeiten. Die Testergebnisse weisen keine signifikanten Unterschiede vom Mittelwert der vorgeschlagenen Population von 1250 Millisekunden auf. Die Ergebnisse sprechen für eine korrekt durchgeführte Reaktionszeitmessung. Und die Ergebnisse untermauern, mit jeweils einer Reaktionszeit von 1277 Millisekunden (visuell) und 1291 Millisekunden (haptisch ohne Latenz), die von Green (2000) gefundenen Werte.

Dennoch ist das Ergebnis inkonsistent mit der Vorarbeit über intersensorisch unterstützte Reaktionszeiten von Bauer et al. (2009), Forster et al. (2002) und Ng/Chan (2012). Die auf den Ergebnissen basierende optimistische Prognose, implizierte wesentlich kürzere Reaktionszeiten, die anhand von haptischem Feedback im Vergleich zu visuellem Feedback unterstützt wurden. Dagegen ergab die statistische Analyse keinen Unterschied zwischen den beiden Treatments. Die Befunde führen zu der Frage nach der Ursache der Diskrepanz.

Die Diskrepanz zwischen den Ergebnissen und vorausgegangenem Arbeiten über intersensorische Reaktionszeiten kann der Komplexität der Aufgaben zugeschrieben werden, welche die Teilnehmer in der Studie der vorliegenden Arbeit erfüllen mussten. Die Studie von Forster et al. (2002) beinhaltete einfache Aufgaben, wie beispielsweise das Antworten auf dichotome Stimuli und das Drücken eines Knopfes, der sich direkt unterhalb des Fingers des Probanden befand. Das Experiment von Ng/Chan (2012) bestand ebenfalls aus einfachen und bestimmten motorischen Aufgaben, wie beispielsweise auf die Knöpfe eines Keypads zu drücken, während sich die Finger bereits dort befinden. Damit benötigten die Probanden nur wenig ausgeprägte

motorische und kognitive Fähigkeiten. Im Vergleich dazu bestand die Aufgabe hier aus einer komplexen Fahrsimulationsumgebung, welche die Erkennung mehrerer Treatment-Bedingungen (grünes oder rotes Zeichen, die Position des Zeichens auf der Autobahnbrücke) sowie einer vergleichsweise dauerhaften Bewegung des rechten Fußes vom Gas- zum Bremspedal erforderte. Die motorische Bremszeit des Fahrers könnte die kognitiven Differenzen zwischen beiden Treatments ausgeglichen haben.

Der größte Zeitunterschied, den Forster et al. (2002) nennen konnten, lag bei 20 ms zwischen dem visuellen, dem haptischen und dem visuell-haptischen Treatment. Solch eine Differenz ist generell für die Messungen dieser Arbeit mit 1250 ms als geschätztem Mittelwert der Population statistisch nicht signifikant. Die zu Grunde liegende Annahme ist, dass die Stimuli die motorischen Fähigkeiten nicht beeinflussen.

Weder Forster et al. (2002) noch Ng/Chan (2012) führen die Verzerrung der Daten und die ExGaussian-Verteilung der Reaktionszeitwerte näher aus. Im Gegensatz dazu wird hier ein komplexes statistisches Analyse-Framework aufgestellt, welches aus mehreren Tests und Vergleichen der verschiedenen Testergebnisse besteht. Die nicht-normale Verteilung wurde betrachtet. Ebenso die standardmäßigen statistischen Tests, die auf nicht-parametrischen Methoden angewendet wurden, um die Ergebnisse zu bestätigen. Nach Anwendung des Analyse-Frameworks konnte die  $H_0$  nicht abgelehnt werden. Vielmehr verifizieren die Ergebnisse, dass ohne Latenz kein Unterschied zwischen den einzelnen Feedbacksystemen besteht.

Das Resultat des Fahrsimulatorexperiments und Pre-Experiments zur Reaktionszeit bestätigte, dass keine signifikanten Unterschiede zwischen den Feedbacksystemen vorhanden sind. Obwohl die Forschungshypothese durch die Ergebnisse des Experiments nicht bestätigt werden konnte, steht außer Frage, dass die haptische Wahrnehmung nicht von minderer Qualität gegenüber der visuellen Wahrnehmung ist. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass haptisches anstatt visuelles Feedback für Eco-Driving genutzt werden kann, um die primären sowie sekundären und tertiären Fahraufgaben zu unterstützen (Griffiths/Gillespie 2005; Lefemine et al. 2008; MacLean 2008). Jedoch ist aufgrund der gefundenen technischen Probleme mit der Smartwatch eine Einschränkung hinsichtlich der primären Fahraufgabe zu beachten. Für zeitkritische Fahraufgaben ist ein Endgerät zu verwenden, das so geringe Latenzzeiten aufweist, dass die primäre Fahraufgabe weiterhin sichergestellt ist. Vorhergehende Forschungen (Richter et al. 2010; Pitts et al. 2012; Domhardt et al. 2013) in Bezug auf haptisches Feedback für Fahraufgaben zeigten positive Ergebnisse. Im Besonderen konnten Fahrer sekundäre Aufgaben effektiver erfüllen und den Blick auf den Straßenverkehr verbessern.

Zwischen den Geschlechtern wurde ein signifikanter Unterschied in den Reaktionszeiten festgestellt. So schnitten männliche Teilnehmer im Durchschnitt mit einer Differenz von ungefähr 100 ms besser ab als Frauen. Warshawsky-Livne/Shinar (2002) stellten in ihren Experimenten einen signifikanten Unterschied zwischen den Geschlechtern in Bezug auf die sensorisch-kognitiven (Wahrnehmungs-)Zeiten fest. Das Fehlen von sensorisch-kognitiver Differenz in Bezug auf die haptische Wahrnehmung zwischen den Geschlechtern wurde in den Arbeiten von Huttunen et al. (1999) und Zumsteg/Wieser (2002) ebenfalls bestätigt. Damit kann der Unter-

schied der sensorisch-kognitiven Zeiten beispielsweise durch physiologische Differenzen zwischen Männern und Frauen erklärt werden. Im Gegensatz zu diesen Erkenntnissen konnte in der Forschung von Montgomery et al. (2014) festgestellt werden, dass weibliche Teilnehmer besser in Stauszenarios handeln, da sie früher auf Kollisionsrisiken reagierten. Stausituationen sind jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit und sind somit in zukünftigen Forschungsarbeiten zu untersuchen.

Weiterhin ist die Probandenanzahl von 35 Personen als gering anzusehen. Des Weiteren sind die Analysen nach Differenzen beispielsweise in der geschlechtsspezifischen Differenzierung mit Vorsicht zu betrachten. Weibliche Personen (13) waren in der Studie unterrepräsentiert. Eine angemessene Probandenanzahl wurde anhand der G\*Power-Analyse (Faul et al. 2007) und Cohen's Alpha (Cohen 1988) ermittelt. Für die minimale statistische Aussagekraft von 0,8 und  $\alpha = 0,05$  beim unabhängigen t-Test werden mindestens 27 oder 294 weibliche Teilnehmer – genauso wie männliche Teilnehmer –, für die erwarteten großen ( $r = 0,8$ ), mittleren, ( $r = 0,5$ ) oder kleinen ( $r = 0,2$ ) Effektgrößen benötigt. Für die nach den Ergebnissen erwarteten Mittelwerte  $M_{\text{männlich}} = 1250$  ( $SD = 150$ ) und  $M_{\text{weiblich}} = 1350$  ( $SD = 150$ ) kann die Effektgröße näher bestimmt werden. Die Effektgröße ist nach Cohen (1988) als stark anzusehen, damit werden 27 weibliche und insgesamt 64 Teilnehmer benötigt. Dadurch wäre eine Übertragbarkeit auf weitere Gruppen möglich. Die G\*Power-Analyse nach Faul et al. (2007) zeigt, dass die Anzahl der Teilnehmer ausreichend ist.

Zusätzlich wurde der Einfluss von Latenz bei verteilten Systemen in Bezug zum haptischen Feedback beim Eco-Driving betrachtet. Es wurde umfassend auf den Effekt der Latenzzeit hinsichtlich der Austauschbarkeit von visuellem und haptischem Feedback eingegangen. Es wird empfohlen, die Auswirkungen von Latenzzeiten auf das Fahrverhalten in zukünftigen Studien zu beachten und zu untersuchen. In der (medizinischen) Studie von Anvari et al. (2005) wurde auf sog. Telepräsenz-Operationen eingegangen, wobei ein signifikanter Einfluss der steigenden Latenzzeit auf den Erfolg der Operation ersichtlich wurde. Weitere Forschung mit Bezug auf den Effekt von haptischen Latenzzeiten für Telepräsenz wurde von Allison et al. (2004) und Shi et al. (2010) durchgeführt. Für zeitkritische Dienste, wie es bei Operationen der Fall ist, sind Latenzzeiten ein entscheidender Parameter, der berücksichtigt werden muss. Beim Eco-Driving-Feedback handelt es sich um eine sekundäre Aufgabe und somit nicht um zeitkritische Fahrmanöver. Letztendlich untermauern die Ergebnisse, dass das visuelle Feedback durch haptische Feedback ersetzt werden kann. Insbesondere ist Eco-Driving nicht zeitkritisch und dementsprechend kann die Smartwatch als Energieverbrauchsfeedback für Eco-Driving verwendet werden.

Die gefundenen Ergebnisse des zweiten Experimentes bestätigen die Austauschbarkeit von visuellem und haptischem Feedback aus dem ersten Experiment. Es liegen keine Verzerrungen durch das haptische Feedback der Smartwatch vor.

#### **13.4.4 Limitationen**

Die Forschungsergebnisse des Reaktionstests unterliegen mehreren Limitationen.

Die Teilnehmer wurden erst mit dem visuellen und dann mit dem haptischen Treatment konfrontiert, sodass die Robustheit des Experiments im Hinblick auf Lerneffekte reduziert ist. Das Problem wird der Ad-hoc-Natur der Teilnehmer-Rekrutierung zugeschrieben. Rückblickend wird angenommen, dass die Entscheidung über das erste Treatment des jeweiligen Probanden durch das Werfen einer Münze zur gleichen Reihung hätte führen können. Die Treatmentvergabe wäre somit vollständig zufällig. Es ist jedoch zu beachten, dass die Treatmentvergabe dadurch nicht zwingenderweise gleichmäßig verteilt gewesen sein muss.

Die Auswahl an Teilnehmern erfolgte unter akademischen Angestellten und Studierenden. Die Gruppe repräsentiert eine Population mit hohem Bildungsgrad. Zusätzlich kommt hinzu, dass dadurch die externe Validität weiter reduziert wird, speziell ist die Interaktion von Selektion und Treatment zu berücksichtigen. Die geringe Repräsentativität der Population des Experimentes führt dazu, dass die Ergebnisse bedingt verallgemeinert werden können. Hier könnte auch die Populationsgröße von 35 eine Limitation darstellen.

Eine weitere Limitation kann die Vergleichbarkeit des visuellen und haptischen Feedbacks darstellen. Beide Feedbacksysteme wurden als äquivalent betrachtet, da sie annäherungsweise denselben Anwendungsfall beschreiben: Beim Erhalten des Feedbacks ist die Bremse für zwei Sekunden zu betätigen. Jedoch unterscheiden sich die Feedbacksysteme in ihrer Komplexität. Das Verarbeiten des visuellen Feedbacks inkludiert eine höhere kognitive Belastung als das haptische. Dabei ist das Unterscheiden von roten Kreuzen und grünen Haken eine anspruchsvollere Aufgabe, als das Erhalten von zwei unterschiedlichen Signalen für zwei verschiedene Aufgaben, welche nicht verglichen werden müssen. Der Effekt wird als Entlastung des visuellen Interaktionskanals verstanden (Jamson/Merat 2005). Allerdings ist dieser Effekt für die Reaktionszeit als solche nicht von Interesse. Jedoch ist er von entscheidender Bedeutung, wenn die visuellen Feedbacksysteme durch haptische ersetzt werden sollen wie Rydström et al. (2009) bestätigen. Weitere zukünftige Forschungen bezüglich der kognitiven Last verschiedener Feedbacksysteme könnten das Thema eingehender analysieren.

Abschließend ist die Korrektheit, der um die Latenz berücksichtigten Reaktionszeiten, zu hinterfragen. Aufgrund von der asymmetrischen Messung der Latenzzeit könnte diese beeinträchtigt worden sein. Der Sendevorgang von der einen Richtung kann beispielsweise *hin* länger gedauert haben als *zurück* und somit wäre keine Symmetrie mehr gegeben. Im Experiment ist angenommen worden, dass symmetrische Latenzzeiten vorliegen. In Folge dessen ist nur die Gesamtzeit der sogenannten „round-trip time“ durch zwei geteilt worden.

## 14 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse dieser Arbeit werden im Folgenden zusammengefasst und kritisch betrachtet. Im Fokus stehen die Interdisziplinarität des Eco-Driving und der geringe Unterschied zwischen den einzelnen Feedbacksystemen. Ferner wird ein Ausblick über mögliche Anknüpfungspunkte für zukünftige Forschung gegeben.

### 14.1 Zusammenfassung

Nach Darlegung der Motivation in Kapitel 1 sind zunächst die Grundlagen in Kapitel 2 erarbeitet worden. Dazu wurden die wesentlichen Forschungsmethoden und Begrifflichkeiten für die Idee dieser Forschungsarbeit eingehender betrachtet.

In Kapitel 3 ist ein Domänenverständnis von ITRs geschaffen worden. Die Ergebnisse der Untersuchung identifizieren vier Arten von Energieverbrauchsfeedbacksystemen: visuelle, haptische, akustische und multimodale. Es gibt zahlreiche Studien zu visuellen Feedbacksystemen. Das herausragende Beispiel ist der Eco-Foot von Jamson et al. (2015a). Haptische Feedbacksysteme sind bisher in der Forschung und Theorie mit dem Gaspedal umgesetzt worden. Als Alternative zum Gaspedal ist eine Smartwatch als näher zu untersuchendes Energieverbrauchsfeedbacksystem identifiziert worden. Akustische Feedbacksysteme sind weniger geeignet, während multimodales Energieverbrauchsfeedback ein Lösungsansatz zur Optimierung von visuellen und haptischen Feedback sein könnte. Energieverbrauchsfeedback stellte sich als komplexes Gefüge heraus, insbesondere durch die fehlenden Grundlagen zur Messung und Aufbereitung für die Implementierung der Feedbacksysteme. Die Analyse der Feedbacksysteme hat ergeben, dass eine Forschungslücke in der Motivation zur Nutzung von Energieverbrauchsfeedbacksystemen besteht.

In Kapitel 4 ist für die Beantwortung der Forschungsfragen ein Fahrsimulatorexperiment entwickelt worden. Für das Experiment wurden drei Arten von Feedback (visuell: Eco-Foot von Jamson et al. (2015a), haptisch: Smartwatch und visuell-haptisch) und zwei Fahrscenarien für motivierte und nicht-motivierte Nutzer von Energieverbrauchsfeedbacksystemen entwickelt.

Zur Implementierung der Feedbacksysteme ist ein eigenes Messmodell für energiebewusstes Fahren in Kapitel 5 entwickelt und validiert worden.

Für die Durchführung des Fahrsimulatorexperiments war es notwendig, in Kapitel 6 eine Energiebewusstseinskala und eine Motivationskala zu entwickeln. Die Analyse der Literatur ergab einen umfangreichen Zusammenhang zwischen der Psychologie und ihrer Entwicklung mit den Theorien aus der Wirtschaftsinformatik (s. Abschnitt 6.2.4, Abbildung 32).

Anschließend ist die Umsetzbarkeit im Fahrsimulator in Kapitel 7 in zwei Aspekten geprüft worden: das entwickelte Messmodell für energiebewusstes Fahren und die Verwendungsmöglichkeit der Fahrsimulationssoftware OpenDS zur Messung des Energieverbrauchs.

In Kapitel 8 wurden in einer umfangreichen Analyse Fahrzyklen auf ihre Tauglichkeit für ein Fahrsimulatorexperiment überprüft. Die Analyse führt zu einem modifizierten NEFZ mit einer

erhöhten Varianz im Energieverbrauch. Der modifizierte NEFZ wurde als Fahrscene für die Messung des Energieverbrauchs als abhängige Variable in den Experimenten implementiert.

In Kapitel 9 sind für das Experiment die Energieverbrauchsfeedbacksysteme implementiert worden: ein visuelles in Anlehnung an den Eco-Foot von Jamson et al. (2015a) und ein haptisches, welches mit einer Smartwatch arbeitete.

In Kapitel 10 ist ein Pretest durchgeführt worden. Das Ergebnis aus Abschnitt 10.1.2 zeigt, dass die Signalverarbeitung abhängig vom Modell der Smartwatch ist.

Die Analyse des Pretests ergab, dass das Experiment in Kapitel 11 durchgeführt werden kann.

Kapitel 12 analysiert die Ergebnisse des Experiments. Die Ergebnisse des Abschnittes 12.1.1 zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Fahrscenarien auf. Das Energiebewusstsein erwies sich als ein entscheidender Einflussfaktor. Die Analyse hat ergeben, dass je höher das Energiebewusstsein ist, desto geringer ist der Energieverbrauch. Der Effekt wirkt sich in einem Fahrscenario mit niedrigem Energieverbrauch gegenüber einem mit hohem Energieverbrauch stärker aus. Nicht erwarteter Weise führte eine hohe Motivation beim Fahrscenario „Familie“ zu einem erhöhten Verbrauch, während sie im Fahrscenario „Pendler“ zu einer Verringerung des Energieverbrauchs führte. Die Motivation, Energieverbrauchsfeedbacksysteme zu nutzen, ist somit dem Energiebewusstsein untergeordnet. Ferner zeigte die Studie in Unterabschnitt 12.1.2.1, dass im Fahrscenario „Pendler“, welches keine Nutzung des Energieverbrauchsfeedbacksystems implizierte, ein Mehrverbrauch an Energie festgestellt werden konnte, während im Fahrscenario „Familie“ mit Energieverbrauchsfeedbacksystemen eine Einsparung an Energie erzielt werden konnte. Motivierte Nutzer erzielen im Vergleich zu nicht-motivierten Nutzern durch Feedbacksysteme eine Einsparung an Energie. Dabei ist kein Unterschied in Bezug auf das Energiebewusstsein festzustellen. Im Gegensatz zu bisherigen Forschungsarbeiten zeigt die Analyse, dass der Kontext eine stärkere Rolle als die Feedbacksysteme als solche spielt. Im Fahrscenario „Familie“ wies die Auswertung der Feedbacksysteme in Unterabschnitt 12.1.2.2 ebenfalls keinen Unterschied auf. Jedoch führten alle Energieverbrauchsfeedbacksysteme zu einem geringeren Energieverbrauch gegenüber der gemittelten Baseline. Die Evaluation belegt, dass die Art des Feedbacksystems in den jeweiligen Fahrscenarien keinen signifikanten Unterschied macht. Es ist festzuhalten, dass eine Smartwatch ein visuelles Feedbacksysteme ersetzen könnte, um die Konzentration auf der primären Fahraufgabe zu belassen. Die Ergebnisse aus Abschnitt 12.2.5 zeigen einen signifikanten Einfluss der Fahrerfahrung dahingehend, dass mit zunehmender Nutzung des Fahrzeugs eine Energieverbrauchsanzeige eine geringere Nutzung erfährt. Die Fahrerfahrung führte zu einer Routinehandlung und einer geringeren Einsparung an Energie gegenüber einer häufigen Nutzung des Energieverbrauchsfeedbacksystems bei einer relativ geringeren Fahrzeugnutzung.

Die Überprüfung des verteilten haptischen Feedbacksystems in Kapitel 13 wies keine signifikanten Unterschiede auf. Die Analyse bestätigt zum einen die gefundenen Ergebnisse des ersten Experiments in den Fahrscenarien (s. Abschnittes 12.1.1) und zum anderen untermauert es, dass die Smartwatch geeignet ist, das visuelle Feedback zu ersetzen.

## 14.2 Relevanz der Ergebnisse und Forschungsbedarf

Die gewählte Thematik in der Wirtschaftsinformatik im Sinne von Mensch-Maschine-Interaktion, erwies sich als interdisziplinär. So war eine sehr tiefe Einarbeitung in Kenntnisse der Psychologie erforderlich, um die Motivation von Menschen eingehender zu verstehen. Ebenso waren Kenntnisse der Ingenieurwissenschaften, speziell des Maschinenbaus, erforderlich. Die einzelnen Gebiete sind für sich bereits vielschichtig, sodass im Ganzen eine hohe Komplexität der Thematik zugrunde liegt, welche umfassend hier beschrieben wurde. Die vorgestellten Ergebnisse wären durch eine eingehende Analyse mit anderen Disziplinen zu überprüfen. Insbesondere das Erhebungsinstrument und Messmodell.

Die Ergebnisse zeigen, dass das entwickelte Messmodell für energiebewusstes Fahren eine Einteilung in motivierte und nicht-motivierte Nutzer ermöglicht. Vor dem Hintergrund, dass fünf Experten aus der Forschung das Messmodell validiert haben, sollten die Ergebnisse jedoch nur sehr bedacht auf andere Bereiche übertragen werden; hier zeigt sich ein reichhaltiges Potenzial für zukünftige Studien, die darauf abzielen könnten, die aufgefundenen Zusammenhänge in der Praxis zu bekräftigen. Außerdem ist die Dimension des antizipativen Fahrens im Kontext des autonomen Fahrens zu betrachten. Zusätzlich könnten die Experimente mit älteren Probanden durchgeführt werden, um die Validität und die Robustheit der Ergebnisse weiter zu stärken.

Das entwickelte Erhebungsinstrument stellt eine Grundlage zur Messung des Energiebewusstseins dar. Durch weitere Forschungen, insbesondere auf dem Gebiet der Psychologie, könnten die Komponenten des Messmodells weiter geschärft werden, um noch qualifiziertere Aussagen treffen zu können und die Validität zu erhöhen. Auch zielt die EFA in Kombination mit der PCA nur auf eine Reduzierung der Komponenten ab, während eine Hauptachsenanalyse stärker auf die Zusammenhänge der einzelnen Faktoren eingehen würde (Bühner 2012, 313 ff.).

Die Ergebnisse aus Kapitel 12 weisen bei einem erheblichen Aufwand nur einen geringen Einfluss auf den Verbrauch auf. Zwischen den Feedbackarten konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Die Effektgröße zeigt, dass der Einfluss von Energieverbrauchsfeedbacksystemen so schwach ist, dass die Automatisierung die Herausforderungen für eine energieeffizientere Fahrweise beherrscht und somit lösen kann.

Ferner ergibt sich ein Forschungsbedarf über energieeffizientes autonomes Fahren. Als Basis kann das hier entwickelte Messmodell für den Energieverbrauch dienen. Zusätzlich kann die Thematik des antizipativen Fahrens einbezogen werden, beispielsweise durch Sensordaten oder Fahrzeugdaten im Bereich der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation, um intelligente Systeme zu entwickeln, welche eine nachhaltigere Fahrweise zulassen.

Des Weiteren könnte der Aspekt der Automatisierung noch eingehender untersucht werden, insbesondere hinsichtlich einer automatisierten, energieeffizienten Fahrweise. Diese Technik könnte zu ganz neuen Feedbacksystemen führen.

Zur Erweiterung des Reifegrades der hier vorgestellten Ergebnisse ließen sich weitere Fahrscenarien analysieren. In Verbindung mit den Fahrscenarien könnten Feedbacksysteme mit unterschiedlichen Darstellungsarten ein energieeffizientes Fahren ermöglichen. Insbesondere könnte

geprüft werden, wann Feedback sinnvoll ist, d. h., wann die Varianz in der Energieeffizienz am größten ist. Die hier vorgestellten Ergebnisse belegen bereits, dass die untersuchten Fahrszenarien unterschiedliche Ausprägungen besitzen. Energieeffizientes Fahren im Berufsverkehr könnte eine besondere Rolle spielen. Zur Erhöhung der Varianz könnten zukünftige Forschungsarbeiten speziell auf Berufskraftfahrer (Bus, LKW) ausgerichtet sein. Busfahrer im städtischen Bereich sind ständig der Situation von Beschleunigen und Bremsen ausgesetzt. Der Energieverbrauch ist allein bedingt durch die größere Masse und den entsprechenden Motor deutlich höher als beim PKW, jedoch auch der Verschleiß, welcher durch das nicht notwendige Bremsen entsteht. Eine energieeffizientere Fahrweise könnte somit bei Bussen nicht nur die Kosten minimieren, sondern auch zu einer geringeren Lärmemission und möglicherweise zu einem erhöhten Kundenkomfort führen. Zusätzlich ließen sich die Erkenntnisse durch weitere Untersuchungen in einem Feldtest um die externe Validität ergänzen.

Die Erkenntnisse dieser Arbeit zeigen, dass die visuellen Feedbacksysteme von Elektrofahrzeugen deutlich komplexer sind als die von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren. Aufgrund dieser Unterschiede von Elektrofahrzeugen und Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor ließen sich weiterführende Forschungsfragen entwickeln. Zukünftige Entwicklungen müssen in der Lage sein, ein Energieverbrauchsfeedback zu ermöglichen, das präzisere Restreichweiten berechnet und dem Fahrer zur Verfügung stellt.

Außerdem könnte die Forschung um Langzeitstudien in zweierlei Hinsicht weiterentwickelt werden. Die Technik der Fahrzeuge wandelt sich stetig weiter, somit wäre zum einen von Forschungsinteresse der Vergleich der (jungen) Teilnehmer an diesem Experiment zu ihrem Verhalten in (älteren) 10, 20 oder 30 Jahren. Zum anderen was die Beweggründe einer möglichen Veränderung oder nicht Veränderung sind. Andererseits stellt sich die Frage, inwiefern sich Energieverbrauchsfeedback langfristig auswirkt. Hier konnte bereits eine Basis geschaffen werden, so führt die Fahrerfahrung zu einer Abnahme in der Verwendung von Energieverbrauchsfeedback; hier könnte eine Langzeitstudie Erkenntnisse dahingehend erbringen, dass sich dieser Effekt möglicherweise weiter verstärkt.

Die hier vorgestellten Ergebnisse könnten um Stausituationen erweitert werden. Montgomery et al. (2014) stellten im Zusammenhang mit Stausituationen geschlechtsspezifisches Verhalten fest. In dieser Arbeit konnten geschlechtsspezifische Unterschiede nur bedingt ausgewertet werden. Geschlechterspezifische Unterschiede in den einzelnen Fahrszenarien stellen eine Erweiterung dar, welche zu verschiedenen Darstellungen Informationen mittels Feedback oder Feedbackarten führen könnte.

Die gewonnenen Erkenntnisse zur Latenzzeit ließen sich durch weitere Untersuchungen im Bereich der Benutzerakzeptanz oder des Sekundenschlafs ergänzen. Insbesondere der Sekundenschlaf ist im Hinblick auf die Latenz zu untersuchen. Ein solches Feedbacksystem könnte die Verkehrssicherheit erhöhen und eine weitere Dienstleistungen wie besondere Versicherungstarife ermöglichen.

Insgesamt ist festzustellen, dass über die gewonnenen Erkenntnisse dieser Arbeit hinaus ein erheblicher, weiterer Forschungsbedarf vorhanden ist.

## Literaturverzeichnis

- Abbink, D.A. (2006):** Neuromuscular Analysis of Haptic Gas Pedal Feedback during Car Following. Dissertation, Technische Universiteit Delft, 2006.
- Ablaßmeier, M.; Poitschke, T.; Wallhoff, F.; Bengler, K.; Rigoll, G. (2007):** Eye Gaze Studies Comparing Head-Up and Head-Down Displays in Vehicles. Vorgestellt in: IEEE International Conference on Multimedia and Expo, Beijing, China, S. 2250-2252.
- ADAC (2015a):** Begleitetes Fahren ab 17. <https://www.adac.de/infotestrat/ratgeber-verkehr/fuehrerschein/begleitetes-fahren/default.aspx>, zugegriffen am 09.09.2015.
- ADAC (2015b):** Tempolimits in Europa 2015. [https://www.adac.de/mmm/pdf/Tempolimits%20in%20Europa%202015\\_241150.pdf](https://www.adac.de/mmm/pdf/Tempolimits%20in%20Europa%202015_241150.pdf), zugegriffen am 30.06.2017.
- Adams, D.; Nelson, R.; Todd, P. (1992):** Perceived Usefulness, Ease of Use and Usage of Information Technology: A Replication. In: MIS Quarterly, Jg. 16 (1992) Nr. 2, S. 227-247.
- Adams, J.S. (1963):** Toward an Understanding of Inequity. In: Journal of Abnormal and Social Psychology, Jg. 67 (1963) Nr. 5, S. 14.
- Adams, J.S.; Rosenbaum, W.B. (1962):** The Relationship of Worker Productivity to Cognitive Dissonance About Wage Inequities. In: Journal of Applied Psychology, Jg. 46 (1962), S. 161-164.
- Adell, E. (2007):** Drivers' Evaluations of the Active Accelerator Pedal in a Real-life Trial. In: IATSS Research, Jg. 31 (2007) Nr. 1, S. 89-99.
- Adell, E.; Várhelyi, A. (2008):** Driver Comprehension and Acceptance of the Active Accelerator Pedal after Long-term Use. In: Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, Jg. 11 (2008) Nr. 1, S. 37-51.
- Adell, E.; Várhelyi, A.; Hjälmdahl, M. (2008):** Auditory and Haptic Systems for In-Car Speed Management: A Comparative Real Life Study. In: Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, Jg. 11 (2008) Nr. 6, S. 445-458.
- Agarwal, R.; Karahanna, E. (2000):** Time Flies When You're Having Fun: Cognitive Absorption and Beliefs About Information Technology Usage. In: MIS Quarterly, Jg. 24 (2000) Nr. 4, S. 665-694.
- AIS (2011):** Senior Scholars' Basket of Journals. <http://aisnet.org/?SeniorScholarBasket>, zugegriffen am 12.06.2015.
- Ajzen, I. (1991):** The Theory of Planned Behavior. In: Organizational Behavior and Human Decision Processes, Jg. 50 (1991) Nr. 2, S. 179-211.
- Ajzen, I. (2005):** Attitudes, Personality and Behavior (Band 2), Open Univ. Press, Maidenhead [u. a.], England 2005.
- Ajzen, I.; Driver, B.L. (1992):** Application of the Theory of Planned Behavior to Leisure Choice. In: Journal of Leisure Research, Jg. 24 (1992) Nr. 3, S. 207-224.
- Ajzen, I.; Fishbein, M. (1975):** Belief, Attitude, Intention and Behavior: An Introduction to Theory and Research, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, USA 1975.
- Ajzen, I.; Fishbein, M. (1977):** Attitude-Behavior Relations: A Theoretical Analysis and Review of Empirical Research. In: Psychological Bulletin, Jg. 84 (1977) Nr. 5, S. 888-918.
- Al-Harby, F.; Qahwaji, R.; Kamala, M. (2010):** Users' Acceptance of Secure Biometrics Authentication System: Reliability and Validate of an Extended UTAUT Model. In: *Communications in Computer and Information Science* Band 87, S. 254-258, Prag, Tschechien: Springer-Verlag.
- Alderfer, C.P. (1969):** An Empirical Test of a New Theory of Human Needs. In: Organizational Behavior and Human Performance, Jg. 4 (1969) Nr. 1, S. 3.
- Allianz (2016):** Telematik-Versicherung: Besonders junge Fahrer profitieren. [https://www.allianz.de/auto/kfz-versicherung/telematik-versicherung/?AZMEDID=Koop\\_PR-KFZ.Versicherung\\_KA-NN\\_PA-AllianzDeutschland.de\\_VT-Pressartikel](https://www.allianz.de/auto/kfz-versicherung/telematik-versicherung/?AZMEDID=Koop_PR-KFZ.Versicherung_KA-NN_PA-AllianzDeutschland.de_VT-Pressartikel), zugegriffen am 08.11.2016.
- Allianz Deutschland (2016):** Geld zurück für sicheres Autofahren. [https://www.allianzdeutschland.de/wer-gut-auto-faehrt-bekommt-geld-zurueck/id\\_77469302/index](https://www.allianzdeutschland.de/wer-gut-auto-faehrt-bekommt-geld-zurueck/id_77469302/index), zugegriffen am 08.11.2016.
- Allison, R.S.; Zacher, J.E.; Wang, D.; Shu, J. (2004):** Effects of Network Delay on a Collaborative Motor Task with Telehaptic and Televisual Feedback. In: *Proceedings of*

- the 2004 ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual Reality Continuum and its Applications in Industry*, S. 375-381, Singapore: ACM.
- Alpern, M.; Minardo, K. (2003):** Developing a Car Gesture Interface for Use as a Secondary Task. Vorgestellt in: Proceedings of the CHI '03 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, Ft. Lauderdale, Florida, USA, S. 932-933.
- Álvarez, A.D.; Garcia, F.S.; Naranjo, J.E.; Anaya, J.J.; Jiménez, F. (2014):** Modeling the Driving Behavior of Electric Vehicles Using Smartphones and Neural Networks. In: Intelligent Transportation Systems Magazine, IEEE, Jg. 6 (2014) Nr. 3, S. 44-53.
- Amabile, T.M.; Hill, K.G.; Hennessey, B.A.; Tighe, E.M. (1994):** The Work Preference Inventory: Assessing Intrinsic and Extrinsic Motivational Orientations. In: Journal of Personality and Social Psychology, Jg. 66 (1994) Nr. 5, S. 950-967.
- Amann, C. (2012):** Stichwort: Earcon. <http://filmlexikon.uni-kiel.de/index.php?action=lexikon&tag=det&id=6051>, zugegriffen am 02.02.2017.
- American Honda Motor Company (2008):** Honda Insight to Introduce Ecological Drive Assist System in Spring 2009: Driver feedback system designed for fun and economy. <http://news.honda.com/newsandviews/article.aspx?id=4878-en>, zugegriffen am 23.11.2016.
- Ammons, R.B. (1956):** Effects of Knowledge of Performance: A Survey and Tentative Theoretical Formulation. In: Journal of General Psychology, Jg. 54 (1956), S. 279-299.
- Ando, R.; Nishihori, Y. (2011):** How Does Driving Behavior Change When Following an Eco-Driving Car? In: Procedia-Social and Behavioral Sciences, Jg. 20 (2011), S. 577-587.
- André, M. (2004):** The ARTEMIS European Driving Cycles for Measuring Car Pollutant Emissions. In: Science of The Total Environment, Jg. 334-335 (2004), S. 73-84.
- Andrieu, C.; Saint Pierre, G. (2014):** Evaluation of Ecodriving Performances and Teaching Method: Comparing Training and Simple Advice. In: EJTIR, Jg. 14 (2014) Nr. 3, S. 201-213.
- Anvari, M.; Broderick, T.; Stein, H.; Chapman, T.; Ghodoussi, M.; Birch, D.W.; McKinley, C.; Trudeau, P.; Dutta, S.; Goldsmith, C.H. (2005):** The impact of latency on surgical precision and task completion during robotic-assisted remote telepresence surgery. In: Computer Aided Surgery, Jg. 10 (2005) Nr. 2, S. 93-99.
- Argyle, M.; Salter, V.; Nicholson, H.; Williams, M.; Burgess, P. (1970):** The Communication of Inferior and Superior Attitudes by Verbal and Non-verbal Signals. In: British Journal of Social and Clinical Psychology, Jg. 9 (1970) Nr. 3, S. 222-231.
- Arnd, M. (2013):** Sustainable Transport In China. <http://sustainabletransport.org/eco-driving-day/>, zugegriffen am 24.07.2015.
- Ashford, B.; Mael, F. (1989):** Social Identity Theory and the Organization. In: Academy of Management Review, Jg. 14 (1989), S. 20-39.
- Atkinson, J.W. (1957):** Motivational Determinants of Risk-Taking Behavior. In: Psychological Review, Jg. 64 (1957) Nr. 6, S. 359-372.
- Austin, T.C.; Hellmann, K.H.; Paulsell, C.D. (1974):** Passenger Car Fuel Economy During Non-Urban Driving (SAE Technical Paper 740592). Society of Automotive Engineers, 1974.
- Azzi, S.; Reymond, G.; Mérienne, F.; Kemeny, A. (2011):** Eco-Driving Performance Assessment with In-Car Visual and Haptic Feedback Assistance. In: Journal of Computing and Information Science in Engineering, Jg. 11 (2011) Nr. 4, S. 181-190.
- Baard, P.P.; Deci, E.L.; Ryan, R.M. (2004):** Intrinsic Need Satisfaction: A Motivational Basis of Performance and Well-Being in Two Work Settings. In: Journal of Applied Social Psychology, Jg. 34 (2004), S. 2045-2068.
- Baayen, R.H.; Milin, P. (2015):** Analyzing reaction times. In: International Journal of Psychological Research, Jg. 3 (2015) Nr. 2, S. 12-28.
- Bagozzi, R.P. (2007):** The legacy of the technology acceptance model and a proposal for a paradigm shift. In: Journal of the association for information systems, Jg. 8 (2007) Nr. 4, S. 3.
- Bagozzi, R.P.; Davis, F.D.; Warshaw, P.R. (1992):** Development and Test of a Theory of Technological Learning and Usage. In: Human Relations, Jg. 45 (1992) Nr. 7, S. 659-686.
- Bakeman, R. (2005):** Recommended Effect Size Statistics for Repeated Measures Designs. In: Behavior Research Methods, Jg. 37 (2005) Nr. 3, S. 379-384.

- Bandura, A. (1977):** Self-Efficacy: Toward a Unifying Theory of Behavioral Change. In: *Psychological Review*, Jg. 84 (1977) Nr. 2, S. 191-215.
- Bandura, A. (1986):** *Social Foundations of Thought and Action: A Social Cognitive Theory*, Prentice-Hall, Michigan, USA 1986.
- Bandura, A. (1999):** Social Cognitive Theory: An Agentic Perspective. In: *Asian Journal of Social Psychology*, Jg. 2 (1999), S. 21-41.
- Bandura, A.; Cervone, D. (1986):** Differential Engagement of Self-Reactive Influences in Cognitive Motivation. In: *Organizational Behavior and Human Decision processes*, Jg. 38 (1986) Nr. 1, S. 92-113.
- Bång, M.; Svahn, M.; Gustafsson, A. (2009):** Persuasive Design of a Mobile Energy Conservation Game with Direct Feedback and Social Cues. In: *Proceedings of the 2009 DiGRA International Conference: Breaking New Ground: Innovation in Games, Play, Practice and Theory*, Jg. 5 (2009).
- Barbé, J.; Boy, G. (2006):** On-Board System Design to Optimise Energy Management. Vorgestellt in: *Proceedings of the European Annual Conference on Human Decision-Making and Manual Control (EAM 2006)*, Valenciennes, France.
- Barbé, J.; Boy, G.; Sans, M. (2007):** GERICO: A Human Centered Eco-Driving System. Vorgestellt in: *Proceedings of the 10th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems*, Seoul, Korea, S. 292-297.
- Barbuto, J.E. (2001a):** An Alternative Scoring Method for the Motivation Sources Inventory: A Case for Ratio Analysis. In: *Psychological Reports*, Jg. 88 (2001a) Nr. 2, S. 385-386.
- Barbuto, J.E. (2001b):** Testing the Underlying Motives of Organizational Citizenship Behaviors: A Field Study of Agricultural Co-Op Workers. In: *28th Annual National Agricultural Education Research Conference*, S. 539-553.
- Barbuto, J.E. (2005):** Motivation and Transactional, Charismatic, and Transformational Leadership - A Test of Antecedents. In: *Journal of Leadership and Organizational Studies*, Jg. 11 (2005) Nr. 4, S. 27-40.
- Barbuto, J.E.; Fritz, S.M.; Plummer, B.A. (2003):** Sex Differences Among Five Sources of Motivation in the Motivation Sources Inventory. In: *Psychological Reports*, Jg. 93 (2003) Nr. 1, S. 47-48.
- Barbuto, J.E.; Gifford, G.T. (2007):** Sources of Work Motivation of Business Leaders in the USA and South Africa: A Cross-Cultural Comparison Using the Motivational Sources Inventory. In: *Psychological Reports*, Jg. 101 (2007) Nr. 1, S. 636-640.
- Barbuto, J.E.; Scholl, R.W. (1998):** Motivation Sources Inventory: Development and Validation of New Scales to Measure an Integrative Taxonomy of Motivation. In: *Psychological Reports*, Jg. 82 (1998), S. 1011-1022.
- Barbuto, J.E.; Story, J.S. (2008):** Relations Between Locus of Control and Sources of Work Motivation Amongst Government Workers. In: *Psychological Reports*, Jg. 102 (2008) Nr. 1, S. 335-8.
- Barbuto, J.E.; Trout, S.K.; Brown, L.L. (2004):** Identifying Sources of Motivation of Adult Rural Workers. In: *Journal of Agricultural Education*, Jg. 45 (2004), S. 11-21.
- Barbuto, J.E.; Weltmer, D.F.; Pennisi, L.A. (2010):** Locus of Control, Sources of Motivation, and Mental Boundaries as Antecedents of Leader-Member Exchange Quality. In: *Psychological Reports*, Jg. 106 (2010) Nr. 1, S. 175-188.
- Barbuto, J.E.; Xu, Y. (2006):** Sources of Motivation, Interpersonal Conflict Management Styles, and Leadership Effectiveness: A Structural Model. In: *Psychological Reports*, Jg. 93 (2006) Nr. 1, S. 3-20.
- Barić, D.; Zovak, G.; Periša, M. (2013):** Effects of Eco-Drive Education on the Reduction of Fuel Consumption and CO2 Emissions. In: *PROMET-Traffic&Transportation*, Jg. 25 (2013) Nr. 3, S. 265-272.
- Barkenbus, J.N. (2010):** Eco-Driving: An Overlooked Climate Change Initiative. In: *Energy Policy*, Jg. 38 (2010) Nr. 2, S. 762-769.
- Barnard, C.I. (1938):** *The Functions of the Executive (Band 30. Anniversary)*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, USA 1938.
- Barth, M.; Boriboonsomsin, K. (2009):** Energy and Emissions Impacts of a Freeway-Based Dynamic Eco-Driving System. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Jg. 14 (2009) Nr. 6, S. 400-410.

- Bauer, M.; Oostenveld, R.; Fries, P. (2009):** Tactile Stimulation Accelerates Behavioral Responses to Visual Stimuli through Enhancement of Occipital Gamma-Band Activity. In: *Vision research*, Jg. 49 (2009) Nr. 9, S. 931-942.
- Baumgartner, H.; Homburg, C. (1996):** Applications of Structural Equation Modeling in Marketing and Consumer Research: A Review. In: *International Journal of Research in Marketing*, Jg. 13 (1996) Nr. 2, S. 139-161.
- Beale, D.; Manstead, A. (1991):** Predicting Mothers' Intentions to Limit Frequency of Infants' Sugar Intake: Testing the Theory of Planned Behavior. In: *Journal of Applied Social Psychology*, Jg. 21 (1991), S. 409-431.
- Beck, K.; Beedle, M.; van Bennekum, A.; Cockburn, A.; Cunningham, W.; Fowler, M.; Grenning, J.; Highsmith, J.; Hunt, A.; Jeffries, R.; Kern, J.; Marick, B.; Martin, R.; Mallor, S.; Shwaber, K.; Sutherland, J. (2001a):** The Agile Manifesto. <http://www.agilemanifesto.org/>, zugegriffen am 16.12.2017.
- Beck, K.; Beedle, M.; van Bennekum, A.; Cockburn, A.; Cunningham, W.; Fowler, M.; Grenning, J.; Highsmith, J.; Hunt, A.; Jeffries, R.; Kern, J.; Marick, B.; Martin, R.; Mallor, S.; Shwaber, K.; Sutherland, J. (2001b):** Principles behind the Agile Manifesto. <http://www.agilemanifesto.org/principles.html>, zugegriffen am 16.12.2017.
- Becker, F. (o. J.,-a):** Empirische Inhaltstheorien der Motivation: McClellands Theorie. <http://www.wpgs.de/content/view/576/368/>, zugegriffen am 02.03.2017.
- Becker, F. (o. J.,-b):** Inhaltstheorien der Motivation. <http://www.wpgs.de/content/view/583/368/>, zugegriffen am 02.03.2017.
- Becker, L.J. (1978):** Joint Effect of Feedback and Goal Setting on Performance: A Field Study of Residential Energy Conservation. In: *Journal of Applied Psychology*, Jg. 63 (1978) Nr. 4, S. 428-433.
- Behrend, T.S.; Wiebe, E.N.; London, J.E.; Johnson, E.C. (2011):** Cloud Computing Adoption and Usage in Community Colleges. In: *Behaviour & Information Technology*, Jg. 30 (2011) Nr. 2, S. 231-240.
- Belkin (2015):** WeMo® Insight Switch. <http://www.belkin.com/de/F7C029-Belkin/p/P-F7C029/>, zugegriffen am 09.09.2015.
- Benbasat, I.; Barki, H. (2007):** Quo vadis TAM? In: *Journal of the Association for Information Systems*, Jg. 8 (2007) Nr. 4, S. 7.
- Benbasat, I.; Todd, P. (1993):** An Experimental Investigation of Interface Design Alternatives: Icon vs. Text and Direct Manipulation vs. Menus. In: *International Journal of Man-Machine Studies*, Jg. 38 (1993) Nr. 3, S. 369-402.
- Benesty, J.; Chen, J.; Huang, Y.; Cohen, I. (2009):** *Pearson Correlation Coefficient*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin 2009.
- Beusen, B.; Broekx, S.; Denys, T.; Beckx, C.; Degraeuwe, B.; Gijssbers, M.; Scheepers, K.; Govaerts, L.; Torfs, R.; Panis, L.I. (2009):** Using On-Board Logging Devices to Study the Longer-Term Impact of an Eco-Driving Course. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Jg. 14 (2009) Nr. 7, S. 514-520.
- Bhattacharjee, A. (2001):** An Empirical Analysis of the Antecedents of Electronic Commerce Service Continuance. In: *Decision Support Systems*, Jg. 32 (2001) Nr. 2, S. 201-214.
- Bilodeau, E.A.; Bilodeau, I.M. (1961):** Motor-Skills Learning. In: *Annual Review of Psychology*, Jg. 12 (1961), S. 243-280.
- Bingham, C.; Walsh, C.; Carroll, S. (2012):** Impact of Driving Characteristics on Electric Vehicle Energy Consumption and Range. In: *IET Intelligent Transport Systems*, Jg. 6 (2012) Nr. 1, S. 29-35.
- Birrell, S.A.; Fowkes, M. (2014):** Glance Behaviours When Using an In-Vehicle Smart Driving Aid: A Real-World, On-Road Driving Study. In: *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Jg. 22 (2014), S. 113-125.
- Birrell, S.A.; McGordon, A.; Jennings, P.A. (2014):** Defining the Accuracy of Real-world Range Estimations of an Electric Vehicle. Vorgelegt in: 17th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Qingdao, China, S. 2590-2595.
- Birrell, S.A.; Young, M.S. (2009):** Smart Driving Aids and Their Effects on Driving Performance and Driver Distraction. In: *1st International Conference on Driver Distraction and Inattention*, S. 1-16, Gothenburg, Sweden.
- Birrell, S.A.; Young, M.S. (2013):** Smart Driving Assistance Systems: Designing and Evaluating Ecological and Conventional Displays. In: *Driver Distraction and*

- Inattention: Advances in Research and Countermeasures (Band 1). Regan, M.A.; Lee, J.D.; Victor, T.W. (Hrsg.). Ashgate, Aldershot, UK 2013, S. 373-388.
- Birrell, S.A.; Young, M.S.; Weldon, A.M. (2010):** Delivering Smart Driving Feedback Through a Haptic Pedal. Vorgestellt in: Proceedings of the International Conference on Contemporary Ergonomics and Human Factors 2010, S. 431-439.
- Birrell, S.A.; Young, M.S.; Weldon, A.M. (2013):** Vibrotactile Pedals: Provision of Haptic Feedback to Support Economical Driving. In: Ergonomics, Jg. 56 (2013) Nr. 2, S. 282–292.
- Black, A.E.; Deci, E.L. (2000):** The Effects of Instructors' autonomy Support and Students' Autonomous Motivation on Learning Organic Chemistry: A Self-Determination Theory Perspective. In: Science Education, Jg. 84 (2000), S. 740-756.
- Blanco, M.; Biever, W.J.; Gallagher, J.P.; Dingus, T.A. (2006):** The Impact of Secondary Task Cognitive Processing Demand on Driving Performance. In: Accident Analysis & Prevention, Jg. 38 (2006) Nr. 5, S. 895–906.
- Bliemel, F.; Eggert, A.; Fassott, G.; Henseler, J. (2005):** Handbuch PLS-Pfadmodellierung: Methode, Anwendung, Praxisbeispiele, Schäffer-Poeschel 2005.
- BMW (2017):** Dynamik und Effizienz im Einklang: Die BMW TwinPower Turbomotoren im BMW 4er Coupé.  
<http://www.bmw.de/de/neufahrzeuge/4/coupe/2013/motoren.html>, zugegriffen am 21.02.2017.
- BMW i Kundenbetreuung (2015):** Anzeige von Fahrverhalten im BMW i3. Interviewer: Burek, M., E-Mail, 06.08.2015.
- Boesche, K.V.; Franz, O.; Fest, C.; Gaul, A.J. (2013):** Berliner Handbuch zur Elektromobilität, München 2013.
- Boissonneault, E.; Godin, G. (1990):** The Prediction of Intention to Smoke Only in Designated Work Site Areas. In: J Occup Med, Jg. 22 (1990), S. 253-74.
- Bollen, K.A.; Stine, R.A. (1992):** Bootstrapping Goodness-of-Fit Measures in Structural Equation Models. In: Sociological Methods & Research, Jg. 21 (1992) Nr. 2, S. 205-229.
- Boriboonsomsin, K.; Vu, A.; Barth, M. (2010):** Eco-Driving: Pilot Evaluation of Driving Behavior Changes Among US Drivers. UC Berkley, 2010.
- Bortz, J.; Döring, N. (2003):** Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler. (Aufl. 3), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2003.
- Bortz, J.; Schuster, C. (2010):** Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler. (Aufl. 7, vollständige überarbeitete und erweiterte Auflage), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 2010.
- Bostic, T.J.; Rubio, D.M.; Hood, M. (2000):** A Validation of the Subjective Vitality Scale Using Structural Equation Modeling. In: Social Indicators Research, Jg. 52 (2000), S. 313-324.
- Boyd, B.; Wandersman, A. (1991):** Predicting Undergraduate Condom Use with the Fishbein and Ajzen and the Triandis Attitude-Behavior Models: Implications for Public Health Interventions. In: Journal of Applied Social Psychology, Jg. 21 (1991) Nr. 22, S. 1810-1830.
- Brown, S.A.; Dennis, A.R.; Venkatesh, V. (2010):** Predicting Collaboration Technology Use: Integrating Technology Adoption and Collaboration Research. In: Journal of Management Information Systems, Jg. 27 (2010) Nr. 2, S. 9-53.
- Brug, J.; Lechner, L.; De Vries, H. (1995):** Psychosocial Determinants of Fruit and Vegetable Consumption. In: Appetite, Jg. 25 (1995) Nr. 3, S. 285-296.
- Bühner, M. (2012):** Einführung in die Test- und Fragebogenkonstruktion. (Aufl. 3rd), Pearson Studium, Munich, Germany 2012.
- Bundesinstitut für Bau-, S.-u.R. (2017):** Immer mehr Menschen pendeln zur Arbeit.  
<http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Home/Topthemen/2017-pendeln.html>, zugegriffen am 11.04.2017.
- Bureau, J.; Mageau, G.A. (2014):** Parental Autonomy Support and Honesty: The Mediating Role of Identification With the Honesty Value and Perceived Costs and Benefits of Honesty. In: Journal of Adolescence, Jg. 37 (2014) Nr. 3, S. 225-236.
- Burns, P.; Belluz, L.; Belzile, M.; Battista, V.; Pedroso, S.; Knowles, J.; Gill, V.; Crispim, C. (2015):** Influence of In-vehicle Displays on Driver Behaviour. Vorgestellt in:

- Adjunct Proceedings of the 7th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, S. 146-151.
- Butler, R.A.; Harlow, H.F. (1954):** Persistence of Visual Exploration in Monkeys. In: Journal of Comparative and Physiological Psychology, Jg. 47 (1954), S. 258-263.
- Calder, B.J.; Staw, B.M. (1975a):** The Interaction of Intrinsic and Extrinsic Motivation: Some Methodological Notes. In: Journal of Personality and Social Psychology, Jg. 31 (1975a) Nr. 76-80.
- Calder, B.J.; Staw, B.M. (1975b):** Self-Perception of Intrinsic and Extrinsic Motivation. In: Journal of Personality and Social Psychology, Jg. 31 (1975b), S. 599-605.
- Cao, Y.; Van Der Sluis, F.; Theune, M.; Nijholt, A. (2010):** Evaluating Informative Auditory and Tactile Cues for In-vehicle Information Systems. Vorgestellt in: Proceedings of the 2nd International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, S. 102-109.
- Casadei, A.; Broda, R. (2008):** Impact of Vehicle Weight Reduction on Fuel Economy for Various Vehicle Architectures. RICARDO Inc, The Aluminum Association, Inc., 2008.
- Caulfield, B.; Brazil, W.; Fitzgerald, K.N.; Morton, C. (2014):** Measuring the Success of Reducing Emissions Using an On-Board Eco-Driving Feedback Tool. In: Transportation Research Part D: Transport and Environment, Jg. 32 (2014), S. 253–262.
- Chau, C.-K.; Elbassioni, K.; Tseng, C.-M. (2016):** Fuel Minimization of Plug-in Hybrid Electric Vehicles by Optimizing Drive Mode Selection. In: *e-Energy*, Waterloo, ON, Canada: ACM.
- Chau, P.K. (1996):** An Empirical Assessment of a Modified Technology Acceptance Model. In: Journal of Management Information Systems, Jg. 13 (1996) Nr. 2, S. 185-204.
- Chen, C.; Wu, J.; Yang, S. (2008):** Accelerating the Use of Weblogs as an Alternative Method to Deliver Case-Based Learning. In: International Journal on E-Learning, Jg. 7 (2008) Nr. 2, S. 331-349.
- Chen, L.; Gillenson, M.; Sherrell, D. (2002):** Enticing Online Consumers: An Extended Technology Acceptance Perspective. In: Information & Management, Jg. 39 (2002), S. 705-719.
- Chin, W.W.; Todd, P. (1995):** On the Use, Usefulness, and ease of Use of Structural Equation Modeling in MIS Research: A Note of Caution. In: MIS Quarterly, Jg. 19 (1995) Nr. 237-246.
- Cho, H.J. (2008):** Eco Driving System. <http://kia-buzz.com/eco-driving-system/>, zugegriffen am 11.11.2015.
- Choi, H.; Choi, M.; Yu, H.; Kim, J. (2003):** An Empirical Study on the Adoption of Information Appliances with a Focus on Interactive TV. In: Telematic and Informatics, Jg. 20 (2003) Nr. 2, S. 161-183.
- Claffy, K.C.; Polyzos, G.C.; Braun, H.-W. (1993):** Measurement Considerations for Assessing Unidirectional Latencies. Vorgestellt in: Internetworking: Research and Experience, S. 121-132.
- Cohen, J. (1988):** Statistical power analysis for the behavioral sciences. (Aufl. 2nd), Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, N.J. 1988.
- Cohen, J. (1992):** A Power Primer. In: Psychological Bulletin, Jg. 112 (1992) Nr. 1, S. 155.
- Continental (2009):** Accelerator Force Feedback Pedal (AFFP®). [http://www.continental-automotive.com/www/automotive\\_de\\_en/themes/passenger\\_cars/chassis\\_safety/passive\\_safety\\_sensorics/driver\\_braking\\_intention\\_en/affp\\_en.html](http://www.continental-automotive.com/www/automotive_de_en/themes/passenger_cars/chassis_safety/passive_safety_sensorics/driver_braking_intention_en/affp_en.html), zugegriffen am 16.12.2017.
- Cooper, H.M. (1988):** Organizing Knowledge Syntheses: A Taxonomy of Literature Reviews. In: Knowledge in Society, Jg. 1 (1988) Nr. 1, S. 104-126.
- Corcoba Magaña, V.; Muñoz Organero, M. (2015):** Eco-Driving: Energy Saving Based on Driver Behavior. In: Jornadas de ARCA. Sistemas Cualitativos y sus Aplicaciones en Diagnosis, Robótica e Inteligencia Ambiental, Jg. 16 (2015) Nr. 1, S. 49-54.
- Corti, A.; Ongini, C.; Tanelli, M.; Savaresi, S.M. (2013):** Quantitative Driving Style Estimation for Energy-Oriented Applications in Road Vehicles. Vorgestellt in: IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), S. 3710-3715.
- Coughlin, B. (2009):** Haptic Apparatus and Coaching Method for Improving Vehicle Fuel Economy.Nr. US7603228 B2, USA.

- Creswell, J.W. (2012):** Educational Research: Planning, Conducting, and Evaluating Quantitative and Qualitative Research, Pearson Education, Boston, USA 2012.
- Cristea, M.; Paran, F.; Delhomme, P. (2012):** The Role of Motivations for Eco-Driving and Social Norms on Behavioural Intentions Regarding Speed Limits and Time Headway. Vorgelegt in: Proceedings of the World Academy of Science, Engineering and Technology.
- Cristian, F. (1989):** Probabilistic Clock Synchronization. In: Distributed Computing, Jg. 3 (1989) Nr. 3, S. 146-158.
- Cronbach, L.J. (1951):** Coefficient Alpha and the Internal Structure of Tests. In: Psychometrika, Jg. 16 (1951) Nr. 3, S. 297-334.
- Cudeck, R. (2000):** Exploratory Factor Analysis. In: Handbook of Applied Multivariate Statistics and Mathematical Modeling. Tinsley, H.E.A.; Brown, S.D. (Hrsg.). Academic Press, San Diego, California, USA 2000, S. 265-296.
- Dabholkar, P.; Bagozzi, R.P. (2002):** An Attitudinal Model of Technology-based Self-service: Moderating Effects of Consumer Traits and Situational Factors. In: Journal of Academy of Marketing Science, Jg. 30 (2002) Nr. 3, S. 184-201.
- Dahlinger, A.; Wortmann, F. (2016):** Towards the Design of Eco-Driving Feedback Information Systems: A Literature Review. Vorgelegt in: Multikonferenz Wirtschaftsinformatik (MKWI) 2016, S. 801-812.
- Dao, V.; Langella, I.; Carbo, J. (2011):** From Green to Sustainability: Information Technology and an Integrated Sustainability Framework. In: Journal of Strategic Information Systems, Jg. 20 (2011) Nr. 1, S. 63-79.
- Darwin, C.R. (1859):** On the Origin of Species by Means of Natural Selection, Princeton University Press, Princeton, New York, USA 1859.
- Davis, F.; Bagozzi, R.P.; Warshaw, P.R. (1989a):** User Acceptance Computer Technology - A Comparison of Two Theoretical Models. In: Management Science, Jg. 35 (1989a) Nr. 8, S. 982-1003.
- Davis, F.D. (1986):** A Technology Acceptance Model for Empirically Testing New End-User Information Systems - Theory and Results, Massachusetts Institute of Technology 1986.
- Davis, F.D.; Bagozzi, R.P.; Warshaw, P.R. (1989b):** User Acceptance Computer Technology - A Comparison of Two Theoretical Models. In: Management Science, Jg. 35 (1989b) Nr. 8, S. 982-1003.
- Davis, F.D.; Bagozzi, R.P.; Warshaw, P.R. (1992):** Extrinsic and Intrinsic Motivation to Use Computers in the Workplace. In: Journal of Applied Social Psychology, Jg. 22 (1992) Nr. 14, S. 1111-1132.
- de Charms, R. (1968):** Personal Causation: The Internal Affective Determinants of Behavior, Academic Press, New York, USA 1968.
- De Haan, G.; Kuckartz, U. (1996):** Umweltbewusstsein. Denken und Handeln im Umweltkrisen, VS Verlag für Sozialwissenschaften, Opladen 1996.
- Deci, E.L. (1971):** Effects of Externally Mediated Rewards on Intrinsic Motivation. In: Journal of Personality and Social Psychology, Jg. 18 (1971), S. 105-115.
- Deci, E.L. (1972a):** The Effect of Contingent and Non-Contingent Rewards and Controls on Intrinsic Motivation. In: Organizational Behavior and Human Performance, Jg. 8 (1972a), S. 217-229.
- Deci, E.L. (1972b):** Intrinsic Motivation and Extrinsic Reinforcement, and Inequity. In: Journal of Abnormal and Social Psychology, Jg. 22 (1972b), S. 113-120.
- Deci, E.L. (1975):** Intrinsic Motivation, Plenum, New York 1975.
- Deci, E.L. (2015):** Selfdeterminationtheory.org. <http://www.selfdeterminationtheory.org>, zugegriffen am 09.09.2015.
- Deci, E.L. (2017a):** General-Causality-Orientations-Scale. <http://selfdeterminationtheory.org/general-causality-orientations-scale/>, zugegriffen am 09.03.2017.
- Deci, E.L. (2017b):** Perceived Choice and Awareness of Self Scale. <http://selfdeterminationtheory.org/pcass/>, zugegriffen am 19.06.2017.
- Deci, E.L. (2017c):** Perceptions of Parents Scales. <http://selfdeterminationtheory.org/perceptions-of-parents-scales/>, zugegriffen am 19.06.2017.
- Deci, E.L.; Cascio, W.F. (1972):** Changes in Intrinsic Motivation as a Function of Negative Feedback and Threats. In: *Meeting of the Eastern Psychological Association*, Boston.

- Deci, E.L.; Cascio, W.F.; Krussel, J. (1975):** Cognitive Evaluation Theory and Some Comments on the Calder-Staw Critique. In: *Journal of Personality and Social Psychology*, Jg. 31 (1975), S. 81-85.
- Deci, E.L.; Connell, J.P.; Ryan, R.M. (1989):** Self-Determination in a Work Organization. In: *Journal of Applied Psychology*, Jg. 74 (1989), S. 580-590.
- Deci, E.L.; Eghrari, H.; Patrick, B.C.; Leone, D.R. (1994):** Facilitating Internalization: The Self-Determination Theory Perspective. In: *Journal of Personality*, Jg. 61 (1994), S. 119-142.
- Deci, E.L.; Hodges, R.; Pierson, L.; Tomassone, J. (1992):** Autonomy and Competence as Motivational Factors in Students with Learning Disabilities and Emotional Handicaps. In: *Journal of Learning Disabilities*, Jg. 25 (1992), S. 457-471.
- Deci, E.L.; Koestner, R.; Ryan, R.M. (1998):** Extrinsic Rewards and Intrinsic Motivation: Clear and Reliable Effects. Unpublished Manuscript, University of Rochester.
- Deci, E.L.; Nezlek, J.; Sheinman, L. (1981a):** Characteristics of the Rewarder and Intrinsic Motivation of the Rewardee. In: *Journal of Personality and Social Psychology*, Jg. 40 (1981a), S. 1-10.
- Deci, E.L.; Ryan, R.M. (1985a):** The General Causality Orientations Scale: Self-Determination in Personality. In: *Journal of Research in Personality*, Jg. 19 (1985a).
- Deci, E.L.; Ryan, R.M. (1985b):** Intrinsic Motivation and Self-Determination in Human Behavior, Springer Science & Business Media, New York 1985b.
- Deci, E.L.; Ryan, R.M. (2000):** The "what" and "why" of Goal Pursuits: Human Needs and the Self-Determination of Behavior. In: *Psychological inquiry*, Jg. 11 (2000) Nr. 4, S. 227-268.
- Deci, E.L.; Ryan, R.M.; Gagné, M.; Leone, D.R.; Usunov, J.; Kornazheva, B.P. (2001):** Need Satisfaction, Motivation, and Well-Being in the Work Organizations of a Former Eastern Bloc country: A Cross-Cultural Study of Self-Determination. In: in Press, (2001).
- Deci, E.L.; Schwartz, A.J.; Sheinman, L.; Ryan, R.M. (1981b):** An Instrument to Assess Adults' Orientations Toward Control Versus Autonomy with Children: Reflections on Intrinsic Motivation and Perceived Competence. In: *Journal of Educational Psychology*, Jg. 73 (1981b), S. 642-650.
- derStandard.at (2009):** "Zuckerl" fürs Spritsparen.  
<http://derstandard.at/1244460264960/Neue-Cockpit-Technologien-Zuckerl-fuers-Spritsparen>, zugegriffen am 15.01.2015.
- Deveraj, S.; Fran, M.; Kohli, R. (2002):** Antecedents of B2C Channel Satisfaction and Preference. In: *Information Systems Research*, Jg. 13 (2002) Nr. 3, S. 316-333.
- Dishaw, M.T.; Strong, D.M. (1999):** Extending the Technology Acceptance Model with Task-Technology Fit Constructs. In: *Information & Management*, Jg. 36 (1999) Nr. 1, S. 9-21.
- Dogan, E.; Steg, L.; Delhomme, P. (2011):** The Influence of Multiple Goals on Driving Behavior: The Case of Safety, Time Saving, and Fuel Saving. In: *Accident Analysis & Prevention*, Jg. 43 (2011) Nr. 5, S. 1635-1643.
- Domhardt, M.; Tunca, E.; Zoller, I.; Lotz, P.; Schmidt, L. (2013):** Evaluation eines haptischen Touchpads für die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion. In: *Grundlagen und Anwendungen der Mensch-Maschine-Interaktion: 10. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme*, S. 9-18, Berlin: Universitätsverlag der TU Berlin.
- Donmez, B.; Boyle, L.N.; Lee, J.D. (2007):** Safety Implications of Providing Real-Time Feedback to Distracted Drivers. In: *Accident Analysis & Prevention*, Jg. 39 (2007) Nr. 3, S. 581-590.
- Dragomirov, N. (2013):** Is ECO-tuning a Real Solution for Fuel Economy? In: *International Journal of Transport & Logistics*, Jg. 13 (2013) Nr. 29.
- EAEA (2001):** Owner Related Fuel Economy Improvements. Energy and Environmental Analysis, Inc., Arlington, VA, 2001.
- ECOpoint (2016):** DieselNet Emission Test Cycles.  
<https://www.dieselnets.com/standards/cycles/#eu>, zugegriffen am 30.07.2017.
- ECOpoint (o. J.):** Common Artemis Driving Cycles (CADC).  
[https://www.dieselnets.com/standards/cycles/jp\\_jc08.php](https://www.dieselnets.com/standards/cycles/jp_jc08.php), zugegriffen am 25.01.2017.
- El Saddik, A.; Orozco, M.; Eid, M.; Cha, J. (2011):** Haptics Technologies: Bringing Touch to Multimedia, Springer-Verlag, Heidelberg [u. a.] 2011.

- Elliot, A.J.; Covington, M.V. (2001):** Approach and Avoidance Motivation. In: Educational Psychology Review, Jg. 13 (2001) Nr. 2, S. 73-92.
- Elliot, A.J.; McGregor, H.A. (2001):** A 2 x 2 Achievement Goal Framework. In: Journal of Personality and Social Psychology, Jg. 80 (2001) Nr. 3, S. 501-519.
- Endor AG (2017):** Fanatec. <https://www.fanatec.com/eu-de/>, zugegriffen am 07.07.2017.
- Ericsson, E. (2001):** Independent Driving Pattern Factors and their Influence on Fuel-Use and Exhaust Emission Factors. In: Transportation Research Part D: Transport and Environment, Jg. 6 (2001) Nr. 5, S. 325-345.
- Etzioni, A. (1961):** A Comparative Analysis of Complex Organizations. (Aufl. 1), Free Press, New York, USA 1961.
- EU-INFO (2015):** Führerschein in Großbritannien schon mit 17 Jahren. <http://www.eu-info.de/auto-fuehrerschein-eu-europa/5891/fuehrerschein-grossbritannien/>, zugegriffen am 09.09.2015.
- Evans, L. (1979):** Driver Behavior Effects on Fuel Consumption in Urban Driving. In: Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, Jg. 21 (1979) Nr. 4, S. 389-398.
- Ewers, E.; Hoff, E.-H.; Walter, J. (2001):** Verantwortungsbewusstsein und Ansatzpunkte zur Förderung im Unternehmen. In: Zeitschrift für Arbeitsforschung, Arbeitsgestaltung und Arbeitspolitik, Jg. 10 (2001), S. 50-62.
- Faul, F.; Erdfelder, E.; Buchner, A.; Lang, A.-G. (2009):** Statistical Power Analyses Using G\* Power 3.1: Tests for Correlation and Regression Analyses. In: Behavior Research Methods, Jg. 41 (2009) Nr. 4, S. 1149-1160.
- Faul, F.; Erdfelder, E.; Lang, A.-G.; Buchner, A. (2007):** G\* Power 3: A Flexible Statistical Power Analysis Program for the Social, Behavioral, and Biomedical Sciences. In: Behavior research methods, Jg. 39 (2007) Nr. 2, S. 175-191.
- Feng, J.; Donmez, B. (2013):** Designing Feedback to Induce Safer Driving Behaviors: A Literature Review and a Model of Driver-Feedback Interaction. In: Human Factors, (2013).
- FHA (2015):** Licensed Driver by Age and Sex. <http://www.fhwa.dot.gov/ohim/onh00/onh2p4.htm>, zugegriffen am 09.09.2015.
- Fiat (o. J.):** Fiat(R) eco:DRIVE APP. [http://www.fiatusa.com/en/mobile\\_apps/fiat-ecodrive/](http://www.fiatusa.com/en/mobile_apps/fiat-ecodrive/), zugegriffen am 02.02.2017.
- Fishbein, M.; Ajzen, I. (2010):** Predicting and Changing Behavior - The Reasoned Action Approach, Psychology Press, New York, USA 2010.
- Fishbein, M.; Cappella, J.N. (2006):** The Role of Theory in Developing Effective Health Communications. In: Journal of Communication, Jg. 56 (2006) Nr. 1, S. 1-17.
- Fiske, S.T. (2008):** Core Social Motivations: Views From the Couch, Consciousness, Classroom, Computers, and Collectives. , The Guilford Press, New York, USA 2008.
- Fitbit (2017):** Wann synchronisiert sich mein Tracker? [https://help.fitbit.com/articles/de/Help\\_article/1877/?l=de&c=Topics%3ASyncing&fs=Search&pn=1](https://help.fitbit.com/articles/de/Help_article/1877/?l=de&c=Topics%3ASyncing&fs=Search&pn=1), zugegriffen am 09.07.2017.
- Focus.de (2012):** Notwehr gegen die Spritabzocke. [http://www.focus.de/auto/ratgeber/kosten/so-fahren-sie-sparsamer-notwehr-gegen-die-sprit-abzocke\\_aid\\_803305.html](http://www.focus.de/auto/ratgeber/kosten/so-fahren-sie-sparsamer-notwehr-gegen-die-sprit-abzocke_aid_803305.html), zugegriffen am 24.07.2015.
- Fogg, B.J. (2002):** Computers as Persuasive Social Actors. In: Persuasive Technology: Using Computers to Change What We Think and Do. Interactive Technologies, San Francisco, California, USA 2002, S. 89-120.
- Fogg, B.J. (2009a):** The Behavior Grid: 35 Ways Behavior Can Change. Vorgestellt in: Proceedings of the 4th International Conference on Persuasive Technology, Claremont, California, USA, S. 1-5.
- Fogg, B.J. (2009b):** A Behavior Model for Persuasive Design. Vorgestellt in: Proceedings of the 4th International Conference on Persuasive Technology, Claremont, California, USA, S. 1-7.
- Fogg, B.J. (2009c):** Creating Persuasive Technologies: An Eight-Step Design Process. Vorgestellt in: Proceedings of the 4th International Conference on Persuasive Technology, Claremont, California, USA, S. 1-6.
- Fogg, B.J.; Nass, C. (1997):** How Users Reciprocate to Computers: An Experiment that Demonstrates Behavior Change. Vorgestellt in: Proceedings of the CHI '97 Extended

- Abstracts on Human Factors in Computing Systems, Atlanta, Georgia, USA, S. 331-332.
- Fonseca Gonzalez, N.E.; Casanova Kindelán, J.; Espinosa Zapata, F. (2010):** Influence of Driving Style on Fuel Consumption and Emissions in Diesel-powered Passenger Car. Vorgestellt in: 18th International Symposium Transport and Air Pollution, Zürich, Schweiz, S. 1-6.
- Ford Motor Company (2016):** Next-Generation SmartGauge® with EcoGuide. <http://www.ford.com/cars/cmax/features/Feature1/#page=Feature3>, zugegriffen am 29.04.2016.
- Forster, B.; Cavina-Pratesi, C.; Aglioti, S.M.; Berlucchi, G. (2002):** Redundant Target Effect and Intersensory Facilitation from Visual-Tactile Interactions in Simple Reaction Time. In: *Experimental Brain Research*, Jg. 143 (2002) Nr. 4, S. 480-487.
- Fradette, K.; Keselman, H.; Lix, L.; Algina, J.; Wilcox, R.R. (2003):** Conventional and robust paired and independent-samples t tests: Type I error and power rates. In: *Journal of Modern Applied Statistical Methods*, Jg. 2 (2003) Nr. 2, S. 22.
- Frank, A.; Schneider, F.; Meschtscherjakov, A.; Stadon, J. (2015):** Advanced Traffic Light Interface: Countdown Timers to Increase User Experience. Vorgestellt in: *Adjunct Proceedings of the 7th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, S. 56-61.
- Franke, T.; Trantow, M.; Günther, M.; Krems, J.F.; Zott, V.; Keinath, A. (2015):** Advancing Electric Vehicle Range Displays for Enhanced User Experience: The Relevance of Trust and Adaptability. Vorgestellt in: *Proceedings of the 7th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, S. 249-256.
- Frederick, C.M.; Ryan, R.M. (1993):** Differences in Motivation for Sport and Exercise and Their Relationships with Participation and Mental Health. In: *Journal of Sport Behavior*, Jg. 16 (1993), S. 125-145.
- Freud, S. (1915):** Repression. In: *The Standard Edition of Complete Psychological Works of Sigmund Freud (Band 14)*. Strachey, J.; Freud, A. (Hrsg.). Vintage, London, England 1915, S. 141-158.
- Freud, S.; Strachey, J. (1949):** *An Outline of Psychoanalysis*. (Aufl. 1), W. W. Norton, New York, USA 1949.
- Friedman, D.; Sunder, S. (1994):** *Experimental Methods: A Primer for Economists*. (Aufl. 1), Cambridge University Press, Cambridge, California, USA 1994.
- Froehlich, J.; Findlater, L.; Landay, J. (2010):** The Design of Eco-Feedback Technology. Vorgestellt in: *Proceedings of the SIGCHI 2010 Conference on Human Factors in Computing Systems*, Atlanta, Georgia, USA, S. 1999-2008.
- Fueleconomy.gov (Driving More Efficiently).** <http://www.fueleconomy.gov/feg/driveHabits.jsp>, zugegriffen am 24.07.2015.
- Gagné, M. (2003):** The Role of Autonomy Support and Autonomy Orientation in Prosocial Behavior Engagement. In: *Motivation and Emotion*, Jg. 27 (2003), S. 199-223.
- Gawel, J.E. (1997):** Herzberg's Theory of Motivation and Maslow's Hierarchy of Needs. In: *Practical Assessment, Research & Evaluation*, Jg. 5 (1997) Nr. 11, S. 3.
- Genfen, D. (2003):** TAM or Just Plain Habit: A Look at Experienced Online Shoppers. In: *Journal of End User Computing*, Jg. 15 (2003) Nr. 3, S. 1-13.
- Ghorab, K.E. (1997):** The Impact of Technology Acceptance Considerations on System Usage, and Adopted Level of Technological Sophistication: An Empirical Investigation. In: *Journal of Information Management*, Jg. 17 (1997) Nr. 4, S. 249-259.
- Giakoumis, E.G. (2017):** *Driving and Engine Cycles*, Springer International Publishing, Athen, Griechenland 2017.
- Godin, G.; Kok, G. (1996):** The Theory of Planned Behavior: A Review of Its Applications to Health-related Behaviors. In: *American Journal of Health Promotion*, Jg. 11 (1996) Nr. 2, S. 87-98.
- Gollner, J.A. (2014):** Motivation Sources Inventory (MSI) and Its Application for ERP Implementations. In: *Journal of Management and Marketing*, Jg. 1 (2014), S. 27-36.
- Gonder, J.; Earleywine, M.; Sparks, W. (2012):** Analyzing Vehicle Fuel Saving Opportunities through Intelligent Driver Feedback. SAE Technical Paper.
- Goodman, P.S.; Friedman, A. (1971):** An Examination of Adams' Theory of Inequity. In: *Administrative Science Quarterly*, Jg. 16 (1971), S. 271-288.

- Gottlieb, M. (2015):** Experimental Research on the Influence of Informational Triggers on Driving Behavior. In: *Doctoral Consortium WI 2015*, Band 4, S. 102-114, Osnabrück, Germany.
- Gottlieb, M.; Böhm, M. (2018):** Measurement Model for the Construct “Eco-Driving”: A Mockup for Real-Time Eco-Feedback. Vorge stellt in: Twenty-fourth Americas Conference on Information Systems, New Orleans, LA, USA.
- Gottlieb, M.; Böhm, M.; Krcmar, H. (2018a):** Analyzing Measures for the Construct “Energy-Conscious Driving”: A Synthesized Measurement Model to Operationalize Eco-Feedback. In: *Twenty-Second Pacific Asia Conference on Information Systems*, Band 1, Yokohama, Japan.
- Gottlieb, M.; Böhm, M.; Utesch, M.; Krcmar, H. (2018b):** Comparison of Reaction Times of a Visual and a Haptic Cue for Teaching Eco-Driving: An Experiment to Explore the Applicability of a Smartwatch. In: *International Conference in Interactive Collaborative Learning*, Band 1, Kos Island, Griechenland.
- Gottlieb, M.; Burek, M.; Böhm, M.; Krcmar, H. (2016):** Erhebungsinstrument zur Messung der Nutzungsmotivation von Energieverbrauchsanzeigen im Automobil. In: *Multikonferenz Wirtschaftsinformatik (MKWI) 2016: Research-in-Progress- und Poster-Beiträge*, Ilmenau: Technische Universität Ilmenau.
- Green, M. (2000):** "How Long Does It Take to Stop?" Methodological Analysis of Driver Perception-Brake Times. In: *Transportation human factors*, Jg. 2 (2000) Nr. 3, S. 195-216.
- Green, P. (2004):** Driver Distraction, Telematics Design, and Workload Managers: Safety Issues and Solutions. Ann Arbor, Michigan, USA: Society of Automotive Engineers (SAE).
- Griffiths, P.G.; Gillespie, R.B. (2005):** Sharing Control between Humans and Automation Using Haptic Interface: Primary and Secondary Task Performance Benefits. In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, Jg. 47 (2005) Nr. 3, S. 574-590.
- Grolnick, W.S.; Deci, E.L.; Ryan, R.M. (1997):** Internalization within the Family: The Self-Determination Theory Perspective. In: *Parenting and Children's Internalization of Values: A Handbook of Contemporary Theory*. Grusec, J.E.; Kuczynski, L. (Hrsg.). John Wiley, New York, USA 1997, S. 135-161.
- Grolnick, W.S.; Ryan, R.M. (1987):** Autonomy in Children's Learning: An Experimental and Individual Difference Investigation. In: *Journal of Personality and Social Psychology*, Jg. 52 (1987) Nr. 5, S. 890-898.
- Grolnick, W.S.; Ryan, R.M. (1989):** Parent Styles Associated With Children's Self-Regulation and Competence In School. In: *Journal of Educational Psychology*, Jg. 81 (1989) Nr. 2, S. 143-154.
- Grolnick, W.S.; Ryan, R.M.; Deci, E.L. (1991):** The Inner Resources for School Achievement: Motivational Mediators of Children's Perceptions of their Parents. In: *Journal of Educational Psychology*, Jg. 83 (1991) Nr. 4, S. 508-517.
- Guay, F.; Vallerand, R.J.; Blanchard, C.M. (2000):** On the Assessment of Situational Intrinsic and Extrinsic Motivation: The Situational Motivation Scale (SIMS). In: *Motivation and Emotion*, Jg. 24 (2000) Nr. 3, S. 175-213.
- Günther, E. (o. J.):** Stichwort: Energie. Gabler Wirtschaftslexikon, <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/126548/energie-v9.html>, zugegriffen am 26.01.2017.
- Hajnal, A.; Fonseca, S.; Kinsella-Shaw, J.M.; Silva, P.; Carello, C.; Turvey, M.T. (2007):** Haptic Selective Attention by Foot and by Hand. In: *Neuroscience Letters*, Jg. 419 (2007) Nr. 1, S. 5-9.
- Harlow, H.F. (1953a):** Learning by Rhesus Monkeys on the Basis of Manipulation-Exploration Motives. In: *Science*, Jg. 117 (1953a) Nr. 3044, S. 466-467.
- Harlow, H.F. (1953b):** Mice, Monkeys, Men, and Motives. In: *Psychological Review*, Jg. 60 (1953b) Nr. 1, S. 23-32.
- Harumoto, S.; Kiyo, K.; Takeuchi, S. (2011):** Low Fuel Consumption Driving Diagnostic Device, Low Fuel Consumption Driving Diagnostic System, Controller for Electrical Drive Device, Low Fuel Consumption Driving Scoring Device, and Low Fuel Consumption Driving Diagnostic Method. European Patent Nr. EP 2 311 683 A1, Europe: European Patent Office.

- Harvey, J.; Thorpe, N.; Fairchild, R. (2013):** Attitudes Towards and Perceptions of Eco-Driving and the Role of Feedback Systems. In: *Ergonomics*, Jg. 56 (2013) Nr. 3, S. 507-521.
- Hayamizu, T. (1997):** Between Intrinsic and Extrinsic Motivation: Examination of Reasons for Academic Study Based on the Theory of Internalization. In: *Japanese Psychological Research*, Jg. 39 (1997) Nr. 2, S. 98-108.
- Hayes, A.F. (2013):** Introduction to Mediation, Moderation, and Conditional Process Analysis: A Regression-based Approach. (Aufl. 1), Guilford Press, New York, USA 2013.
- Hebb, D.O. (1955):** Drives and the C. N. S. (Central Nervous System). In: *Psychological Review*, Jg. 62 (1955) Nr. 4, S. 243-254.
- Heckhausen, J.; Heckhausen, H. (2010):** Motivation und Handeln (Band 4. Auflage), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 2010.
- Heckhausen, J.H., Heinz (2009):** Motivation und Handeln (Band 3. Auflage, Nachdruck 2009), Springer-Verlag, Heidelberg 2009.
- Heigemeyr, A.; Harrer, A. (2014):** Information Management for Adaptive Automotive Human Machine Interfaces. Vorgestellt in: Proceedings of the 6th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, S. 1-8.
- Heijden, H. (2003):** Factors Influencing the Usage of Website: The Case of a Generic Portal in the Netherlands. In: *Information & Management*, Jg. 40 (2003) Nr. 6, S. 541-549.
- Helmbrecht, M.; Olaverri-Monreal, C.; Bengler, K.; Vilimek, R.; Keinath, A. (2014):** How Electric Vehicles Affect Driving Behavioral Patterns. In: *Intelligent Transportation Systems Magazine, IEEE*, Jg. 6 (2014) Nr. 3, S. 22-32.
- Henderson, R.; Divett, M. (2003):** Perceived Usefulness, Ease of Use and Electronic Supermarket Use. In: *Int'l Jr. of Human-Computer Studies*, Jg. 59 (2003) Nr. 3, S. 383-395.
- Heneman, H.G.; Schwab, D.P. (1972):** Evaluation of Research on Expectancy Theory Predictions of Employees. In: *Psychological Bulletin*, Jg. 78 (1972) Nr. 1, S. 1-9.
- Herzberg, F.; Mausner, B.; Snyderman, B.B. (1959):** The Motivation to Work (Band 12, Nachdruck 2010), John Wiley, New York, USA 1959.
- Hevner, A.R. (2007):** A Three Cycle View of Design Science Research. In: *Scandinavian Journal of Information Systems*, Jg. 19 (2007) Nr. 2, S. 87-92.
- Hevner, A.R.; March, S.T.; Park, J.; Ram, S. (2004):** Design Science in Information Systems Research. In: *MIS Quarterly*, Jg. 28 (2004) Nr. 1, S. 75-105.
- Hibberd, D.L.; Jamson, A.H.; Jamson, S.L. (2015):** The Design of an In-vehicle Assistance System to Support Eco-Driving. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Jg. 58, Part D (2015), S. 732-748.
- Hill, P.C.; Hood, R.W. (1999):** Measures of Religiosity, Religious Education Press, Birmingham, Alabama, USA 1999.
- Hiraoka, T.; Terakado, Y.; Matsumoto, S.; Yamabe, S. (2009):** Quantitative Evaluation of Eco-Driving on Fuel Consumption Based on Driving Simulator Experiments. Vorgestellt in: Proceedings of the 16th World Congress on Intelligent Transport Systems.
- Hoaglin, D.C.; Iglewicz, B.; Tukey, J.W. (1986):** Performance of Some Resistant Rules for Outlier Labeling. In: *Journal of the American Statistical Association*, Jg. 81 (1986) Nr. 396, S. 991-999.
- Hockenbury, D.H.; Hockenbury, S.E. (2010):** Discovering Psychology, Worth Publishers 2010.
- Hodgins, H.S.; Koestner, R.; Duncan, N. (1996):** On the Compatibility of Autonomy and Relatedness. In: *Personality and Social Psychology Bulletin*, Jg. 22 (1996), S. 227-237.
- Högg, R. (2010):** Erweiterung und Evaluation des Technologieakzeptanzmodells zur Anwendung bei mobilen Datendiensten. Dissertation, Universität St. Gallen, 2010.
- Holt, E.B.; Brown, H.C. (1931):** Animal Drive and the Learning Process. (Aufl. 1), Holt and Company, New York, USA 1931.
- Hossiep, R. (2014):** Dorsch – Lexikon der Psychologie: Cronbachs Alpha. (Aufl. 18), Hogrefe Verlag, Bern, Schweiz 2014.
- House, R.J. (1971):** A Path Goal Theory of Leader Effectiveness. In: *Administrative Science Quarterly*, Jg. 16 (1971), S. 321-328.

- Hoyle, R.H. (2000):** Confirmatory Factor Analysis. In: Handbook of Applied Multivariate Statistics and Mathematical Modeling. 2000, S. 465-497.
- Hu, L.; Bentler, P.M. (1999):** Cutoff Criteria for Fit Indexes in Covariance Structure Analysis: Conventional Criteria Versus New Alternatives. In: Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal, Jg. 6 (1999) Nr. 1, S. 1-55.
- Hull, C. (1943):** Principles of Behavior, Appleton-Century-Crofts, New York 1943.
- Huttunen, J.; Wikström, H.; Salonen, O.; Ilmoniemi, R.J. (1999):** Human somatosensory cortical activation strengths: comparison between males and females and age-related changes. In: Brain research, Jg. 818 (1999) Nr. 2, S. 196-203.
- Igbaria, M. (1994):** An Examination of the Factors Contributing to Microcomputer Technology Acceptance. In: Accounting Management and IT, Jg. 4 (1994) Nr. 4, S. 205-224.
- Ilardi, B.C.; Leone, D.; Kasser, T.; Ryan, R.M. (1993):** Employee and Supervisor Ratings of Motivation: Main Effects and Discrepancies Associated with Job Satisfaction and Adjustment in a Factory Setting. In: Journal of Applied Social Psychology, Jg. 23 (1993) Nr. 21, S. 1789-1805.
- Ilgel, D.R.; Nebeker, D.M.; Pritchard, R.D. (1981):** Expectancy Theory Measures: An Empirical Comparison in an Experimental Simulation. In: Organizational Behavior and Human Performance, Jg. 28 (1981) Nr. 2, S. 189-223.
- Inbar, O.; Tractinsky, N.; Tsimhoni, O.; Seder, T. (2011):** Driving the Scoreboard: Motivating Eco-Driving through In-Car Gaming. Vorgelegt in: CHI Gamification Workshop, Vancouver, BC, Canada.
- Infrastruktur, B.f.V.u.d. (2018):** Kraftstoffe. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/kraftstoffe>, zugegriffen am 04.06.2018.
- ISO (2010):** Road Vehicles -- Ergonomic Aspects of Transport Information and Control Systems -- Simulated Lane Change Test to Assess In-Vehicle Secondary Task Demand. In International Organization for Standardization (Hrsg.), *ISO 26022:2010* (S. 1-41).
- ISO (2015):** Road vehicles -- Controller area network (CAN) -- Part 1: Data link layer and physical signalling. (S. 65): International Organization for Standardization,.
- James, W. (1890):** Principles of Psychology, H. Holt and Company, New York, USA 1890.
- Jamson, A.H.; Hibberd, D.L.; Merat, N. (2015a):** Interface Design Considerations for an In-Vehicle Eco-Driving Assistance System. In: Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Jg. 58, Part D (2015a), S. 642-656.
- Jamson, A.H.; Merat, N. (2005):** Surrogate in-vehicle information systems and driver behaviour: Effects of visual and cognitive load in simulated rural driving. In: Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, Jg. 8 (2005) Nr. 2, S. 79-96.
- Jamson, S.L.; Hibberd, D.L.; Jamson, A.H. (2015b):** Drivers' Ability to Learn Eco-driving Skills; Effects on Fuel Efficient and Safe Driving Behaviour. In: Transportation Research Part C: Emerging Technologies, (2015b).
- Joussemet, M.; Mageau, G.A.; Koestner, R. (2014):** Promoting Optimal Parenting and Children's Mental Health: A Preliminary Evaluation of the How-to Parenting Program. In: Journal of Child and Family Studies, Jg. 23 (2014) Nr. 6, S. 949-964.
- Jung, M.F.; Sirkin, D.; Gür, T.M.; Steinert, M. (2015):** Displayed Uncertainty Improves Driving Experience and Behavior: The Case of Range Anxiety in an Electric Car. Vorgelegt in: Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems, S. 2201-2210.
- Kashdan, T.B.; Julian, T.; Merritt, K.; Uswatte, G. (2006):** Social Anxiety and Posttraumatic Stress in Combat Veterans: Relations to Well-Being and Character Strengths. In: Behavior Research and Therapy, Jg. 44 (2006), S. 561-583.
- Kasser, T.; Davey, J.; Ryan, R.M. (1992):** Motivation and Employee-Supervisor Discrepancies in a Psychiatric Vocational Rehabilitation Setting. In: Rehabilitation Psychology, Jg. 37 (1992) Nr. 3, S. 175-187.
- Kasser, T.; Ryan, R.M. (1996):** Further Examining the American Dream: Differential Correlates of Intrinsic and Extrinsic Goals. In: Personality and Social Psychology Bulletin, Jg. 22 (1996) Nr. 3, S. 280-287.

- Kasser, V.G.; Ryan, R.M. (1999):** The Relation of Psychological Needs for Autonomy and Relatedness to Health, Vitality, Well-Being and Mortality in a Nursing Home. In: *Journal of Applied Social Psychology*, Jg. 29 (1999) Nr. 5, S. 935-954.
- Katz, D.; Kahn, R.L. (1978):** *The Social Psychology of Organizations*, John Wiley, New York, USA 1978.
- Kaufmann-Hayoz, R.; Lauper, L.; Fischer, M.; Moser, S.; Schlachter, I.; Meloni, T. (2012):** What Makes Car Users Adopt an Environmentally Friendly Driving Style? Vorgelegt in: *Proceedings of INTER-NOISE*, New York, USA.
- Kegan, R. (1982):** *The Envolving Self.*, Harvard University Press, Cambridge, MA 1982.
- Kelman, H.C. (1958):** Compliance, Identification, and Internalization: Three Processes of Attitude Change. In: *Journal of Conflict Resolution*, Jg. 2 (1958), S. 51-56.
- Kern, D.; Schmidt, A. (2009):** Design Space for Driver-Based Automotive User Interfaces. In: *AutomotiveUI '09 1st International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, S. 3-10, Essen: ACM.
- Khan, B. (2015):** G7 Leaders: World Needs to Phase Out. <http://www.climatecentral.org/news/g7-carbon-emissions-19082>, zugegriffen am 09.09.2015.
- Kim, S.Y.; Kim, Y.S. (2012):** A Virtual Driving System for Enhancing Efficient Driving Style. In: *International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering*, Jg. 7 (2012) Nr. 2, S. 291-296.
- King, L.A. (2008):** *Personal Goals and Life Dreams: Positive Psychology and Motivation in Daily Life*, Guildford Press, New York, USA 2008.
- Kircher, K.; Fors, C.; Ahlstrom, C. (2014):** Continuous Versus Intermittent Presentation of Visual Eco-Driving Advice. In: *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Jg. 24 (2014), S. 27–38.
- Kirk, R.E. (2013):** *Experimental Design*, Sage Publication, London, United Kingdom 2013.
- Klebersberg, D. (1982):** *Verkehrspsychologie*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 1982.
- Kohlberg, L. (1973):** *Collected Papers on Moral Development and Moral Education*, Center for Moral Education, Cambridge, Massachusetts, USA 1973.
- Koufaris, M. (2002):** Applying the Technology Acceptance Model and Flow Theory to Online Consumer Behavior. In: *Information Systems Research*, Jg. 13 (2002) Nr. 2, S. 205-223.
- Kourouthanassis, P.E.; Georgiadis, C.; Zamani, E.; Giaglis, G.M. (2010):** Explaining the Adoption of Mobile Internet Applications. In: *2010 Ninth International Conference on Mobile Business and 2010 Ninth Global Mobility Roundtable*, Band 9, Athen, Griechenland: IEEE Computer Society.
- Krcmar, H. (2015):** *Informationsmanagement (Band 6., überarbeitete Auflage)*, Springer Gabler, Berlin, Heidelberg 2015.
- Kruglanski, A.W.; Alan, S.; Lewis, T. (1972):** Retrospective Misattribution and Task Enjoyment. In: *Journal of Experimental Social Psychology*, Jg. 8 (1972) Nr. 6, S. 493-501.
- Krum, D.M.; Faenger, J.; Lathrop, B.; Sison, J.A.; Lien, A. (2008):** All Roads Lead to CHI: Interaction in the Automobile. In: *Proceedings of the CHI '08 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, S. 2387-2390, Florence, Italy: ACM.
- Kruse, R.E.; Paulsell, C.D. (1974):** Development of a Highway Driving Cycle for Fuel Economy Measurement. Ann Arbor, Michigan, USA, In: [https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/9101XOPB.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=Prior+to+1976&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CIndex%20Data%5C70thru75%5CTxt%5C00000027%5C9101XOPB.txt&Use\\_r=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyURL](https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/9101XOPB.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=Prior+to+1976&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CIndex%20Data%5C70thru75%5CTxt%5C00000027%5C9101XOPB.txt&Use_r=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyURL), zugegriffen am 15.05.2015.
- La Guardia, J.G.; Ryan, R.M.; Couchman, C.E.; Deci, E.L. (2000):** Within-Person Variation in Security of Attachment: A Self-Determination Theory Perspective on

- Attachment, Need Fulfillment, and Well-Being. In: *Journal of Personality and Social Psychology*, Jg. 79 (2000) Nr. 3, S. 367-384.
- Landau, M.; Loehmann, S.; Koerber, M. (2014):** Energy Flow: A Multimodal 'Ready' Indication For Electric Vehicles. In: *Adjunct Proceedings of the 6th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, S. 1-6, Seattle, WA, USA: ACM.
- Langlois, S. (2013):** ADAS HMI Using Peripheral Vision. Vorgestellt in: *Proceedings of the 5th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, Eindhoven, Niederlande, S. 74-81.
- Lawler, E.E. (1968):** Equity Theory as a Predictor of Productivity and Work Quality. In: *Psychological Bulletin*, Jg. 70 (1968), S. 596-610.
- Lawson, J. (2015):** Design and Analysis of Experiments with R, Chapman & Hall/Crc Texts in Statistical Science, Provo, Utah, USA 2015.
- Le, D.; Wang, H. (2010):** An Effective Feedback-Driven Approach for Energy Saving in Battery Powered Systems. Vorgestellt in: *18th International Workshop on Quality of Service (IWQoS)*, Beijing, China, S. 1-9.
- Lederer, A.; Maupin, D.; Sena, M.; Zhuang, Y. (2000):** The Technology Acceptance Model and the WWW. In: *Decision Support Systems*, Jg. 29 (2000) Nr. 3, S. 269-82.
- Lee, H.; Lee, W.; Lim, Y.-K. (2010):** The Effect of Eco-Driving System Towards Sustainable Driving Behavior. Vorgestellt in: *Proceedings of the CHI '10 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, Atlanta, Georgia, USA, S. 4255-4260.
- Lee, K.; Lee, S. (2003):** Cognitive Map Simulation Approach to Adjusting the Design Factors of the Electronic Commerce Web Sites. In: *Learning and Individual Differences*, Jg. 24 (2003) Nr. 1, S. 1-11.
- Lee, S.-S.; Lim, Y.-k.; Lee, K.-p. (2011):** A Long-term Study of User Experience Towards Interaction Designs That Support Behavior Change. Vorgestellt in: *CHI'11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, Vancouver, British Columbia, Canada, S. 2065-2070.
- Lee, Y.; Kozar, K.A.; Larsen, K.R.T. (2003):** The Technology Acceptance Model: Past, Present, and Future. In: *Communications of the Association for Information System*, Jg. 12 (2003) Nr. 1, S. 752-780.
- Lefemine, G.; Pedrini, G.; Secchi, C.; Tesauri, F.; Marzani, S. (2008):** Virtual Fixtures for Secondary Tasks. Vorgestellt in: *Human-Computer Interaction Symposium*, Mailand, Italien, S. 67-81.
- Leone, J. (2011):** Basic Psychological Needs Scales. Internet, In: <https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html?id=589c2202ed99e1d8d2380ed3&assetKey=AS:459762925084673@1486627431540>, zugegriffen am 09.03.2017.
- Lepper, M.R.; Greene, D.; Nisbett, R.E. (1973):** Undermining Children's Intrinsic Interest with Extrinsic Rewards: A Test of the "Overjustification" Hypothesis. In: *Journal of Personality and Social Psychology*, Jg. 28 (1973), S. 129-137.
- Levene, H. (1960):** Robust Tests for Equality of Variances (Band 1), Stanford University Press, Palo Alto, California, USA 1960.
- Levesque, C.; Copeland, K.J.; Pattie, M.D.; Deci, E.L. (2010):** Intrinsic and Extrinsic Motivation. In: *International Encyclopedia of Education*, Jg. 3 (2010), S. 618-623.
- Levesque, C.; Williams, G.C.; Elliot, D.; Pickering, M.A.; Bodenhamer, B.; Finley, P.J. (2007):** Validating the Theoretical Structure of the Treatment Self - Regulation Questionnaire (TSRQ) Across Three Different Health Behaviors. In: *Health Education Research*, Jg. 22 (2007) Nr. 5, S. 691-702.
- Lewis-Beck, M.; Bryman, A.; Futing Liao, T. (2004):** Research Methods: Maturation Effect. *The SAGE Encyclopedia of Social Science Research Methods*. Internet: SAGE Encyclopedia of Social Science Research Methods.
- LG Newsroom (2015):** LG Watch Urbane melds classic look with enhanced features. <http://www.lgnewsroom.com/2015/02/lg-watch-urbane-melds-classic-look-with-enhanced-features/>, zugegriffen am 15.12.2017.
- Li-Ping Tang, T. (1990):** Factors Affecting Intrinsic Motivation Among University Students in Taiwan. In: *Journal of Social Psychology*, Jg. 130 (1990) Nr. 2, S. 219-230.
- Li, G.; Lee, B.-L.; Chung, W.-Y. (2015):** Smartwatch-Based Wearable EEG System for Driver Drowsiness Detection. In: *IEEE Sensors Journal*, Jg. 15 (2015) Nr. 12, S. 7169-7180.

- Li, S.; Guo, Q.; Xin, L.; Cheng, B.; Li, K. (2016):** Fuel-saving Servo-loop Control for Adaptive Cruise Control System of Road Vehicles with Step-gear Transmission. In: IEEE Transactions on Vehicular Technology, Jg. 66 (2016) Nr. 3, S. 2033-2043.
- Li, S.E.; Xu, S.; Li, G.; Cheng, B. (2014):** Periodicity Based Cruising Control of Passenger Cars for Optimized Fuel Consumption. Vorgestellt in: Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Dearborn, Michigan, USA, S. 1097-1102.
- Lichte, K. (2013):** BMW Modellpflege-Maßnahmen zum Sommer 2013. *Presse- und Öffentlichkeitsarbeit*. Internet: BMW Group.
- Liimatainen, H. (2011):** Utilization of Fuel Consumption Data in an Ecodriving Incentive System for Heavy-Duty Vehicle Drivers. In: IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Jg. 12 (2011) Nr. 4, S. 1087-1095.
- Lin, D. (2013):** Die Fünf Quellen der Motivation bei der Nutzung von Enterprise Wikis. In: *International Conference on Wirtschaftsinformatik*, Band 41, Leipzig.
- Liu, L.; Karatas, C.; Li, H.; Tan, S.; Gruteser, M.; Yang, J.; Chen, Y.; Martin, R.P. (2015):** Toward Detection of Unsafe Driving with Wearables. In: *Proceedings of the 2015 Workshop on Wearable Systems and Applications*, S. 27-32, Florenz, Italien: ACM.
- Locke, E.A. (1965):** A Test of Atkinson's Formula for Predicting Choice Behavior. In: Psychological Reports, Jg. 16 (1965), S. 963-964.
- Locke, E.A. (1966):** The Relationship of Intentions To Level of Performance. In: Journal of Applied Psychology, Jg. 50 (1966) Nr. 1, S. 60-66.
- Locke, E.A. (1968):** Toward a Theory of Task Motivation and Incentives. In: Organizational Behavior and Human Performance, Jg. 3 (1968) Nr. 2, S. 157-189.
- Loehmann, S.; Landau, M.; Koerber, M.; Butz, A. (2014):** Heartbeat: Experience the Pulse of an Electric Vehicle. Vorgestellt in: Proceedings of the 6th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, S. 1-10.
- Loevinger, J. (1976):** Ego Development: Conceptions and Theories, Jossey-Bass, San Francisco, California, USA 1976.
- Loh, L.; Ong, Y. (1998):** The Adoption of Internet-based Stock Trading. A Conceptual Framework and Empirical Results. In: Journal of Information Technology, Jg. 13 (1998) Nr. 2, S. 81-94.
- Loock, C.-M.; Staake, T.; Thiesse, F. (2013):** Motivating Energy-Efficient Behavior with Green IS: An Investigation of Goal Setting and The Role of Defaults. In: MIS Quarterly, Jg. 37 (2013) Nr. 4, S. 1313-1332.
- Loumidi, A.K.; Mittag, S.; Lathrop, W.B.; Althoff, F. (2011):** Eco-driving Incentives in the North American Market. Vorgestellt in: Proceedings of the 3rd International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, Salzburg, Österreich, S. 185-192.
- Lundström, A. (2014):** Differentiated Driving Range: Exploring a Solution to the Problems with the "Guess-O-Meter" in Electric Cars. Vorgestellt in: Proceedings of the 6th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, Seattle, Washington, USA, S. 1-8.
- Lundström, A.; Bogdan, C. (2012):** COPE1-Taking Control over EV Range. Vorgestellt in: Adjunct Proceedings of the 4th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, Portsmouth, New Hampshire, USA, S. 17-18.
- Lundström, A.; Bogdan, C. (2014):** Having a Lead Foot? Exploring how to Visualize Energy Consumption and Driving in Electric Cars. Vorgestellt in: Adjunct Proceedings of the 6th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, Seattle, Washington, USA, S. 1-4.
- Lundström, A.; Bogdan, C.; Kis, F.; Olsson, I.; Fahlén, L. (2012a):** Enough Power to Move: Dimensions for Representing Energy Availability. Vorgestellt in: Proceedings of the 14th International Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services, San Francisco, California, USA, S. 201-210.
- Lundström, A.; Bogdan, C.; Kis, F.; Olsson, I.; Fahlén, L. (2012b):** EVERT: Energy Representations for Probing Electric Vehicle Practice. Vorgestellt in: CHI'12 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, Austin, Texas, USA, S. 2141-2146.
- MacLean, K.E. (2008):** Haptic Interaction Design for Everyday Interfaces. In: Reviews of Human Factors and Ergonomics, Jg. 4 (2008) Nr. 1, S. 149-194.

- Madden, T.J.; Ellen, P.S.; Ajzen, I. (1992):** A Comparison of the Theory of Planned Behavior and the Theory of Reasoned Action. In: *Personality and Social Psychology Bulletin*, Jg. 18 (1992) Nr. 1, S. 3-9.
- Madruga Filho, M.; Prendinger, H.; Tilma, T.; Lindner, M.; Santos, E.; Nakasone, A. (2012):** Practicing Eco-safe Driving at Scale. Vorgestellt in: CHI'12 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, Austin, Texas, USA, S. 2147-2152.
- Magaña, V.C.; Muñoz-Organero, M. (2011a):** Artemisa: An Eco-Driving Assistant for Android Os. Vorgestellt in: IEEE International Conference on Consumer Electronics-Berlin (ICCE-Berlin), S. 211-215.
- Magaña, V.C.; Muñoz-Organero, M. (2011b):** Artemisa: Early Design of an Eco-Driving Assistant. In: *Robótica e Inteligencia Ambiental*, S. 81-86, Huelva, Spanien.
- Magaña, V.C.; Muñoz-Organero, M.; Fernández-Montes, A.; Ortega, J.A. (2012):** Artemisa: Architecture of an Eco-Driving Assistant Based on the Anticipation. In: *Jornadas de ARCA. Sistemas Cualitativos y sus Aplicaciones en Diagnosis, Robótica e Inteligencia Ambiental*, Jg. 14 (2012) Nr. 1, S. 5.
- Mageau, G.A.; Ranger, F.; Joussemet, M.; Koestner, R.; Moreau, E.; Forest, J. (2015):** Validation of the Perceived Parental Autonomy Support Scale (P-PASS). In: *Canadian Journal of Behavioural Science*, Jg. 47 (2015) Nr. 3, S. 251-262.
- Mahoney, G.M.; Jones, N.W. (1957):** A Path-Goal Approach to Productivity. In: *Journal of Applied Psychology*, Jg. 41 (1957) Nr. 6, S. 345-353.
- Maier, G.W.; Kirchgeorg, M. (o. J.):** Stichwort: Motivation. Gabler Wirtschaftslexikon, <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/55007/motivation-v6.html>, zugegriffen am 23.07.2017.
- Malhotra, A.; Melville, N.P.; Watson, R.T. (2013):** Spurring Impactful Research on Information Systems for Environmental Sustainability. In: *MIS Quarterly*, Jg. 37 (2013) Nr. 4, S. 1265-1274.
- Manner, J.; Kohl, C.; Schermann, M.; Krcmar, H. (2013):** Effect of Non-Unified Interaction Design of In-Car Applications on Driving Performance, Situational Awareness and Task Performance. In: *Proceedings of the ACHI 2013 The Sixth International Conference on Advances in Computer-Human Interactions*, S. 28-34, Nice, Frankreich.
- Marett, K.; Otondo, R.F.; Taylor, G.S. (2013):** Assessing the Effects of Benefits and Institutional Influences on the Continued Use of Environmentally Munificent Bypass Systems in Long-Haul Trucking. In: *MIS Quarterly*, Jg. 37 (2013) Nr. 4, S. 1301-1312.
- Maslow, A.H. (1943):** A Theory of Human Motivation. In: *Psychological Review*, Jg. 50 (1943) Nr. 4, S. 370-396.
- Maslow, A.H. (1954):** *Motivation and Personality*, Harper & Row, New York 1954.
- Maslow, A.H. (1970):** *Motivation and Personality (2nd ed.)*, Harper & Row, New York 1970.
- Math, R.; Mahr, A.; Moniri, M.M.; Müller, C. (2013):** *OpenDS: A New Open-Source Driving Simulator for Research*, Dortmund, 2013.
- Math, R.; Müller, C. (2015).** Ver. 3.5program]. Internet: Müller, Christian.
- McAuley, E.; Duncan, T.; Tammen, V.V. (1989):** Psychometric Properties of the Intrinsic Motivation Inventory in a Competitive Sport Setting: A Confirmatory Factor Analysis. In: *Research Quarterly for Exercise and Sport*, Jg. 60 (1989) Nr. 1, S. 48-58.
- McClelland, D.C. (1961):** *The Achieving Society*, D. Van Nostrand, Princeton, New Jersey, USA 1961.
- McDougall, W. (1908):** *An Introduction to Social Psychology*, John W. Luce & Co., Boston, Massachusetts, USA 1908.
- McGregor, D. (1960):** *The Human Side of Enterprise*, McGraw-Hill, New York, USA 1960.
- McIlroy, R.C.; Stanton, N.A.; Harvey, C. (2014):** Getting Drivers to do the Right Thing: A Review of the Potential for Safely Reducing Energy Consumption through Design. In: *IET Intelligent Transport Systems*, Jg. 8 (2014) Nr. 4, S. 388-397.
- McIlroy, R.C.; Stanton, N.A.; Harvey, C.; Robertson, D. (2013):** Sustainability, Transport and Design: Reviewing the Prospects for Safely Encouraging Eco-driving. Vorgestellt in: *Proceedings of the 5th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, Eindhoven, Niederlande, S. 278-284.
- Mento, A.J.; Steel, R.P.; Karren, R.J. (1987):** Meta-Analytic Study of the Effect of Goal Setting on Task Performance: 1966-1984. In: *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, Jg. 39 (1987) Nr. 1, S. 52-83.

- Meschtscherjakov, A.; Wilfinger, D.; Scherndl, T.; Tscheligi, M. (2009):** Acceptance of Future Persuasive In-Car Interfaces Towards a More Economic Driving Behaviour. Vorgestellt in: AutomotiveUI '09 1st International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, Essen, S. 81-88.
- Methodenberatung Universität Zürich (2016):** Friedman-Test.  
<http://www.methodenberatung.uzh.ch/de/datenanalyse/unterschiede/zentral/friedman.html>, zugegriffen am 14.07.2017.
- Meurer, J.; Lawo, D.; Janßen, L.; Wulf, V. (2016):** Designing Mobility Eco-Feedback for Elderly Users. Vorgestellt in: Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, San Jose, California, USA, S. 921-926.
- Miller, M. (2015):** The Internet of Things: How Smart TVs, Smart Cars, Smart Homes, and Smart Cities are Changing the World. (Aufl. 1), Pearson Education, Indianapolis, Indiana, USA 2015.
- Miserandino, M. (1996):** Children Who Do Well in School: Individual Differences in Perceived Competence and Autonomy in Above-Average Children. In: Journal of Educational Psychology, Jg. 88 (1996), S. 203-214.
- Montgomery, J.; Kusano, K.D.; Gabler, H.C. (2014):** Age and Gender Differences in Time to Collision at Braking from the 100-car Naturalistic Driving Study. In: Traffic injury prevention, Jg. 15 (2014) Nr. 1, S. 15-20.
- Moore, G.C.; Benbasat, I. (1991):** Development of an Instrument to Measure the Perceptions of Adopting an Information Technology Innovation. In: Information Systems Research, Jg. 2 (1991) Nr. 3, S. 192-222.
- Moraveji, N.; Akasaka, R.; Pea, R.; Fogg, B.J. (2011):** The Role of Commitment Devices and Self-Shaping in Persuasive Technology. In: *Proceedings of the CHI '11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, S. 1591-1596, Vancouver, British Columbia, Canada: ACM.
- Moss, J.A.; Barbuto, J.E. (2004):** Machiavellianism's Association with Sources of Motivation and Downward Influence Strategies. In: Psychological Reports, Jg. 94 (2004) Nr. 3, S. 933-943.
- Mossholder, K.W. (1980):** Effects of Externally Mediated Goal Setting on Intrinsic Motivation: A Laboratory Experiment. In: Journal of Applied Psychology, Jg. 65 (1980) Nr. 2, S. 202-210.
- Motonaga, Y.; Saito, K. (2012):** Eco-Drive Support Device and Method. US Patent Nr. US 8,224,560 B2, Washington, DC, USA: United States Patent and Trademark Office.
- Mulder, M.; Abbink, D.A.; van Paassen, M.M.; Mulder, M. (2011):** Design of a Haptic Gas Pedal for Active Car-Following Support. In: IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Jg. 12 (2011) Nr. 1, S. 268-279.
- Mulder, M.; Mulder, M.; Van Paassen, M.M.; Abbink, D.A. (2008):** Haptic Gas Pedal Feedback. In: Ergonomics, Jg. 51 (2008) Nr. 11, S. 1710-1720.
- Murray, E.J. (1964):** Motivation and Emotion, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA 1964.
- Müsseler, J. (2011):** Allgemeine Psychologie. (Aufl. 2, neu bearbeitete Auflage), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2011.
- Myers, D.G. (2014):** Psychologie, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2014.
- Nam, E.K.; Giannelli, R. (2005):** Fuel Consumption Modeling of Conventional and Advanced Technology Vehicles in the Physical Emission Rate Estimator (PERE). US Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA, 2005.
- Naylor, J.C.; Pritchard, R.D.; Ilgen, D.R. (1980):** A Theory of Behavior in Organization, Academic Press, New York, USA 1980.
- Nees, M.A.; Gable, T.; Jeon, M.; Walker, B.N. (2014):** Prototype Auditory Displays for a Fuel Efficiency Driver Interface. In: *The 20th International Conference on Auditory Display (ICAD-2014)*, New York, USA.
- Neider, L.L. (1980):** An Experimental Field Investigation Utilizing an Expectancy Theory View of Participation. In: Organizational Behavior and Human Performance, Jg. 26 (1980) Nr. 3, S. 425-442.
- Neumann, I.; Franke, T.; Cocron, P.; Bühler, F.; Krems, J.F. (2015):** Eco-Driving Strategies in Battery Electric Vehicle Use - How Do Drivers Adopt Over Time? In: IET Intelligent Transport Systems, Jg. 9 (2015) Nr. 7, S. 746-753.

- Ng, A.W.Y.; Chan, A.H.S. (2012):** Finger Response Times to Visual, Auditory and Tactile Modality Stimuli. Vorgestellt in: Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, Hong Kong, China, S. 1449-1454.
- Ngo, V.D.; Colin Navarrete, J.A.; Hofman, T.; Steinbuch, M.; Serrarens, A. (2013):** Optimal Gear Shift Strategies for Fuel Economy and Driveability. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, Jg. 227 (2013) Nr. 10, S. 1398–1413.
- Niemiec, C.P.; Lynch, M.F.; Vansteenkiste, M.; Bernstein, J.; Deci, E.L.; Ryan, R.M. (2006):** The Antecedents and Consequences of Autonomous Self-Regulation for College: A Self-Determination Theory Perspective on Socialization. In: Journal of Adolescence, Jg. 29 (2006) Nr. 5, S. 761-775.
- Nissan (2008a):** ECO Pedal. [http://www.nissan-global.com/EN/TECHNOLOGY/OVERVIEW/eco\\_pedal.html](http://www.nissan-global.com/EN/TECHNOLOGY/OVERVIEW/eco_pedal.html), zugegriffen am 15.12.2017.
- Nissan (2008b):** World First Eco Pedal Helps Reduce Fuel Consumption. <http://www.nissan-global.com/EN/NEWS/2008/STORY/080804-02-e.html>, zugegriffen am 12.06.2015.
- Nix, G.A.; Ryan, R.M.; Manly, J.B.; Deci, E.L. (1999):** Revitalization through Self-Regulation: The Effects of Autonomous and Controlled Motivation on Happiness and Vitality. In: Journal of Experimental Social Psychology, Jg. 35 (1999) Nr. 3, S. 266-284.
- Notz, W.W. (1975a):** Satisfaction with Organizational Membership as a Function of Changes in the Level of an Extrinsic Reward: A Natural Field, Experiment. Unveröffentlichtes Manuscript, University of Manitoba.
- Notz, W.W. (1975b):** Work Motivation and the Negative Effects of Extrinsic Rewards: A Review with Implications for Theory and Practice. In: American Psychologist, Jg. 30 (1975b) Nr. 9, S. 884-891.
- Nunnally, J.C. (1978):** Psychometric Theory (Band 1), McGraw-Hill Book Company, New York 1978.
- O'Cass, A.; Fenech, T. (2003):** Web Retailing Adoption: Exploring the Nature of Internet Users Web Retailing Behavior. In: Retailing and Consumer Services, Jg. 10 (2003) Nr. 1, S. 81-94.
- o. A. (2015):** Kfz energetisch betrachtet. <http://www.chemie.fu-berlin.de/chemistry/general/kfz-energetisch.html>, zugegriffen am 26.12.2015.
- o. A. (o. J.):** The Content Theories of Motivation. [https://sielearning.tafensw.edu.au/MBA/9791F/BusinessServices/LO/1207\\_020138\\_605F\\_02\\_wi/1207\\_020138\\_605F\\_0204\\_wi.htm](https://sielearning.tafensw.edu.au/MBA/9791F/BusinessServices/LO/1207_020138_605F_02_wi/1207_020138_605F_0204_wi.htm), zugegriffen am 01.03.2017.
- Olejnik, S.F.; Algina, J. (1987):** An Analysis of Statistical Power for Parametric Ancova and Rank Transform Ancova. In: Communications in Statistics - Theory and Methods, Jg. 16 (1987) Nr. 7, S. 1923-1949.
- Olejnik, S.F.; Algina, J. (2003):** Generalized Eta and Omega Squared Statistics: Measures of Effect Size for Some Common Research Designs. In: Psychological Methods, Jg. 8 (2003) Nr. 4, S. 434–447.
- Ormrod, J.E. (2006):** Educational Psychology: Developing Learners. (Aufl. 5, überarbeitet), Pearson Merrill Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, USA 2006.
- Oxford-Online-Dictionary (2015):** Definition of behaviour. <http://www.oxforddictionaries.com/de/definition/englisch/behaviour>, zugegriffen am 09.09.2015.
- Oxford-Online-Dictionary (2017):** Definition of vibrotactile. <https://en.oxforddictionaries.com/definition/vibrotactile>, zugegriffen am 07.04.2017.
- Pace, T.; Ramalingam, S.; Roedl, D. (2007):** Celerometer and Idling Reminder: Persuasive Technology for School Bus Eco-Driving. Vorgestellt in: Proceedings of the CHI '07 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, San Jose, California, USA, S. 2085-2090.
- Parker, D.; Manstead, A.S.R.; Stadling, S.G. (1995):** Extending the Theory of Planned Behavior: The Role of Personal Norm. In: British Journal of Social Psychology, Jg. 34 (1995) Nr. 2, S. 127-138.

- Patrick, B.C.; Skinner, E.A.; Connell, J.P. (1993):** What Motivates Children's Behavior and Emotion? Joint Effects of Perceived Control and Autonomy in The Academic Domain. In: *Journal of Personality and Social Psychology*, Jg. 65 (1993) Nr. 4, S. 781-791.
- Pavlou, P.A. (2003):** Consumer Acceptance of Electronic Commerce: Integrating Trust and Risk with the Technology Acceptance Model. Vorgestellt in: 17th Americas Conference on Information Systems (AMCIS), Detroit, Michigan, USA, S. 69-103.
- Pawlowsky, G. (2000):** Sexualtrieb. In: *Wörterbuch der Psychotherapie*. Stumm, G.; Pritz, A. (Hrsg.). Springer-Verlag, Wien, Österreich 2000, S. 642-642.
- Pelletier, L.G.; Tuson, K.M.; Haddad, N.K. (1997):** Client Motivation for Therapy Scale: A Measure of Intrinsic Motivation, Extrinsic Motivation, and Amotivation for Therapy. In: *Journal of Personality Assessment*, Jg. 68 (1997) Nr. 2, S. 414-435.
- Pepels, W. (2012):** *Handbuch des Marketing (Band 6., überarbeitete und erweiterte Auflage)*, Oldenbourg Verlag, München 2012.
- Perugini, M.; Bagozzi, R.P. (2001):** The Role of Desires and Anticipated Emotions in Goal-Directed Behaviours: Broadening and Deepening the Theory of Planned Behaviour. In: *British Journal of Social Psychology*, Jg. 40 (2001) Nr. 1, S. 79-98.
- Perugini, M.; Conner, M. (2000):** Predicting and Understanding Behavioral Volitions: The Interplay Between Goals and Behaviors. In: *European Journal of Social Psychology*, Jg. 30 (2000) Nr. 5, S. 705-731.
- Petkov, P.; Goswami, S.; Köbler, F.; Krcmar, H. (2012):** Personalised Eco-Feedback as a Design Technique for Motivating Energy Saving Behaviour at Home. Vorgestellt in: *Proceedings of the 7th Nordic Conference on Human-Computer Interaction: Making Sense Through Design*, Kopenhagen, Dänemark, S. 587-596.
- Pfleging, B.; Schneegass, S.; Schmidt, A. (2012):** Multimodal Interaction in the Car: Combining Speech and Gestures on the Steering Wheel. In: *Proceedings of the 4th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, S. 155-162, Portsmouth, New Hampshire, USA: ACM.
- Philip, P.; Taillard, J.; Quera-Salva, M.; Bioulac, B.; Åkerstedt, T. (1999):** Simple Reaction Time, Duration of Driving and Sleep Deprivation in Young versus Old Automobile Drivers. In: *Journal of Sleep research*, Jg. 8 (1999) Nr. 1, S. 9-14.
- Piaget, J. (1972):** Intellectual Evolution from Adolescence to Adulthood. In: *Human Development*, Jg. 15 (1972) Nr. 1, S. 1-12.
- Pintrich, P.R.; Smith, D.A.F.; Garcia, T.; McKeachie, W.J. (1991):** *Manual for the Use of the Motivated Strategies for Learning Questionnaire (MSLQ)*. National Center for Research to Improve to Improve Postsecondary Teaching and Learning, Ann Arbor, Michigan, USA, 1991.
- Pitts, M.J.; Burnett, G.; Skrypchuk, L.; Wellings, T.; Attridge, A.; Williams, M.A. (2012):** Visual-Haptic Feedback Interaction in Automotive Touchscreens. In: *Displays*, Jg. 33 (2012) Nr. 1, S. 7-16.
- Plant, R.W.; Ryan, R.M. (1985):** Intrinsic Motivation and the Effects of Self-Consciousness, Self-Awareness, and Ego-Involvement: An Investigation of Internally-Controlling Styles. In: *Journal of Personality*, Jg. 53 (1985) Nr. 3, S. 435-449.
- Plouffe, C.R.; Hulland, J.S.; Vandenbosch, M. (2001):** Richness Versus Parsimony in Modeling Technology Adoption decisions: Understanding Merchant Adoption of a Smart Cart Payment System. In: *Information Systems Research*, Jg. 12 (2001) Nr. 2, S. 208-222.
- Poitschke, T.; Ablaßmeier, M.; Reifinger, S.; Rigoll, G. (2007):** A Multifunctional VR-Simulator Platform for the Evaluation of Automotive User Interfaces. In: *Human-Computer Interaction. HCI Applications and Services, LNCS 4553*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2007, S. 1120-1129.
- Politis, I.; Brewster, S.A.; Pollick, F. (2013):** Evaluating Multimodal Driver Displays of Varying Urgency. Vorgestellt in: *Proceedings of the 5th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, Eindhoven, Niederlande, S. 92-99.
- Politis, I.; Brewster, S.A.; Pollick, F. (2014):** Evaluating Multimodal Driver Displays under Varying Situational Urgency. Vorgestellt in: *Proceedings of the 32nd annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, Toronto, Ontario, Canada, S. 4067-4076.

- Porter, L.W.; Lawler, E.E. (1968):** Managerial Attitudes and Performance, Richard D. Irwin, Homewood, Illinois, USA 1968.
- Pritchard, R.D. (1969):** Equity Theory: A Review and Critique. In: Organizational Behavior and Human Performance, Jg. 4 (1969) Nr. 2, S. 176-211.
- Quenouille, M.H. (1953):** The Design and Analysis of Experiment, Charles Griffin & Company Limited, London, Vereinigtes Königreich 1953.
- Ragu-Nathan, T.S.; Tarafdar, M.; Ragu-Nathan, B.S.; Tu, Q. (2008):** The Consequences of Technostress for End Users in Organizations. In: Information Systems Research, Jg. 19 (2008) Nr. 4, S. 417-433.
- Rakotonirainy, A.; Haworth, N.; Saint-Pierre, G.; Delhomme, P. (2011):** Research Issues in Eco-Driving. In: *22nd International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*, Washington, DC, USA: Queensland University of Technology and French Institute in Science and Technology of Transport.
- Rat der Europäischen Union (1991):** Richtlinie 91/441/EWG des Rates vom 26. Juni 1991 zur Änderung der Richtlinie 70/220/EWG zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen. (Band 21).
- Ratcliff, R. (1978):** A Theory of Memory Retrieval. In: Psychological Review, Jg. 85 (1978) Nr. 2, S. 59-108.
- Ratcliff, R. (1993):** Methods for Dealing with Reaction Time Outliers. In: Psychological Bulletin, Jg. 114 (1993) Nr. 3, S. 510.
- Rauh, N.; Franke, T.; Krems, J.F. (2015):** User Experience with Electric Vehicles while Driving in a Critical Range Situation – A Qualitative Approach (in press). In: Intelligent Transport Systems, IET, (2015), S. 1-14.
- Recarte, M.A.; Nunes, L.M. (2003):** Mental Workload While Driving: Effects on Visual Search, Discrimination, and Decision Making. In: Journal of Experimental Psychology: Applied, Jg. 9 (2003) Nr. 2, S. 119.
- Reeve, J.; Bolt, E.; Cai, Y. (1999):** Autonomy-Supportive Teachers: How they Teach and Motivate Students. In: Journal of Educational Psychology, Jg. 91 (1999) Nr. 3, S. 537-548.
- Reuters, T. (2013):** Top Peer Reviewed Journals - Psychiatry & Psychology. Ames, Iowa, USA, In: zugegriffen am
- Rheinberg, F. (2008):** Motivation (Band 6). (Aufl. 7, aktualisiert), Kohlhammer Urban Taschenpcher, Stuttgart 2008.
- Rheinberg, F.; Krug, S. (2005):** Motivationsförderung im Schulalltag. (Aufl. 3, korrigiert), Hogrefe, Göttingen [u. a.] 2005.
- Rheinberg, F.; Vollmeyer, R. (2012):** Motivation. (Aufl. 8, aktualisiert), Kohlhammer Urban Taschenpcher, Stuttgart 2012.
- Richter, C.P. (1927):** Animal Behavior and Internal Drives. In: The Quarterly Review of Biology, Jg. 2 (1927) Nr. 3, S. 307-343.
- Richter, H.; Ecker, R.; Deisler, C.; Butz, A. (2010):** HapTouch and the 2+1 State Model: Potentials of Haptic Feedback on Touch Based In-Vehicle Information Systems. Vorgestellt in: Proceedings of the 2nd International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, S. 72-79.
- Riener, A.; Ferscha, A.; Frech, P.; Hackl, M.; Kaltenberger, M. (2010):** Subliminal Vibrotactile Based Notification of CO2 Economy While Driving. Vorgestellt in: Proceedings of the 2nd International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, S. 92-101.
- Riener, A.; Reder, J. (2014):** Collective Data Sharing to Improve on Driving Efficiency and Safety. Vorgestellt in: Adjunct Proceedings of the 6th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, Seattle, Washington, USA, S. 1-6.
- Ríos-Aguilar, S.; Merino, J.L.M.; Sánchez, A.M.; Valdivieso, Á.S. (2015):** Variation of the Heartbeat and Activity as an Indicator of Drowsiness at the Wheel Using a Smartwatch. In: International Journal of Artificial Intelligence and Interactive Multimedia, Jg. 3 (2015) Nr. 3, S. 96-100.

- Robbins, R.J. (1994):** An Assessment of Perceptions Parental Autonomy Support and Control: Child and Parent Correlates. *Unpublished Doctoral Dissertation*. Department of Psychology, University of Rochester.
- Roberts, S.C.; Horrey, W.J.; Liang, Y. (2012):** Effect of Performance Feedback (or Lack Thereof) on Driver Calibration. Vorgestellt in: Proceedings of the 4th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, S. 67-74.
- Rogers, C.R. (1951):** Client-Centered Therapy: Its Current Practice, Implications and Theory, Houghton Mifflin, London, Vereinigtes Königreich 1951.
- Rogers, C.R. (1961):** On Becoming a Person: A Psychotherapist's View of Psychotherapy. (Aufl. 2), Houghton Mifflin Harcourt, New York, USA 1961.
- Rommerskirchen, C.; Helmbrecht, M.; Bengler, K. (2013):** Increasing Complexity of Driving Situations and its Impact on an ADAS for Anticipatory Assistance for the Reduction of Fuel Consumption. Vorgestellt in: Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2013 IEEE, Gold Coast, Australien, S. 573-578.
- Rose, G.; Straub, D. (1998):** Predicting General IT Usae: Applying TAM to the Arabic World. In: Journal of Global Information Management (JGIM), Jg. 6 (1998) Nr. 3, S. 39-46.
- Rothermund, K.; Eder, A. (2011):** Allgemeine Psychologie: Motivation und Emotion. (Aufl. 1), VS Verlag für Sozialwissenschaften, Online 2011.
- Rotter, J.B. (1966):** Generalized Expectancies for Internal Versus External Control of Reinforcement. In: Psychological Monographs, Jg. 80 (1966) Nr. 1, S. 1-28.
- Rouzikhah, H.; King, M.; Rakotonirainy, A. (2013):** Examining the Effects of an Eco-Driving Message on Driver Distraction. In: Accident Analysis & Prevention, Jg. 50 (2013), S. 975-983.
- Rowley, J.; Slack, F. (2004):** Conducting a Literature Review. In: Management Research News, Jg. 27 (2004) Nr. 6, S. 31-39.
- Ryan, R.M. (1982):** Control and Information in the Intrapersonal Sphere: An Extension of Cognitive Evaluation Theory. In: Journal of Personality and Social Psychology, Jg. 43 (1982) Nr. 3, S. 450-461.
- Ryan, R.M. (1995):** Psychological Needs and the Facilitation of Integrative Processes. In: Journal of Personality, Jg. 63 (1995) Nr. 3, S. 397-427.
- Ryan, R.M. (2010):** An Examination of the Factor Structure and Scale Reliability of the Work Motivation Scale, the Motivation Sources Inventory. In: Journal of Applied Social Psychology, Jg. 40 (2010) Nr. 6, S. 1566-1577.
- Ryan, R.M.; Chirkov, V.I.; Little, T.D.; Sheldon, K.M.; Timoshina, E.; Deci, E.L. (1999):** The American Dream in Russia: Extrinsic Aspirations and Well-Being in Two Cultures. In: Personality and Social Psychology Bulletin, Jg. 25 (1999) Nr. 12, S. 1509-1524.
- Ryan, R.M.; Connell, J.P. (1989):** Perceived Locus of Causality and Internalization: Examining Reasons for Acting in Two Domains. In: Journal of Personality and Social Psychology, Jg. 57 (1989) Nr. 5, S. 749-761.
- Ryan, R.M.; Connell, J.P.; Plant, R.W. (1990):** Emotions in Nondirected Text Learning. In: Learning and Individual Differences, Jg. 2 (1990) Nr. 1, S. 1-17.
- Ryan, R.M.; Deci, E.L. (2000a):** Intrinsic and Extrinsic Motivations: Classic Definitions and New Directions. In: Contemporary Educational Psychology, Jg. 25 (2000a) Nr. 1, S. 54-67.
- Ryan, R.M.; Deci, E.L. (2000b):** Self-Determination Theory and the Facilitation of Intrinsic Motivation, Social Development, and Well-Being. In: American Psychologist, Jg. 55 (2000b) Nr. 1, S. 68-78.
- Ryan, R.M.; Frederick, C.M. (1997):** On Energy, Personality and Health: Subjective Vitality as a Dynamic Reflection of Well-Being. In: Journal of Personality, Jg. 65 (1997) Nr. 3, S. 529-565.
- Ryan, R.M.; Frederick, C.M.; Leps, D.; Rubio, N.; Sheldon, K.M. (1997):** Intrinsic Motivation and Exercise Adherence. In: International Journal of Sport Psychology, Jg. 28 (1997) Nr. 4, S. 335-354.
- Ryan, R.M.; Koestner, R.; Deci, E.L. (1991):** Ego Involved Persistence: When Free-Choice Behavior is not Intrinsically Motivated. In: Motivation and Emotion, Jg. 15 (1991) Nr. 3, S. 185-205.
- Ryan, R.M.; Mims, V.; Koestner, R. (1983):** Relation of Reward Contingency and Interpersonal Context to Intrinsic Motivation: A Review and Test Using Cognitive

- Evaluation Theory. In: *Journal of Personality and Social Psychology*, Jg. 45 (1983) Nr. 4, S. 736-750.
- Ryan, R.M.; Plant, R.W.; O'Malley, S. (1995):** Initial Motivations for Alcohol Treatment: Relations With Patient Characteristics, Treatment Involvement and Dropout. In: *Addictive Behaviors*, Jg. 20 (1995) Nr. 3, S. 279-297.
- Ryan, R.M.; Rigby, S.; King, K. (1993):** Two Types of Religious Internalization and their Relations to Religious Orientations and Mental Health. In: *Journal of Personality and Social Psychology*, Jg. 65 (1993) Nr. 3, S. 586-596.
- Rydström, A.; Grane, C.; Bengtsson, P. (2009):** Driver Behaviour During Haptic and Visual Secondary Tasks. Vorgestellt in: *Proceedings of the 1st International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, Essen, S. 121-127.
- Saboohi, Y.; Farzaneh, H. (2009):** Model for Developing an Eco-Driving Strategy of a Passenger Vehicle Based on the Least Fuel Consumption. In: *Applied Energy*, Jg. 86 (2009) Nr. 10, S. 1925-1932.
- Salisbury, W.D.; Chin, W.W.; Gopal, A.; Newsted, P.R. (2002):** Research Report: Better Theory through Measurement - Developing a Scale to Capture Consensus on Appropriation. In: *Information Systems Research*, Jg. 13 (2002) Nr. 1, S. 91-103.
- Salvucci, D.; Boer, E.; Liu, A. (2001):** Toward an Integrated Model of Driver Behavior in Cognitive Architecture. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Jg. 1779 (2001) Nr. 1, S. 9-16.
- Samoutis, G.A.; Soteriades, E.S.; Stoffers, H.E.; Zachariadou, T.; Philalithis, A.; Lionis, C. (2008):** Designing a Multifaceted Quality Improvement Intervention in Primary Care in a Country where General Practise is Seeking Recognition: The Case of Cyprus. In: *BMC Health Services Research*, Jg. 8 (2008) Nr. 1, S. 1-9.
- Schade, J.; Baum, M. (2007):** Reactance or Acceptance? Reactions towards the Introduction of Road Pricing. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Jg. 41 (2007) Nr. 1, S. 41-48.
- Schoembs, H. (2003):** Zukunftsfähiges Energiebewusstsein - Neuer Schwerpunkt Für Eine Nachhaltige Umweltbildung. Vorgestellt in: *ANU-Bundestagung*, Springe.
- Schwarzer, C.M. (2016):** Was Dieselgate bewirkt hat.  
<http://www.zeit.de/mobilitaet/2016-09/volkswagen-dieselgate-ein-jahr-profit>,  
 zugegriffen am 04.11.2016.
- SCImago (2013):** Journal Rankings in Psychology.  
<http://www.scimagojr.com/journalrank.php?area=3200>, zugegriffen am 09.09.2015.
- Seewald, P.; Josten, J.; Zlocki, A.; Eckstein, L. (2013):** User Acceptance Evaluation Approach of Energy Efficient Driver Assistance Systems. In: *9th ITS European Congress*, Dublin, Irland.
- Segars, A.H.; Grover, V. (1993):** Re-examining Perceived Ease of Use and Usefulness: A Confirmatory Factor Analysis. In: *MIS Quarterly*, Jg. 17 (1993) Nr. 4, S. 517-527.
- Seligman, C.; Darley, J.M. (1977):** Feedback as a Means of Decreasing Residential Energy Consumption. In: *Journal of Applied Psychology*, Jg. 62 (1977) Nr. 4, S. 363-368.
- Seligman, M. (1975):** Helplessness: On Depression, Development, and Death, W. H. Freeman, San Francisco, California, USA 1975.
- Selim, H.M. (2003):** An Empirical Investigatin of Students Acceptance of Course Websites. In: *Computer & Education*, Jg. 40 (2003) Nr. 4, S. 343-360.
- Sethumadhavan, A. (2011):** In-Vehicle Technologies and Driver Distraction. In: *Ergonomics in Design: The Quarterly of Human Factors Applications*, Jg. 19 (2011) Nr. 4, S. 29-30.
- Shah, J.Y.; Gardner, W.L. (2008):** *Handbook of Motivation Science*, The Guilford Press, New York, USA 2008.
- Shahab, Q.; Terken, J.; Eggen, B. (2010):** Auditory Messages for Speed Advice in Advanced Driver Assistance Systems. Vorgestellt in: *Proceedings of the 2nd International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, S. 50-56.
- Shapiro, S.S.; Wilk, M.B.; Chen, H.J. (1968):** A Comparative Study of Various Tests for Normality. In: *Journal of the American Statistical Association*, Jg. 63 (1968) Nr. 324, S. 1343-1372.
- Sheldon, K.M. (1995):** Creativity and Self-Determination in Personality. In: *Creativity Research Journal*, Jg. 8 (1995) Nr. 1, S. 25-36.

- Sheldon, K.M. (2008):** The Interface of Motivation Science and Personology: Self-Concordance, Quality Motivation, and Multilevel Personality Integration. In: Handbook of Motivation. Shah, J.Y.; Gardner, W.L. (Hrsg.). Guilford Press, New York, USA; London, Vereintes Königreich 2008, S. 465-480.
- Sheldon, K.M.; Ryan, R.M.; Reis, H. (1996):** What Makes for a Good Day? Competence and Autonomy in the Day and in the Person. In: Personality and Social Psychology Bulletin, Jg. 22 (1996) Nr. 12, S. 1270-1279.
- Sheppard, B.H.; Hartwick, J.; Warshaw, P.R. (1988):** The Theory of Reasoned Action: A Meta-Analysis of Past Research With Recommendations for Modifications and Future Research. In: Journal of Consumer Research, Jg. 15 (1988), S. 325-343.
- Shi, Z.; Zou, H.; Rank, M.; Chen, L.; Hirche, S.; Muller, H.J. (2010):** Effects of Packet Loss and Latency on the Temporal Discrimination of Visual-Haptic Events. In: IEEE Transactions on Haptics, Jg. 3 (2010) Nr. 1, S. 28-36.
- Shih, H.-P. (2004):** An Empirical Study on Predicting User Acceptance of E-shopping on the Web. In: Information & Management, Jg. 41 (2004) Nr. 3, S. 351-69.
- Shim, L.; Liu, P.; Politis, I.; Regener, P.; Brewster, S.; Pollick, F. (2015):** Evaluating Multimodal Driver Displays of Varying Urgency for Drivers on the Autistic Spectrum. Vorgestellt in: Proceedings of the 7th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, Nottingham, Vereinigtes Königreich, S. 133-140.
- Shirley, E. (1977):** A Non-parametric Equivalent of Williams' Test for Contrasting Increasing Dose Levels of a Treatment. In: Biometrics, Jg. 33 (1977) Nr. 2, S. 386-389.
- Siewiorek, D.; Smailagic, A.; Hornyak, M. (2002):** Multimodal Contextual Car-Driver Interface. Vorgestellt in: Proceedings. Fourth IEEE International Conference on Multimodal Interfaces, Washington, DC, USA, S. 367-373.
- Siller, H. (o. J.-a):** Stichwort: Bewusstsein. Gabler Wirtschaftslexikon,  
<http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/1408490/bewusstsein-v3.html>, zugegriffen  
am 26.01.2017.
- Siller, H. (o. J.-b):** Stichwort: Verhalten. Gabler Wirtschaftslexikon,  
<http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/1408500/verhalten-v3.html>, zugegriffen am  
16.11.2016.
- Sivak, M.; Schoettle, B. (2012):** Eco-Driving: Strategic, Tactical, and Operational Decisions of the Driver that Influence Vehicle Fuel Economy. In: Transport Policy, Jg. 22 (2012), S. 96-99.
- Skinner, B.F. (1938):** The Behavior of Organisms: An Experimental Analysis, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA 1938.
- Skinner, B.F. (1953):** Science and Human Behavior, Macmillan, New York, USA 1953.
- Skinner, B.F. (1971):** Beyond Freedom and Dignity, Bantam Books, New York, USA 1971.
- Soanes, C.; Hawker, S. (2006):** Compact Oxford English Dictionary for Students: For University and College Students, Oxford University Press, Oxford (GB), New York (US) 2006.
- Sohn, M.; Nam, T.; Lee, W. (2009):** Designing with Unconscious Human Behaviors for Eco-friendly Interaction. Vorgestellt in: CHI'09 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems, S. 2651-2654.
- Statista (2015):** Absatz von Smartwatches in Deutschland in den Jahren 2013 bis 2015 (in 1.000 Stück). <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/459093/umfrage/absatz-von-smartwatches-in-deutschland/>, zugegriffen am 02.12.2015.
- Staubach, M.; Kassner, A.; Fricke, N.; Schiebl, C. (2012):** Driver Reactions on Ecological Driver Feedback via Different HMI Modalities. Vorgestellt in: Proceedings of the 19th World Congress on ITS, Wien Österreich.
- Staw, B.M. (1976):** Intrinsic and Extrinsic Motivation, Silver Burdett, Morristown, New Jersey, USA 1976.
- Stern, P.C. (1992):** What Psychology Knows about Energy Conservation. In: American Psychologist, Jg. 47 (1992) Nr. 10, S. 1224.
- Stern, P.C. (2000):** Toward a Coherent Theory of Environmentally Significant Behavior. In: Journal of Social Issues, Jg. 56 (2000) Nr. 3, S. 407-424.
- Stern, P.C. (2011):** Contributions of Psychology to Limiting Climate Change. In: American Psychologist, Jg. 66 (2011) Nr. 4, S. 303.

- Stillwater, T.; Kurani, K.S. (2013):** Drivers Discuss Ecodriving Feedback: Goal Setting, Framing, and Anchoring Motivate new Behaviors. In: Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, Jg. 19 (2013), S. 85-96.
- Strömberg, H.; Andersson, P.; Almgren, S.; Ericsson, J.; Karlsson, M.; Nåbo, A. (2011):** Driver Interfaces for Electric Vehicles. Vorgestellt in: Proceedings of the 3rd International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, S. 177-184.
- Suh, B.; Han, I. (2002):** Effect of Trust on Customer Acceptance of Internet Banking. In: Electronic Commerce Research and Applications, Jg. 1 (2002) Nr. 3, S. 247-263.
- Suh, B.; Han, I. (2003):** The Impact of Customer Trust and Perception of Security Control on the Acceptance of Electronic Commerce. In: International Journal of Electronic Commerce, Jg. 7 (2003) Nr. 3, S. 135-61.
- Sumikawa, D.A. (1985):** Guidelines for the Integration of Audio Cues into Computer User Interfaces. Lawrence Livermore National Lab., Livermore, California, USA, 1985.
- Summala, H.; Lamble, D.; Laakso, M. (1998):** Driving Experience and Perception of the Lead Car's Braking when Looking at In-car Targets. In: Accident Analysis & Prevention, Jg. 30 (1998) Nr. 4, S. 401-407.
- Taylor, S.; Todd, P.A. (1995):** Understanding Information Technology Usage: A Test of Competing Models. In: Information Systems Research, Jg. 6 (1995) Nr. 2, S. 144-176.
- Teo, T.; Lim, V.; Lai, R. (1999):** Intrinsic and Extrinsic Motivation in Internet Usage. In: Omega, Jg. 27 (1999) Nr. 1, S. 25-37.
- Thalen, J.P. (2006):** ADAS for the Car of the Future: Interface Concepts for Advanced Driver Assistant Systems in a Sustainable Mobility Concept of 2020, University of Twente 2006.
- Thorndike, E.L. (1911):** Animal Intelligence, Macmillan, New York, USA 1911.
- Thrash, T.M.; Elliot, A.J. (2002):** Implicit and Self-Attributed Achievement Motives: Concordance and Predictive Validity. In: Journal of Personality, Jg. 70 (2002), S. 729-755.
- Timeforchange.org (2015):** Cause and Effect of Global Warming.  
<http://timeforchange.org/cause-and-effect-for-global-warming>, zugegriffen am 30.08.2015.
- Torraco, R.J. (2005):** Writing Integrative Literature Reviews: Guidelines and Examples. In: Human Resource Development Review, Jg. 4 (2005) Nr. 3, S. 356-367.
- Touré-Tillery, M.; Fishbach, A. (2014):** How to Measure Motivation: A Guide for the Social Psychologist. In: Social and Personality Psychology Compass Jg. 8 (2014) Nr. 7, S. 328-241.
- Tractinsky, N.; Inbar, O.; Tsimhoni, O.; Seder, T. (2011):** Slow Down, You Move Too Fast: Examining Animation Aesthetics to Promote Eco-driving. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, S. 193-202, Salzburg, Österreich: ACM.
- Tremblay, M.A.; Blanchard, C.M.; Taylor, S.; Pelletier, L.G.; Villeneuve, M. (2009):** Work Extrinsic and Intrinsic Motivation Scale: Its Value for Organizational Psychology Research. In: Canadian Journal of Behavioral Science, Jg. 41 (2009) Nr. 4, S. 213-216.
- Trimmer, K.; Beachboard, J.B.; Wiggins, C.; Woodhouse, W. (2008):** Electronic Medical Records Use - An Examination of Resident Physician Intentions. Vorgestellt in: Hawaii International Conference on System Sciences, Hawaii, USA.
- Trommer, S.; Hörtl, A. (2011):** A Study on Perceived Usefulness of Eco Driving Assistant Systems in Europe. In: *8th ITS European Congress*, Lyon, Frankreich.
- Truschin, S.; Schermann, M.; Goswami, S.; Krcmar, H. (2014):** Designing Interfaces for Multiple-Goal Environments: Experimental Insights from In-Vehicle Speech Interfaces. In: ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI), Jg. 21 (2014) Nr. 1, S. 1-24.
- Truschin, S.; Schlachtbauer, T.; Zauner, A.; Schermann, M.; Krcmar, H. (2011):** Content Matters: Towards Handling E-Mail While Driving Safely. Vorgestellt in: Proceedings of the AutomotiveUI '11 3rd International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, Salzburg, Österreich, S. 25-30.
- Tsigilis, N.; Theodosiou, A. (2003):** Temporal Stability of the Intrinsic Motivation Inventory. In: Perceptual and Motor Skills, Jg. 97 (2003), S. 271-280.

- Tutuianu, M.; Marotta, A.; Steven, H.; Ericsson, E.; Haniu, T.; Ichikawa, N.; Ishii, H. (2014):** Development of a World-wide Worldwide harmonized Light duty driving Test Cycle (WLTC) (GRPE-68-03). UNECE, 2014.
- U.S. Environmental Protection Agency (o. .J.-a):** Highway Fuel Economy Test. Internet, In: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-10/hwycol.txt>, zugegriffen am 10.03.2017.
- U.S. Environmental Protection Agency (o. .J.-b):** Japanese 10-15 Exhaust Emission & Fuel Economy Driving Schedule. Internet, In: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-10/j1015col.txt>, zugegriffen am 10.03.2017.
- U.S. Environmental Protection Agency (o. .J.-c):** Japanese 10 Dynamometer Driving Schedule. Internet, In: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-10/jpn10col.txt>, zugegriffen am 10.03.2017.
- University of Massachusetts Amherst (2015):** Journal Citation Reports - Top 50 Psychology Journals. <http://guides.library.umass.edu/content.php?pid=52227&sid=383170>, zugegriffen am 09.09.2015.
- Urbom, R. (2000):** Longman Advanced American Dictionary. USA, Longman Ltd 2000.
- Vallerand, R.J.; Blais, M.R.; Lacouture, Y.; Deci, E.L. (1987):** L'echelle des Orientations Generales a la Causalite: Validation Canadienne Francaise du General Causality Orientations Scale. In: Canadian Journal of Behavioral Science, Jg. 19 (1987) Nr. 1, S. 1-15.
- Vallerand, R.J.; Pelletier, L.G.; Blais, M.R.; Briere, N.M.; Senecal, C.; Vallieres, E.F. (1992):** The Academic Motivation Scale: A Measure of Intrinsic, Extrinsic, and Amotivation in Education. In: Educational and Psychological Measurement, Jg. 52 (1992) Nr. 4, S. 1003-1017.
- Van der Voort, M.; Dougherty, M.S.; van Maarseveen, M. (2001):** A Prototype Fuel-Efficiency Support Tool. In: Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Jg. 9 (2001) Nr. 4, S. 279-296.
- Van Erde, W.; Thierry, H. (1996):** Vroom's Expectancy Models and Work-Related Criteria: A Meta-Analysis. In: Journal of Applied Psychology, Jg. 81 (1996) Nr. 5, S. 575-586.
- Van Mirelo, J.; Maggetto, G.; van de Burgwal, E.; Gense, R. (2004):** Driving Style and Traffic Measures-Influence on Vehicle Emissions and Fuel Consumption. In: Journal of Automobile Engineering, Jg. 218 (2004) Nr. 1, S. 43-50.
- Van Teijlingen, E.R.; Hundley, V. (2001):** The Importance of Pilot Studies. In: Social Research UPDATE, Jg. 35 (2001).
- VDA (2014):** Fakten und Argumente zum Kraftstoffverbrauch. Berlin, In: zugegriffen am
- Venkatesh, V. (2000):** Determinants of Perceived Ease of Use: Integrating Perceived Behavioral Control, Computer Anxiety and Enjoyment into the Technology Acceptance Model. In: Information Systems Research, Jg. 11 (2000) Nr. 4, S. 342-365.
- Venkatesh, V. (2015):** Theoretical Models. [http://www.vvenkatesh.com/it/organizations/Theoretical\\_Models.asp#Con=structdefs](http://www.vvenkatesh.com/it/organizations/Theoretical_Models.asp#Con=structdefs), zugegriffen am 29.08.2015.
- Venkatesh, V.; Bala, H. (2008):** Technology Acceptance Model 3 and a Research Agenda on Interventions. In: Decision Sciences, Jg. 39 (2008) Nr. 2, S. 273-315.
- Venkatesh, V.; Brown, S.A.; Maruping, L.M.; Bala, H. (2008):** Predicting Different Conceptualizations of System Use: The Competing Roles of Behavioral Intention, Facilitating Conditions, and Behavioral Expectation. In: MIS Quarterly, Jg. 32 (2008) Nr. 3, S. 483-502.
- Venkatesh, V.; Davis, F.D. (2000):** A Theoretical Extension of the Technology Acceptance Model: Four Longitudinal Field Studies. In: Management Science, Jg. 46 (2000) Nr. 2, S. 186-204.
- Venkatesh, V.; Morris, M.G.; Davis, G.B.; Davis, F.D. (2003):** User Acceptance of Information Technology: Toward a Unified View. In: MIS Quarterly, Jg. 27 (2003) Nr. 3, S. 425-478.
- Venkatesh, V.; Thong, J.Y.; Xu, X. (2012a):** Consumer acceptance and use of information technology: extending the unified theory of acceptance and use of technology. In: MIS quarterly, Jg. 36 (2012a) Nr. 1, S. 157-178.

- Venkatesh, V.; Thong, J.Y.L.; Xu, X. (2012b):** Consumer Acceptance and Use of Information Technology: Extending the Unified Theory of Acceptance and Use of Technology. In: MIS Quarterly, Jg. 36 (2012b) Nr. 1, S. 157-178.
- Volkswagen AG (1963):** Käfer 1200 Limousine, Cabriolet - 11/1963. In Volkswagen AG (Hrsg.), (S. 10). Wolfsburg: Volkswagen AG.
- Volkswagen AG (1973):** Käfer 1200/1200 L (1973 – 1985). In Volkswagen AG (Hrsg.), (S. 28-29). Wolfsburg: Volkswagen AG.
- Volkswagen AG (2017):** Katalog: Der Golf, Golf Variant & Golf Alltrack. Internet, In: <https://www.volkswagen.de/app/konfigurator/vw-de/de/der-golf/30315/38150/trendline?page=engine>, zugegriffen am 04.06.2018.
- Vollmeyer, R.; Brunstein, J. (2005):** Motivationspsychologie und ihre Anwendung. (Aufl. 1), Kohlhammer, Stuttgart 2005.
- vom Brocke, J.; Simons, A.; Niehaves, B.; Riemer, K.; Plattfaut, R.; Cleven, A. (2009):** Reconstructing the Giant: On the Importance of Rigour in Documenting the Literature Search Process. Vorgestellt in: Proceedings of the 17th European Conference on Information Systems (ECIS), Verona, Italien, S. 2206–2217.
- Vroom, V.H. (1964):** Work and Motivation, Wiley, New York, USA 1964.
- Wada, T.; Yoshimura, K.; Doi, S.-i.; Youhata, H.; Tomiyama, K. (2011):** Proposal of an Eco-Driving Assist System Adaptive to Driver's Skill. Vorgestellt in: 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Washington, DC, USA, S. 1880-1885.
- Wager, G.; McHenry, M.P.; Whale, J.; Bräunl, T. (2014):** Testing Energy Efficiency and Driving Range of Electric Vehicles in Relation to Gear Selection. In: Renewable Energy, Jg. 62 (2014), S. 303-312.
- Wählberg, A. (2007):** Long-Term Effects of Training in Economical Driving: Fuel Consumption, Accidents, Driver Acceleration Behavior and Technical Feedback. In: International Journal of Industrial Ergonomics, Jg. 37 (2007) Nr. 4, S. 333-343.
- Warshawsky-Livne, L.; Shinar, D. (2002):** Effects of uncertainty, transmission type, driver age and gender on brake reaction and movement time. In: Journal of safety research, Jg. 33 (2002) Nr. 1, S. 117-128.
- Watson, J.B. (1913):** Psychology as the Behaviorist Views it. In: Psychological Review, Jg. 20 (1913), S. 158-177.
- Watson, R.T.; Boudreau, M.-C.; Chen, A.J. (2010):** Information Systems and Environmentally Sustainable Development: Energy Informatics and New Directions for the IS Community. In: MIS Quarterly, Jg. 34 (2010) Nr. 1, S. 23-38.
- Webster, J.; Martocchio, J.J. (1992):** Microcomputer Playfulness: Development of a Measure with Workplace Implications. In: MIS Quarterly, Jg. 16 (1992) Nr. 2, S. 201-226.
- Webster, J.; Watson, R.T. (2002):** Analyzing the Past to Prepare for the Future: Writing a Literature Review. In: MIS Quarterly, Jg. 26 (2002) Nr. 2, S. xiii-xxiii.
- Wehmeier, S.; Hornby, A.S. (2000):** Oxford Advanced Learner's Dictionary of Current English (Band 6th edition), Cornelsen & Oxford 2000.
- Wehmeier, S.; Hornby, A.S. (2017):** Oxford Living Dictionaries: Instinct. <https://en.oxforddictionaries.com/definition/instinct>, zugegriffen am 03.04.2017.
- Weick, K.E. (1964):** Reduction of Cognitive Dissonance Through Task Enhancement and Effort Expenditure. In: Journal of Abnormal and Social Psychology, Jg. 68 (1964) Nr. 5, S. 533-539.
- Weinberg, G.; Harsham, B.; Medenica, Z. (2011):** Evaluating the Usability of a Head-up Display for Selection from Choice Lists in Cars. Vorgestellt in: Proceedings of the 3rd International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, Salzburg, Österreich, S. 39-46.
- Whelan, R. (2008):** Effective Analysis of Reaction Time Data. In: The Psychological Record, Jg. 58 (2008) Nr. 3, S. 475.
- White, R.W. (1959):** Motivation Reconsidered: The Concept of Competence. In: Psychological Review, Jg. 66 (1959) Nr. 5, S. 297-333.
- Wilde, T.; Hess, T. (2007):** Forschungsmethoden der Wirtschaftsinformatik. In: Wirtschaftsinformatik, Jg. 49 (2007) Nr. 4, S. 280-287.
- Wilfinger, D.; Meschtscherjakov, A.; Murer, M.; Tscheligi, M. (2010):** Influences on User Acceptance: Informing the Design of Eco-friendly In-car Interfaces. Vorgestellt in:

- Proceedings of the 2nd International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, S. 125-128.
- Williams, G.C.; Cox, E.M.; Hedberg, V.; Deci, E.L. (2000):** Extrinsic Life Goals and Health Risk Behaviors in Adolescents. In: *Journal of Applied Social Psychology*, Jg. 30 (2000) Nr. 8, S. 1756-1771.
- Williams, G.C.; Cox, E.M.; Kouides, R.; Deci, E.L. (1999):** Presenting the Facts About Smoking to Adolescents: The Effects of an Autonomy Supportive Style. In: *Archives of Pediatrics and Adolescent Medicine*, Jg. 153 (1999), S. 959-964.
- Williams, G.C.; Deci, E.L. (1996):** Internalization of Biopsychosocial Values by Medical Students: A Test of Self-Determination Theory. In: *Journal of Personality and Social Psychology*, Jg. 70 (1996) Nr. 4, S. 767-779.
- Williams, G.C.; Deci, E.L. (2001):** Activating Patients for Smoking Cessation Through Physician Autonomy Support. In: *Medical Care*, Jg. 39 (2001) Nr. 8, S. 813-823.
- Williams, G.C.; Freedman, Z.R.; Deci, E.L. (1998a):** Supporting Autonomy to Motivate Patients With Diabetes for Glucose Control. In Rochester, U.o. (Hrsg.), *Diabetes Care* (Band 21, S. 1644-1651).
- Williams, G.C.; Gagné, M.; Ryan, R.M.; Deci, E.L. (2002):** Supporting Autonomy to Motivate Smoking Cessation: A Test of Self-Determination Theory. In: *Health Psychology*, Jg. 21 (2002), S. 40-50.
- Williams, G.C.; Grow, V.M.; Freedman, Z.R.; Ryan, R.M.; Deci, E.L. (1996):** Motivational Predictors of Weight Loss and Weight-Loss Maintenance. In: *Journal of Personality and Social Psychology*, Jg. 70 (1996) Nr. 1, S. 115-126.
- Williams, G.C.; Rodin, G.C.; Ryan, R.M.; Grolnick, W.S.; Deci, E.L. (1998b):** Autonomous Regulation and Adherence to Long-Term Medical Regimens in Adult Outpatients. In: *Health Psychology*, Jg. 17 (1998b) Nr. 3, S. 269-276.
- Williams, G.C.; Saizow, R.; Ross, L.; Deci, E.L. (1997):** Motivation Underlying Career Choice for Internal Medicine and Surgery. In: *Social Science and Medicine*, Jg. 45 (1997) Nr. 11, S. 1705-1713.
- Williams, G.C.; Wiener, M.W.; Markakis, K.M.; Reeve, J.; Deci, E.L. (1994):** Medical Students' Motivation for Internal Medicine. In: *Journal of General Internal Medicine*, Jg. 9 (1994) Nr. 6, S. 327-333.
- Williams, M.D.; Rana, N.P.; Dwivedi, Y.K. (2015):** The Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT): A Literature Review. In: *Journal of Enterprise Information Management*, Jg. 28 (2015) Nr. 3, S. 443-488.
- Wilson, P.M.; Sabiston, C.M.; Mack, D.E.; Blanchard, C.M. (2012):** On the Nature and Function of Scoring Protocols Used in Exercise Motivation Research: An Empirical Study of the Behavioral Regulations in Exercise Questionnaire. In: *Psychology of Sport and Exercise*, Jg. 13 (2012), S. 614-622.
- WKWI (2011):** Profil der Wirtschaftsinformatik, Ausführungen der Wissenschaftlichen Kommission der Wirtschaftsinformatik. In Kurbel, K., Becker, J., Gronau, N., Sinz, E., & Suhl, L. (Hrsg.), *enzyklopädie der Wirtschaftsinformatik - Online-Lexikon* (4. Aufl.), München: Oldenburg. <http://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/lexikon/uebergreifendes/Disziplinen%20der%20WI/Wirtschaftsinformatik/profil-der-wirtschaftsinformatik>, zugegriffen am 27.10.2016.
- Woodworth, R.S. (1917):** *Dynamic Psychology*. Internet, In: zugegriffen am
- World-Meteorological-Organization (2014):** Record Greenhouse Gas Levels Impact Atmosphere and Oceans. [https://www.wmo.int/pages/mediacentre/press\\_releases/pr\\_1002\\_en.html](https://www.wmo.int/pages/mediacentre/press_releases/pr_1002_en.html), zugegriffen am 03.07.2015.
- Wunderlich, P.; Kranz, J.; Totzek, D.; Veit, D.; Picot, A. (2013a):** The Impact of Endogenous Motivations on Adoption of IT-Enabled Services The Case of Transformative Services in the Energy Sector. In: *Journal of Service Research*, Jg. 16 (2013a) Nr. 3, S. 356-371.
- Wunderlich, P.; Kranz, J.; Veit, D. (2013b):** Beyond Carrot-and-Stick: How Values and Endogenous Motivations Affect Residential Green IS Adoption. In: *34th International Conference on Information Systems*, S. 1-19, Mailand, Italien.
- Xu, S.; Li, S.E.; Cheng, B.; Li, K. (2016):** Instantaneous Feedback Control for a Fuel-Prioritized Vehicle Cruising System on Highways With a Varying Slope. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Jg. 18 (2016) Nr. 5, S. 1210-1220.

- Yamauchi, H.; Tanaka, K. (1998):** Relations of Autonomy, Self-Referenced Beliefs and Self-Regulated Learning Among Japanese Children. In: Psychological Reports, Jg. 82 (1998) Nr. 3, S. 803-816.
- Yang, Z.; Cao, C.; Su, Y. (2002):** A Method of Optimal Shift Control Based on Pattern Recognition and Learning Algorithm. Vorgelegt in: Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation, Shanghai, China, S. 955-959.
- Yerkes, R.M.; Dodson, J.D. (1908):** The Relation of Strength of Stimulus to Rapidity of Habit-Formation. In: Journal of Comparative Neurology and Psychology, Jg. 18 (1908), S. 459-482.
- Yi, M.Y.; Hwang, Y. (2003):** Predicting the Use of Web-Based Information Systems: Self-Efficacy, Enjoyment, Learning Goal Orientation, and the Technology Acceptance Model. In: Intl'l Jr. of H-C Studies, Jg. 59 (2003) Nr. 4, S. 431-439.
- Yousafzai, S.Y.; Foxall, G.R.; Rallister, J.G. (2007):** Technology Acceptance: A Meta-Analysis of the Tam: Part 1. In: Journal of Modeling in Management, Jg. 2 (2007) Nr. 3, S. 251-280.
- Zeit.de (2014):** So sauber ist das Elektroauto. <http://www.zeit.de/mobilitaet/2014-01/elektroauto-energiebilanz>, zugegriffen am 09.09.2015.
- Zeldman, A.; Ryan, R.M.; Fiscella, K. (1999):** Attitudes, Beliefs and Motives in Addiction Recovery. Unveröffentlichtes Manuskript, University of Rochester: University of Rochester.
- Zhang, L.; Baldwin, K.; Munoz, B.; Munro, C.; Turano, K.; Hassan, S.; Lyketsos, C.; Bandeen-Roche, K.; West, S.K. (2007):** Visual and Cognitive Predictors of Performance on Brake Reaction Test: Salisbury Eye Evaluation Driving Study. In: Ophthalmic epidemiology, Jg. 14 (2007) Nr. 4, S. 216-222.
- Zhang, P. (2008):** Technical Opinion: Motivational Affordances: Reasons for ICT Design and Use. In: Communications of the ACM, Jg. 51 (2008) Nr. 11, S. 145-147.
- Zuckerman, M. (1979):** Sensation Seeking: Beyond the Optimal Level of Arousal, Hillsdale, New Jersey, USA, Erlbaum 1979.
- Zuckerman, M. (2007):** Sensation Seeking and Risky Behavior, American Psychological Association, Washington, DC, USA 2007.
- Zumsteg, D.; Wieser, H.G. (2002):** Effects of aging and sex on middle-latency somatosensory evoked potentials: normative data. In: Clinical Neurophysiology, Jg. 113 (2002) Nr. 5, S. 681-685.

## Anhang A Energiebewusstseinskala: Fragebogen

Messgröße: 7er-Likert-Skala

1	2	3	4	5	6	7
strongly agree						strongly disagree
<input type="checkbox"/>						

Zuordnung	Frage
<b>ED1 (Frage 13)</b>	Healthier environment is a concern form e.
<b>ED2 (Frage 22)</b>	I want contribute to a healthier environment.
<b>ED3 (Frage 24)</b>	I recycle glass, jars and bottles I used at home.
<b>ED4 (Frage 23)</b>	I prefer to buy groceries, which are packed in a re-useable package.
<b>EW1 (Frage 1)</b>	I can estimate the increase of Carbon Dioxide (CO <sub>2</sub> ) emissions since 1990?
<b>EW2 (Frage 2)</b>	I am feeling able to name energy labels i.e. A++.
<b>EW3 (Frage 3)</b>	I am feeling able to explain energy labels i.e. A++.
<b>EW4 (Frage 4)</b>	I consider a 3-person household with a yearly energy consumption of 2000 kWh is energy efficient.
<b>EV1 (Frage 33)</b>	I check the fuel consumption while I drive my car.
<b>EV2 (Frage 34)</b>	I check the fuel consumption while I drive my car continuously.
<b>EV3 (Frage 35)</b>	I recognize the fuel consumption more intuitively, after I have driven a while (more than the half of the tank)

*Tabelle 35: Energiebewusstseinskala*

*Quelle: Eigene Darstellung, ED = Eco Denken, EW = Eco Wissen, EV = Eco Verbrauch*





	Strongly disagree							Strongly agree						
<b>Behavior-specific</b>														
I always make up time when going by car in case I'm late.	<input type="checkbox"/>													
I check the fuel consumption while I drive my car.	<input type="checkbox"/>													
I check the fuel consumption while I drive my car continuously	<input type="checkbox"/>													
I recognize the fuel consumption more intuitively, after I have driven a while (more than the half of the tank).	<input type="checkbox"/>													
I try to beat the calculated arrival time of my navigation system.	<input type="checkbox"/>													
When I see the traffic light switching from green to yellow, I accelerate to catch the green phase.	<input type="checkbox"/>													
<b>Instrumental Motivation</b>														
I would drive more efficient if I knew that my effort would lead to a re-ward.	<input type="checkbox"/>													
When choosing an Energy Consumption Platform, I usually choose the one that rewards the most for efficient driving (e.g. when I want to rent or buy a car).	<input type="checkbox"/>													
When I am in my car, it's my favorite moment, when my consumption display shows high efficiency and thus I get positive feedback.	<input type="checkbox"/>													
People should always keep their eyes and ears open for better energy saving opportunities.	<input type="checkbox"/>													
I follow my Energy Consumption Platform's advices in order to pay less when refueling my car.	<input type="checkbox"/>													
I would follow my Energy Consumption Platform's guide to drive efficient even when I would arrive only as fast as when I would not use an Energy Consumption Platform.	<input type="checkbox"/>													
<b>External Self-Concept-Based Motivation</b>														
It is important to me that others approve my driving behavior.	<input type="checkbox"/>													
I often make decisions based on what others will think.	<input type="checkbox"/>													
I follow the instructions of an Energy Consumption Platform if public recognition is attached to it.	<input type="checkbox"/>													
If choosing an Energy Consumption Platform, I want one that allows me to be recognized for success.	<input type="checkbox"/>													
I give my best effort in using an Energy Consumption Platform, when I know that it will be seen by significant others.	<input type="checkbox"/>													
Those people who make the most friends have lived the fullest lives.	<input type="checkbox"/>													
<b>Internal Self-Concept-Based Motivation</b>														
Decisions I make will reflect high standards that I've set for myself.	<input type="checkbox"/>													
It is important that my Energy Consumption Platform allows me to drive according to my skills and talents (e.g. my Energy Consumption Platform should allow me to use a mode where I drive fast but efficient).	<input type="checkbox"/>													
I try to make sure that my decisions are consistent with my personal standards of driving behavior.	<input type="checkbox"/>													
I consider myself as a self-motivated person.	<input type="checkbox"/>													
I like to do things, which give me a sense of personal achievement.	<input type="checkbox"/>													
I need to know that my driving skills and values are impacting an efficient driving behavior.	<input type="checkbox"/>													
<b>Goal Internalization</b>														
I would not use an Energy Consumption Platform if I did not agree with its goal.	<input type="checkbox"/>													
I have to believe in a reason before I will work hard at achieving it.	<input type="checkbox"/>													
Unless I believe in the cause, I will not use an Energy Consumption Platform.	<input type="checkbox"/>													
When choosing a car, I look for one where the Energy Consumption Platform supports my beliefs and values.	<input type="checkbox"/>													
I only use an Energy Consumption Platform when its goals are consistent with my values (e.g. the Energy Consumption Platform's goal is to consume as less fuel as possible and I share the goal. This is the reason why I turn on my Energy Consumption Platform.	<input type="checkbox"/>													
If a road trip results in a low energy consumption, it does not matter whether I was responsible for efficiency or the Energy Consumption Platform.	<input type="checkbox"/>													
<b>Perceived Competence</b>														
I feel confident in my ability to manage my Energy Consumption Platform.	<input type="checkbox"/>													
When I would be in a car right now, I would be capable of handling my Energy Consumption Platform.	<input type="checkbox"/>													
I am able to meet the challenge of following my Energy Consumption Platform's instruction.	<input type="checkbox"/>													
I feel able to meet the challenge of following my Energy Consumption Platform's instructions.	<input type="checkbox"/>													
<b>Self-Regulation</b>														
Why do you use or would you use an Energy Consumption Display?														
Because I simply enjoy monitoring my consumption.	<input type="checkbox"/>													
Because efficient driving is important and beneficial for the environment, consequently for my health.	<input type="checkbox"/>													
Because I would feel bad about myself if I would not.	<input type="checkbox"/>													
Because it is fun and interesting.	<input type="checkbox"/>													
Because other like me better when I show an efficient driving behavior.	<input type="checkbox"/>													
Because I'd be afraid of falling too far out of my current fuel consumption.	<input type="checkbox"/>													
Because it helps my image.	<input type="checkbox"/>													
Because it is personally important to me to control my energy consumption.	<input type="checkbox"/>													
Because I feel pressured to drive efficient.	<input type="checkbox"/>													
Because I have a strong value for driving ecological and efficient.	<input type="checkbox"/>													
For the pleasure of discovering and mastering new efficient driving techniques.	<input type="checkbox"/>													
Because I want others to see me helping the environment.	<input type="checkbox"/>													