

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Ergonomie

**Objektivierung des Sitzkomforts  
und  
seine automatische Anpassung**

**Raphael Zenk**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen  
der Technischen Universität München  
zur Erlangung des akademischen Grades  
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigten Dissertation

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Heißing

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Heiner Bubb  
2. Prof. Dr. Peter Vink,  
Delft University of Technology / Niederlande

Die Dissertation wurde am 16.07.2008 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 13.11.2008 angenommen.

## **Danksagung**

Die vorliegende Dissertation entstand in einer dreijährigen Forschungsarbeit, die am Lehrstuhl für Ergonomie der TU München in Kooperation mit der BMW Group ermöglicht wurde.

Mein Dank gilt meinen Vorgesetzten und Kollegen bei BMW. Zu nennen ist hier insbesondere Dr. Thomas Klisch, der ein Zustandekommen meiner Arbeit bei der BMW Group überhaupt ermöglicht hat. In der Abteilung für Akustik, Komfort und Werterhalt danke ich ganz besonders meinem Abteilungsleiter Christian Amann, der mir den Rücken freigehalten und mich tatkräftig unterstützt und gefördert hat.

Dank gebührt auch Rudolf Lein, dessen Team ich sehr gerne angehört habe. In seiner Abteilung konnte ich während meiner Tätigkeit sehr viel über die praktische Sitzgestaltung erfahren.

Ausdrücklich bedanken möchte ich mich bei Alexander Durt, der mir den Sitzkomfort direkt am Produkt näher gebracht hat.

Ohne die Hilfe seitens der Elektrotechnik durch Robert Bartl und Daniel Beenken sowie dem Studenten Tobias Mödl hätte der Prototyp der automatischen Sitzkomferteinstellung nie funktioniert.

Ganz besonderer Dank gebührt meinem Freund und Kollegen Matthias Franz. Durch die bereichernden Diskussionen mit ihm, seine anpackende Art und seine mutigen Vorgehensweisen habe ich in vielerlei Hinsicht profitiert. Ohne ihn wäre diese Arbeit nicht zu dem geworden, was sie ist.

Ich bedanke mich auch ganz herzlich bei allen KollegInnen am Lehrstuhl für Ergonomie für das stets angenehme Arbeitsklima. Durch den akademischen Austausch und die angeregten Diskussionen haben sie einen deutlichen Einfluss auf meine Arbeit genommen. Erwähnt werden sollen hier explizit Dr. Jürgen Hartung, Wolfram Remlinger und Olaf Sabbah. Ein ganz besonderer Dank gilt Dr. Christian Mergl, der nicht nur den Grundstein für diese Arbeit gelegt, sondern grundsätzlich mein Interesse am Sitzkomfort geweckt hat.

Ausdrücklich danken möchte ich meinen Prüfungsgutachtern:

An erster Stelle ist mein Doktorvater Professor Dr. Heiner Bubb zu nennen, der mich während meines Studiums für Fragestellungen der Ergonomie begeistert und mir die Möglichkeit gegeben hat, an seinem Lehrstuhl diese Doktorarbeit zu verfassen. Er war mir immer ein verständnisvoller und allzeit wohlwollender

Förderer. Vom akademischen Austausch mit ihm habe ich sehr profitiert. Er war mir nicht nur in wissenschaftlicher, sondern auch menschlicher Hinsicht eine große Stütze.

Ich freue mich, dass ich Prof. Dr. Peter Vink als Zweitgutachter gewinnen konnte, da er von Anfang an mit großem Interesse und wertvollen Anregungen den Fortgang der Arbeit unterstützt hat.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie: meinen Eltern Christine und Dr. Georg Zenk sowie meinen Schwestern Barbara und Maria, die mich immer ermutigt und von jeher in jeder Hinsicht unterstützt haben.

In ganz besonderer Weise möchte ich mich bei meiner lieben Freundin Dr. Michaela Albrecht bedanken, die mich in unermüdlicher Weise durch diese drei Jahre getragen hat. Ich weiß, dass ich vieles unbewusst von ihr vorausgesetzt habe, was nicht selbstverständlich war, insbesondere in der „heißen Phase“ meiner Doktorarbeit. Du bist mir die größte Stütze gewesen!

München, im Juli 2008

Raphael Zenk

# Inhaltsverzeichnis

---

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	5
2	Aktueller Forschungsstand .....	9
2.1	Literaturüberblick zur Begriffsdefinition von Komfort / Diskomfort .....	9
2.2	Komfortmodelle .....	11
2.2.1	Zhangsches Komfortmodell.....	11
2.2.2	Diskomfortpyramide nach Krist.....	13
2.2.3	Komfortmodell nach de Looze .....	15
2.2.4	Emocard.....	16
2.3	Physiologische Grundlagen.....	18
2.3.1	Simultane Raumschwelle .....	18
2.3.2	Hautrezeptoren.....	19
2.3.3	Sensitivität von Oberschenkel und Gesäß .....	21
2.3.4	Bewegungsmuster des Menschen.....	22
2.4	Objektivierung des Sitzkomforts mittels Druckverteilung .....	24
2.4.1	Parameter des Sitzkomforts .....	24
2.4.2	Ideale Druckverteilung.....	25
3	Validierung des Modells mittels Bandscheibendruckmessungen .....	28
3.1	Medizinische Zusammenhänge.....	29
3.2	Literaturüberblick zur In-vivo-Bandscheibendruckmessung .....	32
3.3	Zielsetzung.....	35
3.4	Versuchskonzept.....	36
3.4.1	Methode .....	36
3.4.2	Versuchsperson .....	36
3.4.3	Versuchsequipment.....	36
3.5	Operative Vorbereitung des Versuchs.....	41
3.5.1	Implantierung der Messsonden .....	41

## Inhaltsverzeichnis

---

3.5.2	Platzierung der Messsonden .....	43
3.6	Versuchsdurchführung .....	45
3.7	Ergebnisse .....	48
3.8	Diskussion der Ergebnisse .....	50
3.8.1	Abgleich zu bisherigen Studien .....	50
3.8.2	Abgleich zu Alltagstätigkeiten .....	53
3.8.3	Abgleich zur bisherigen Diskomfortbewertung .....	54
4	Identifizierung der relevanten Körperregionen .....	56
4.1	Versuchsdesign.....	56
4.2	Versuchsdurchführung .....	57
4.3	Ergebnisse .....	59
4.4	Diskussion.....	60
5	Entwicklung der automatischen Sitzkomferteinstellung.....	62
5.1	Technische Grundlagen und Voruntersuchungen.....	63
5.1.1	Anforderungsadäquate Sensorik .....	63
5.1.2	Platzierung der Sensorik .....	65
5.1.3	Sitzaufbau .....	66
5.1.4	Abgleich zur idealen Druckverteilung.....	67
5.1.5	Sitzverstellmöglichkeiten und ihre Auswirkungen .....	69
5.1.6	Reihenfolge der Sitzverstellmöglichkeiten .....	70
5.2	Regelung und Steuerungsalgorithmus .....	73
5.2.1	Hardware für Regelung .....	73
5.2.2	Modell der Regelung .....	74
5.2.3	Verstellalgorithmus.....	77
5.2.4	Umsetzung der Regelung.....	79
5.2.5	Bedienoberfläche .....	80
5.3	Statische Akzeptanzuntersuchung der automatischen Sitzkomferteinstellung .....	81

## Inhaltsverzeichnis

---

5.3.1	Versuchsdesign.....	81
5.3.2	Versuchsdurchführung .....	84
5.3.3	Ergebnisse .....	85
5.3.4	Abgleich der automatisch erzeugten Druckverteilungen zur idealen Druckverteilung.....	88
5.4	Eruierungsuntersuchung der automatischen Sitzkomforteinstellung.....	90
5.4.1	Versuchsdesign.....	90
5.4.2	Versuchsdurchführung .....	92
5.4.3	Ergebnisse .....	92
6	Entwicklungsperspektiven .....	95
6.1	Ausblick für serientaugliche Anwendung .....	95
6.1.1	Miniaturisierung.....	95
6.1.2	Gestaltungsregeln .....	95
6.1.3	Weitere Ausbaustufen .....	97
6.2	Übertragbarkeit von Fahrer- auf Beifahrerseite.....	98
6.2.1	Beifahrerkörperhaltungen nach Zhang .....	98
6.2.2	Überprüfung durch Feldstudie .....	100
6.2.3	Ergebnisse und Diskussion .....	101
7	Zusammenfassung.....	102
8	Literatur .....	104
9	Anhang.....	115

### Abkürzungsverzeichnis

ALBV :	Aktive Lehnenbreitenverstellung
ASCA :	Automatic Seat Comfort Adjustment (= Automatische Sitzkomfort-einstellung)
BI :	Bewertungsindex
EMG :	Elektromyogramm
HWS :	Halswirbelsäule
I-Drive :	Fahrzeugbediensystem; mittels eines Dreh-Drück-Stellers, der auf der Mittelkonsole angebracht ist, lassen sich unterschiedlichste Funktionen auf dem zentral befindlichen Display ansteuern
KT :	Körperteil
LBV :	Lehnenbreitenverstellung
LHV :	Lehnenhöhenverstellung
LKV :	Lehnenkopfverstellung
LNV :	Lehnenneigungsverstellung
LTV :	Lehnentiefenverstellung
M. :	Muskulus
MFS :	Multifunktionssitz
Mock-Up :	„Mock-Up“ (englisch) = Attrappe; hier: Bezeichnung für einen Versuchsträger
OC :	occupant classification (= Insassen Klassifizierung)
SA :	Sonderausstattung
SHV :	Sitzhöhenverstellung
SLV :	Sitzlängsverstellung
SNV :	Sitzneigungsverstellung
VP :	Versuchsperson

### 1 Einleitung

Der Sitzkomfort wird in der Automobilindustrie zu einem immer bedeutsameren Faktor: In unserer Mobilitätsgesellschaft verbringen die Menschen zunehmend mehr Zeit sitzend im Automobil.

So ist es nicht verwunderlich, dass sich der Sitz, die entscheidende Schnittstelle zwischen Fahrzeug und Mensch, in der Entwicklungsgeschichte des Automobils technisch von Grund auf gewandelt hat.

Die geschwungene Karosserieform der repräsentativen Limousine des BMW 502 (Bauzeit von 1954 bis 1961) beispielsweise wurde bald unter dem Namen „Barockengel“ bekannt (Abbildung 1). Wie deutlich an den zwei Verstellhebeln zu erkennen ist, verfügte er bereits damals über eine Sitzlängen- und eine Lehnenneigungsverstellung; die Sitzverstellmöglichkeiten waren aber eher niedrig einzustufen.



Abbildung 1: Historischer BMW 502 (Bj. 1957) im Vergleich mit BMW 760i (Bj. 2006)

Aufgrund der ansteigenden Komfortbedürfnisse der Kunden wurde der Sitz von den führenden Automobilherstellern mittlerweile von einer Konstruktion mit sehr wenigen Sitzverstellmöglichkeiten zu einem 20-fach verstellbaren Multifunktionssitz weiterentwickelt (vgl. Abbildung 1). Dabei lassen sich Sitzlänge, -höhe, -neigung und -tiefe elektrisch verändern; an der Lehne können die Neigung, die Breite, der Lehnenkopf variiert werden, Lordosenhöhen- und -tiefenverstellung kommen hinzu. Zuletzt bleibt noch eine Kopfstützenhöhen- und -tiefenverstellung. Darüber hinaus sind noch eine Massagefunktion sowie Aktivheizung und -belüftung im Sitz verbaut. Diese hochfunktionellen Sitze werden von bis zu neun Motoren bewegt. Die Sitzmotoren können so viele Parameter verstellen, dass man mit Veränderung einer Sitzverstellung weitere Komponenten mitvariiert. Kombinatorisch ergibt sich hierbei eine Anzahl von über 200 Millionen möglicher Einstellungen des Sitzes.

Diese scheinbar erfreuliche Entwicklung hat allerdings ihre Schattenseiten: Eine so komplexe Konstruktion wie der Multifunktionssitz von BMW ist nur sehr schwer manuell zu bedienen. Viele Fahrer scheuen die Zeit und die Mühe, die eine exakte Einstellung erfordern würde, und belassen den Sitz in einer Position, die kein physiologisch gesundes Sitzen erlaubt. Die paradoxe Folge ist, dass der Sitzkomfort durch die Optimierungsversuche der Industrie in praxi mitunter sogar verringert wird.

Zur Lösung dieses Problems sind zwei Fragen zu klären: Zunächst ist zu bestimmen, welche Sitzposition für den Fahrer eines Kraftfahrzeugs ideales, d.h. dauerhaft komfortables Sitzen ermöglicht. Zum anderen muss ein System entwickelt werden, das diese Einstellung automatisch vornimmt, sobald der Fahrer im Fahrzeug Platz genommen hat.

Das Ziel der mit vorliegender Arbeit dokumentierten Forschungen ist es, eine solche automatische Sitzkomfoteinstellung zu generieren, die den Insassen eines Fahrzeugs unterstützt, die mannigfaltigen Einstellmöglichkeiten des Sitzes in den Griff zu bekommen, ohne die geschaffenen Verstellmöglichkeiten zu reduzieren.

Nur auf diese Weise kann bei hohem Bedienkomfort für den Fahrer ein optimales physiologisches Sitzen ermöglicht werden.

In Abbildung 2 ist der Weg dargestellt, der hierfür beschritten werden muss.

Zunächst ist klar zu bestimmen, unter welchen Bedingungen eine Sitzeinstellung als optimal gelten kann. Hierfür wird auf der Grundlage einer Klärung der Begrifflichkeiten Komfort und Diskomfort über grundlegende Faktoren des Sitzkomforts und die physiologischen Grundlagen reflektiert (s. Kap. 2).

Für die subjektive Empfindung des Sitzkomforts muss hiervon ausgehend eine objektive Größe gefunden werden, die Werte zur Einstellung einer automatischen Sitzeinstellung liefern könnte. Den Forschungen zur idealen Druckverteilung fehlt bislang eine medizinische Validierung, bevor sie als Grundlage für ein neues Sitzkonzept herangezogen werden können. Hierfür soll eine intradiskale Druckmessung durchgeführt werden, bei der durch einen endoskopischen Eingriff am lebenden Menschen zwei Druckaufnehmer in die Bandscheiben im unteren Rückenbereich implantiert werden. Eine solche In-vivo-Bandscheibendruckmessung kann einen objektiven Messwert liefern, der bestimmend für die Forschung des Sitzkomforts ist (s. Kap. 3).

Anschließend sollen im Hinblick auf eine automatische Sitzkomforteinstellung Körperregionen identifiziert werden, die ausschlaggebend für das Komfortempfinden stehen, um gezielt auf diese Regionen eingehen zu können (s. Kap.4).

Auf dieser Basis kann sodann der zweite Teil des Projekts erfolgen: die technische Umsetzung der medizinischen Erkenntnisse in die Konstruktion einer Apparatur zur automatischen Einstellung des Sitzes nach physiologischen Gesichtspunkten. Die Funktionsweise dieses Systems soll in ihren einzelnen Entwicklungsschritten nachvollziehbar gemacht werden (s. Kap. 5).

Eine umfangreiche statische Probandenstudie und erste Erueierungsuntersuchungen im Alltagsgebrauch der automatischen Sitzkomforteinstellung sollen der Validierung der Funktionsweise des Systems und der idealen Druckverteilung dienen (s. Kap. 6).

Stellt sich das Konzept der Automatisierung auf Basis der idealen Druckverteilung als stimmig heraus, kann durch diese Arbeit der Kreis der Objektivierung des Sitzkomforts geschlossen werden.

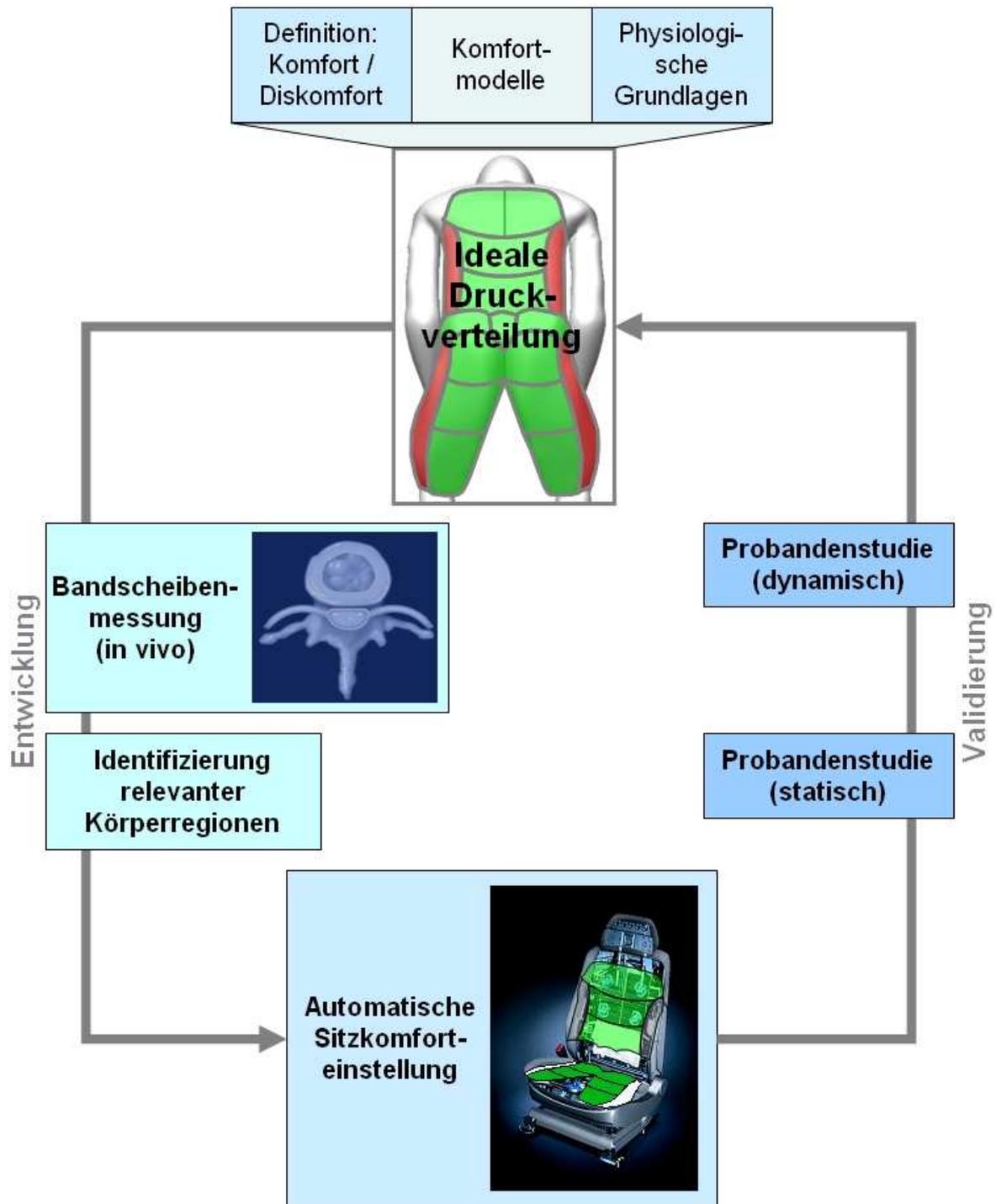


Abbildung 2: Veranschaulichung des Vorgehens zur automatischen Sitzkomfoteinstellung

## 2 Aktueller Forschungsstand

Um eine Basis für die weitere Arbeit zu schaffen, wird der Stand der aktuellen Forschung zur Objektivierung des Sitzkomforts anhand eines Literaturüberblicks dargestellt.

### 2.1 Literaturüberblick zur Begriffsdefinition von Komfort / Diskomfort

Slater (1985) versucht den Begriff Komfort in eine wissenschaftliche Definition zu packen: „Komfort sei ein angenehmer Zustand von physiologischer, psychologischer und physikalischer Harmonie zwischen dem Menschen und der Umgebung.“

Branton (1996) gibt zu bedenken, dass Komfort nicht notwendigerweise einen positiven Effekt zur Folge haben müsse.

Kempfert (1999) beschreibt Komfort als ein subjektives Erleben eines Individuums innerhalb eines komplexen, heterogenen Bewertungskonglomerats. Daher differenziert er „Komfort“ in drei verschiedene Ebenen:

Auf der ersten Ebene stehen hierbei die Reaktionen auf einzelne Sinnesempfindungen, die von den meisten Personen ähnlich erlebt und gewichtet werden. Bewertungen sind in diesem Zusammenhang hauptsächlich durch physische Unterschiede und das individuelle Anspruchsniveau zu erklären. Dies erfolgt spontan und kann unverzüglich verbalisiert werden. Zu beachten ist hierbei, dass sich die Komfortempfindung bei längerer Reizexposition verändern kann.

Die nächste Ebene wird von Aspekten der Bequemlichkeit und Belastungsreduktion gebildet. Diese Stufe ist von der individuellen Gewohnheit einer Person abhängig und tritt erst bei längeren Benutzungszeiträumen auf.

Die dritte Ebene des Komfortkonglomerats bilden die handlungs- und aufgabenbezogenen Bewertungen, die in starker Abhängigkeit von individuellen Bedürfnissen stehen. Daher sind hier sehr große Unterschiede von Individuum zu Individuum zu erwarten.

De Looze (2002) betont daher dreierlei: Komfort ist ein Konstrukt von subjektiver, persönlich definierter Natur; Komfort wird von unterschiedlichen Faktoren (physikalisch, physiologisch und psychologisch) beeinflusst; und Komfort ist eine Reaktion auf die Umwelt.

Vink (2002) unterscheidet in Bezug auf Komfort drei Zustände: Ein Vorhandensein von Diskomfort, der aufgrund der physikalischen Störung der Umwelt erlebt wird. An zweiter Stelle lässt sich der Zustand „Kein Diskomfort“ anführen. Als dritten möglichen Zustand führt Vink an, dass Komfort aktiv wahrgenommen wird. Man fühlt sich komfortabel, wenn man wahrnehmbar mehr Komfort erlebt, als man erwartet hat.

Bubb (2003) weist darauf hin, dass Komfort gemäß dem allgemeinen Sprachgebrauch mit Begriffen wie Behaglichkeit, Bequemlichkeit, Zufriedenheit und Luxus verbunden ist. Das Webster's Third New International Dictionary of the English Language (1981) gibt folgende Auskunft: „Komfort ist ein Zustand der Entlastung (relief), der Unterstützung (encouragement) und des Gefallens (enjoyment).“

Oben angeführte Studien haben gezeigt, dass Diskomfort hauptsächlich in Verbindung mit physiologischen und biomechanischen Faktoren zu sehen ist, während Komfort besonders mit der Ästhetik in Verbindung gebracht wird.

Komfort und Diskomfort sind also keine Antonyme im eigentlichen Sinne. Tatsächlich sind sie zwei unterschiedliche Größen, die von verschiedenen unterschiedlichen Variablen beeinflusst werden.

Knoll (2007) stellt fest, dass Stühle als komfortabler wahrgenommen, wenn sie besser gefallen. Das Design lässt sich gezielt zur Komfortsteigerung einsetzen. Dieser Einfluss nimmt allerdings mit zunehmender Zeit im Vergleich zum rein visuellen Kontakt ab. Daraus lässt sich vermuten, dass die physikalische Beschaffenheit des Stuhles in den Vordergrund tritt, je länger die Sitzdauer ist.

Für den Sitzentwickler bedeutet dies, dass Diskomfort durch physikalisch gut ausgelegte Produkte reduziert werden muss. Weitaus herausfordernder ist aber die Rolle des Komforts, die deutlich über eine physikalische Optimierung hinausgeht. Dabei sind dem Endbenutzer eine Erzeugung von Gefühlen der Sicherheit, ein Übertreffen der Erwartungen oder selbst provozierende „Wow-Sensations“ wichtig.

## 2.2 Komfortmodelle

Zum besseren Überblick soll der Komfortbegriff nun in anschaulichen Modellen erörtert werden.

### 2.2.1 Zhangsches Komfortmodell

Zhang, Helander und Drury zeigen 1996 auf (vgl. Abbildung 3), dass Komfort und Diskomfort zwei unterschiedliche Dimensionen darstellen und nicht, wie ursprünglich in der Arbeitswissenschaft angenommen, zwei Extreme auf ein und derselben Skala subjektiven Empfindens bilden. Diskomfort ist vor allem mit physiologischen und biomechanischen Faktoren verbunden, während Komfort hauptsächlich mit Aspekten der Ästhetik zusammenhängt. Diese Definition hebt hervor, dass Komfort ein facettenreiches, von mehreren Faktoren beeinflusstes Konstrukt ist – und nicht lediglich das Gegenteil von Diskomfort.

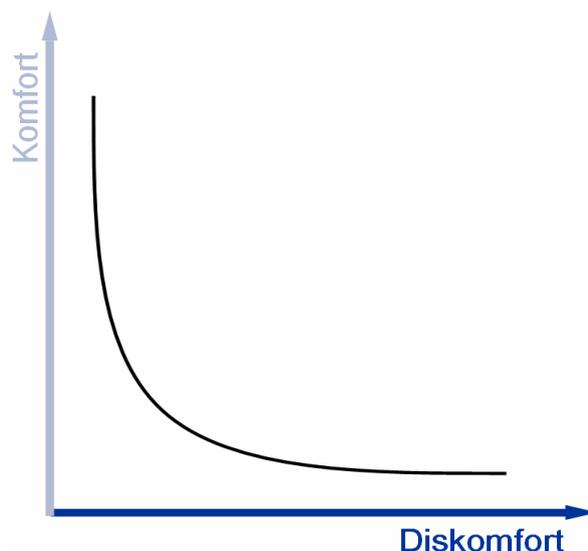


Abbildung 3: Zhangsches Komfortmodell (1996)

Bubb (2003) unterscheidet klar zwischen den zwei Konzepten von Komfort und Diskomfort, die als zwei Orthogonalen zueinander gesehen werden können. Dabei wird der Diskomfort mit „Erleiden“, Komfort mit „Gefallen“ in Verbindung gebracht. Nur das Feld des Diskomforts kann mit Methoden der Psycho-Physik untersucht werden, während der Aspekt des Komforts in enger Verbindung mit der Ästhetik und dem Industrial Design steht.

Diskomfort wird mit biomechanischen Faktoren in Verbindung gebracht (Gelenkwinkel, Muskelanspannung, Druckverteilung), die Gefühle von Schmerz, Taubheit, Steifigkeit etc. hervorrufen. Eindrücke von Diskomfort steigen über die Dauer der Aufgabe und mit der Ermüdung an.

Komfort wird in Verbindung mit Gefühlen von Entspannung und Wohlbefinden gebracht. Zusätzlich kann der Sinneseindruck von Komfort durch das ästhetische Design erweitert werden. Man denke an das Beispiel des „rassigen“ Sportwagens mit unbequemer Sitzposition, bei der die Macht des Gefallens eine entscheidende Rolle spielt. Auch hier lehrt die Erfahrung, „dass der Mensch bereit ist, für Schönheit zu leiden“ (Bubb, 2004).

Um sprachliche Verwirrung zu vermeiden, definiert Knoll (2006) „Komfort“ als Resultat aus den beiden Variablen „Gefallen“ und „Nicht-Erleiden“. Schematisch könnte ein Zusammenhang bestehen, wie ihn Abbildung 4 zeigt. Dabei geben die Geraden Kombinationen gleichen Komfortgefühls an; mit zunehmendem Abstand vom Koordinatenursprung wächst der Komfort.

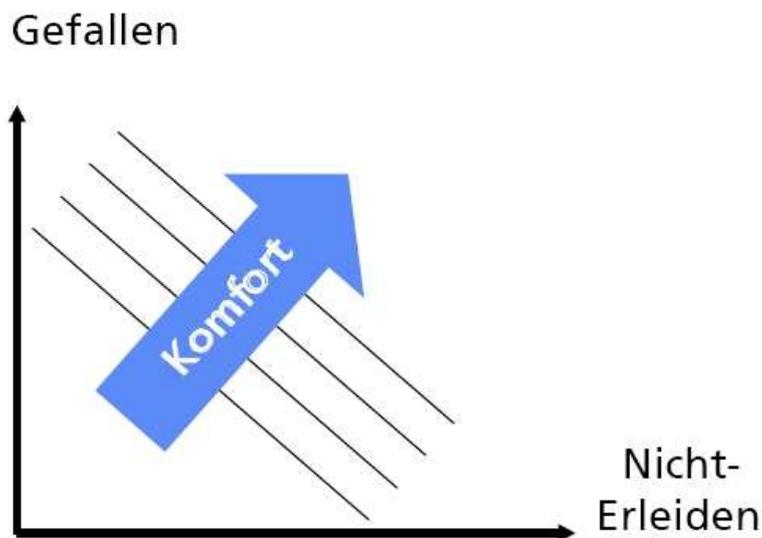


Abbildung 4: Komfort als Ergebnis aus Gefallen (Designqualität) und Nicht-Erleiden (ergonomische Qualität) (Knoll, 2006)

Man würde die Macht des Gefallens überschätzen, wenn man erwartet, dass es alle ergonomischen Nachteile kompensieren kann – dies dürfte nur zu einem gewissen Grad möglich sein, ab dem das durch die Nachteile hervorgerufene Erleiden wieder wahrnehmbar wird und das Wohlbefinden beeinträchtigt.

Umgekehrt heißt das aber auch, dass sich der Komfort aufgrund ohnehin guter ergonomischer Qualität (hohes Maß an Nicht-Erleiden) durch das Gefallen weiter steigern lässt. Diese Sprachregelung und die zugehörige Darstellung kann als alternative Form des Zhangschen Modells angesehen werden.

Eine deutliche Korrelation zwischen Komfortempfinden und Gefallen stellte Knoll (2006) anhand von drei Bürostühle mit gleichermaßen guten ergonomischen

Qualitäten, aber unterschiedlichem Aussehen auf. In einer umfangreichen Probandenstudie konnte herausgefunden werden, dass Bürostühle, die am besten gefallen, auch am komfortabelsten bewertet werden. Knolls Resultat ist: „Das Auge sitzt mit“, das Gefallen hat demzufolge einen entscheidenden Einfluss auf den Sitzkomfort. Es hat sich zudem gezeigt, dass dieser Einfluss über die Zeit im Vergleich zum haptischen Eindruck nachlässt und somit die physikalische Beschaffenheit eines Stuhls über die Dauer in den Vordergrund tritt.

In einer weiteren Studie von Mergl (2008) wurden zwei physikalisch identische Fahrzeugsitze aufgebaut, einer jedoch mit einem „hässlichen“ Bezug bepolstert. In Form eines paarweisen Vergleichs wurden beide Sitze hinsichtlich des Ansitzkomforts (= erster Kontakt mit dem Fahrzeugsitz) getestet. Mit verbundenen Augen wurden die Sitze von den Versuchspersonen nahezu ausgeglichen bewertet. Sehend fiel häufig die Entscheidung auf den physikalisch unveränderten Sitz, der serienmäßiges Design aufwies. Diese Untersuchung konnte zeigen, dass der Einfluss des Designs beim Ansitzkomfort eine größere Rolle spielt als physikalische Parameter wie z.B. die Schaumsteifigkeit.

### **2.2.2 Diskomfortpyramide nach Krist**

In Anlehnung an die Maslowsche Bedürfnispyramide (1958) entwickelt Krist 1993 auf der Grundlage von Befragungen eine Diskomfortpyramide, wie in Abbildung 5 gezeigt. Diese Aufstellung kam unter anderem dadurch zustande, dass äußerst wenig genannte Faktoren ganz unten angesiedelt wurden, da diese schon als erfüllt galten und somit schon gar nicht mehr bei den Befragten im Kernaugenmerk lagen. Die grundlegende Aussage dieser eindimensionalen Pyramide ist, dass zuerst Grundbedürfnisse erfüllt sein müssen, bevor die nächsten Stufen Bedeutung erlangen. Resultierend aus diesen Überlegungen und Erfahrungswerten wurde von Bubb (2003) die dargestellte Diskomfortpyramide abgeleitet.

Die Reihenfolge der verschiedenen Modalitäten stellt eine grobe Einschätzung dar. Je nach Höhe und Art des Einflusses können sich Überlappungen und Verschiebungen innerhalb der Diskomfortpyramide ergeben. Wichtig ist die Grundaussage, dass immer zuerst Grundbedürfnisse bezüglich des Diskomforts in einem ausreichenden Maße befriedigt werden müssen, bevor höher stehende Diskomforteinflüsse wahrgenommen werden. Deshalb spielt der Aspekt der Anthropometrie in heutigen Fahrzeugen eine solch große Rolle, da im Gegensatz zu historischen Fahrzeugen die „niedrigen“ Diskomfortbedürfnisse (geruchlos, frei

von grellem Licht und Vibrationen, ruhig und angenehm klimatisiert) weitgehend erfüllt sind.

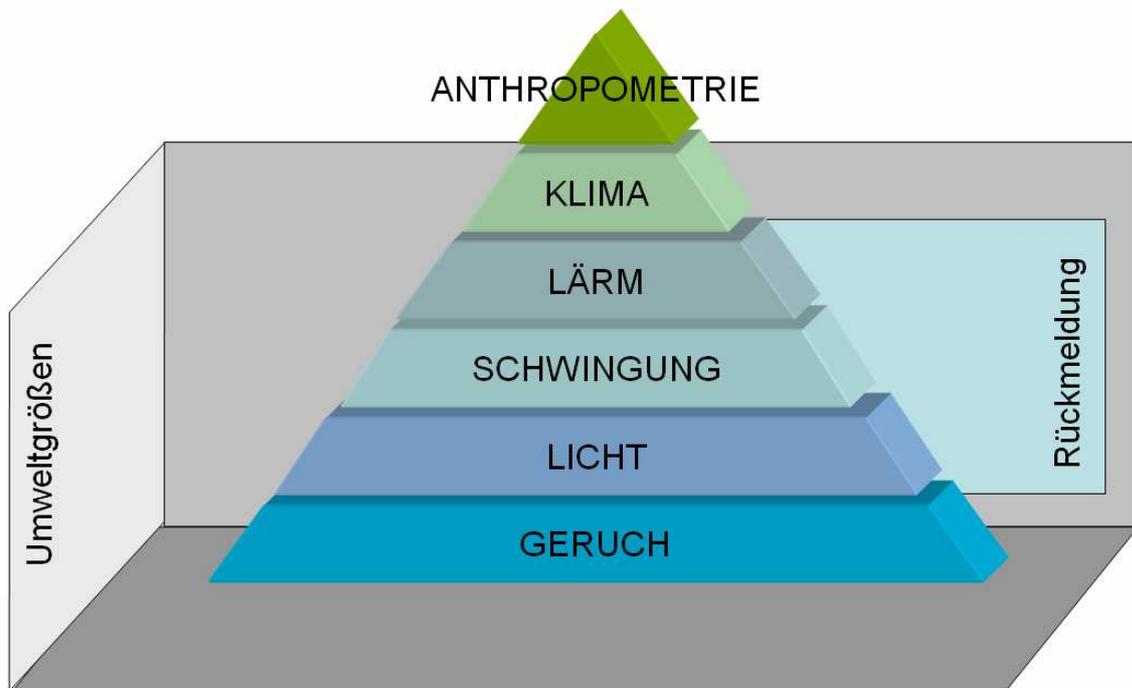


Abbildung 5: Diskomfortpyramide (Bubb, 2003)

Die Diskomfortpyramide setzt sich hauptsächlich aus Umweltgrößen zusammen – bis auf die anthropometrische Gestaltung. Bei der Fahraufgabe haben die Faktoren Licht, Schwingung und Lärm einen starken Rückmeldungscharakter; d.h. es wäre verkehrt, durch technische Maßnahmen gänzlich auf diese Informationen aus Vibration (= Geschwindigkeit, Fahrbahnbeschaffenheit, etc.) und Geräusch (= Belastung des Motors) zu verzichten.

Knoll (2006) ergänzt, dass die Diskomfortpyramide bei näherer Betrachtung vor allem eine Hierarchie von Diskomfortfaktoren darstellt. Demzufolge sind zunächst die Elementarfaktoren Geruch, Licht und Schwingungen sowie Lärm, Klima und anthropometrische Gestaltung zu erfüllen, bevor sich die höheren, subjektiven Faktoren „bequemer Sitz“ und „entspannte Haltung“ einstellen können.

2.2.3 *Komfortmodell nach de Looze*

De Looze et al. (2003) stellen eine Weiterentwicklung des Komfortmodells vor. Dabei wird eine Unterscheidung in Mensch, Produkt (Sitz) und Kontext vorgenommen. Wie Zhang betrachten auch sie Komfort als eine von Erwartungen und Emotionen gespeiste Größe, während Diskomfort klar von physischen Vorgängen bestimmt ist.

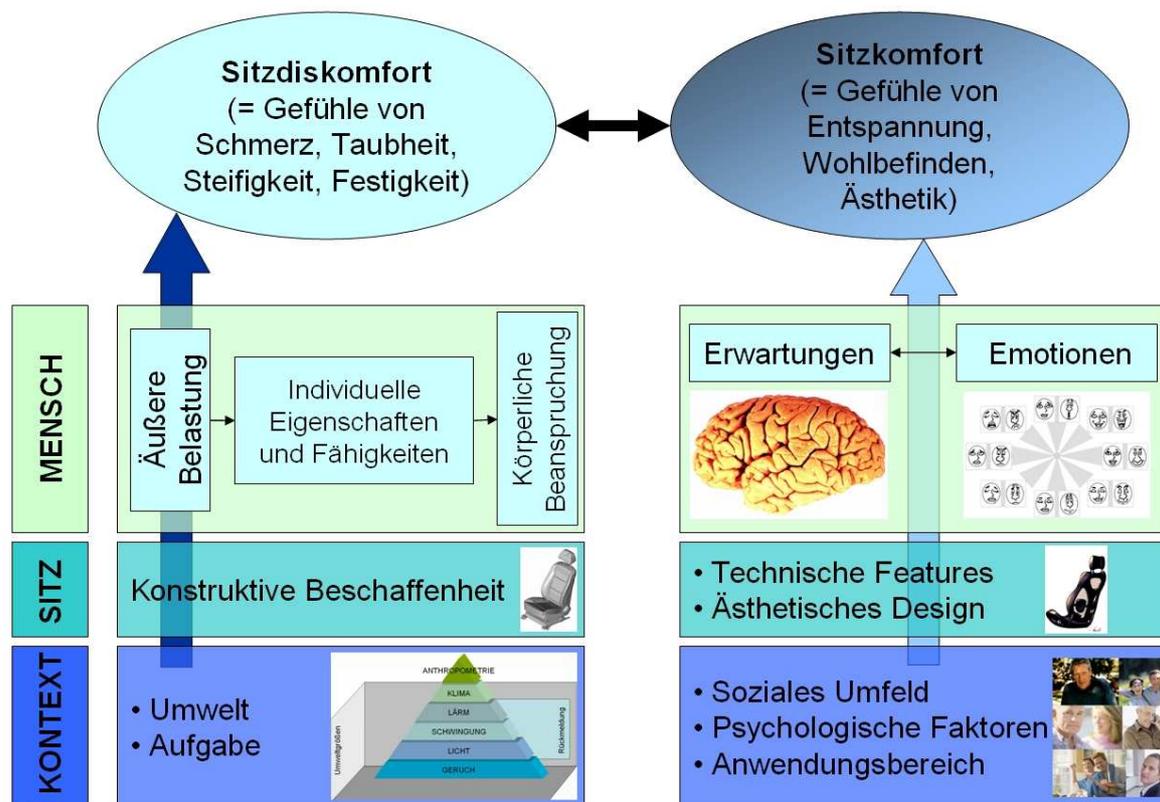


Abbildung 6: *Komfortmodell in Anlehnung an de Looze et al. (2003)*

In Anlehnung an das Modell von de Looze sind in Abbildung 6 die entscheidenden Faktoren des Sitzkomforts dargestellt. Die linke Seite des Komfortmodells steht unter dem herausgehobenen Begriff des „Sitzdiskomforts“, der laut Zhang physikalischen Prozessen unterliegt. Auf der „Menschebene“ kommt es zu einer äußeren Belastung, welche abhängig von den individuellen Eigenschaften und Fähigkeiten und der daraus resultierenden körperlichen Beanspruchung ist (Bubb, 2003). Die äußere Belastung selbst setzt sich aus der Arbeitsaufgabe (hier: der Fahraufgabe) und der Arbeitsumwelt zusammen. An dieser Stelle lässt sich die physikalische Umwelt mit Hilfe der Diskomfortpyramide nach Krist ideal einfügen. Unabdingbarer Einflussfaktor auf der Produktebene ist die konstruktive Beschaffenheit des Sitzes, die bei schlechter anthropometrischer Auslegung zu einer negativen äußeren Belastung führen kann.

Die rechte Seite des Modells gehört den Komfortebenen an. Auf der untersten Stufe des Komfortmodells spielen besonders psychologische Faktoren und das soziale Umfeld eine entscheidende Rolle. Auf der nächsten Ebene „Sitz“ hat das ästhetische Design eines Autositzes in Zusammenspiel mit physikalischen Eigenschaften einen großen Einfluss auf das Komfortempfinden. Auf der Mensch-Ebene stellt de Looze heraus, dass persönliche Erwartung, individuelle Gefühle und Emotionen (siehe Kapitel 3.2.4) die entscheidenden Faktoren sind. Jeder Mensch weist seinen eigenen erlernten Komfortstandard auf, strebt aber stetig nach einem höherem. Komfort wird daher erst dann aktiv wahrgenommen, wenn der bekannte, gewohnte Stand deutlich übertroffen wird.

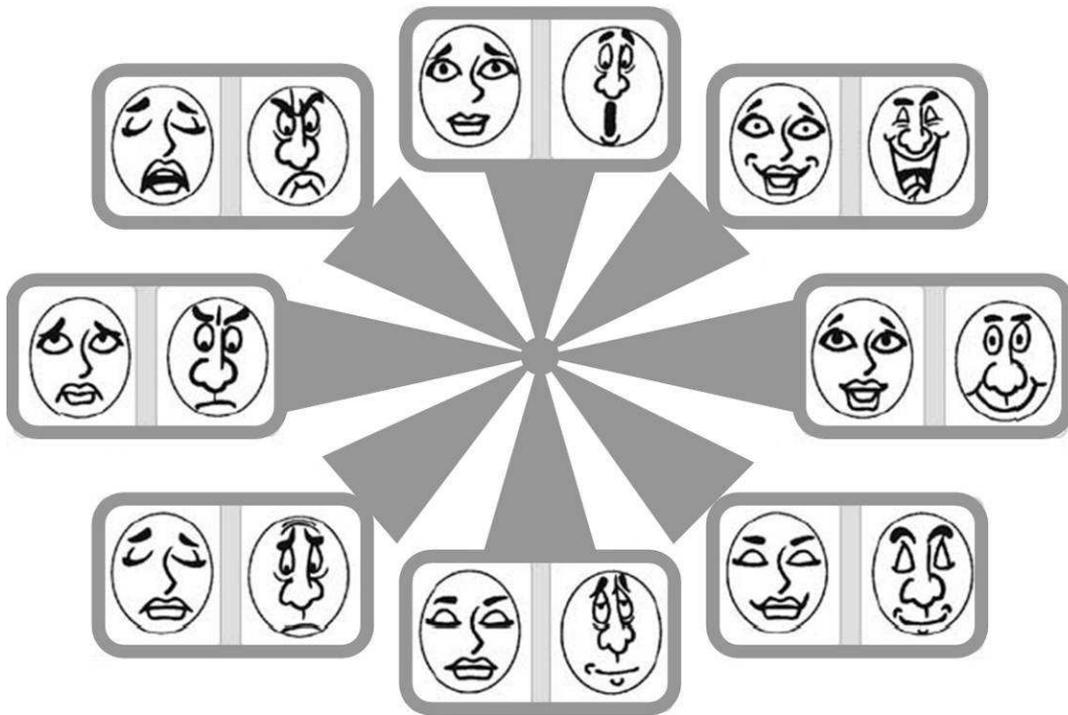
Das Modell nach de Looze et al. beschreibt die nicht zu vernachlässigenden Unterschiede zwischen Diskomfortvermeidung und Komfortzunahme. Deutlich listet man hier die beiden Linien der zwei unterschiedlichen Konstrukte Komfort und Diskomfort auf, die von verschiedenen Variablen beeinflusst werden. Das Modell stellt somit eine Präzisierung, aber keine Neuausrichtung des Zhangschen Komfortmodells dar.

### **2.2.4 Emocard**

Die Komfortmodelle haben bereits gezeigt, dass das Komforturteil auch entscheidend durch die menschliche Wahrnehmung geprägt ist. Dabei spielt die Ästhetik in Wahrnehmung, Urteil und Emotion eine entscheidende Rolle. Die Trennung der Komponenten ist hierbei nicht scharf und von wechselseitigen Beeinflussungen gekennzeichnet.

Ein geeignetes Vorgehen, um ein Gefallensurteil zu erhalten, stellt die non-verbale Befragung dar. Diese berücksichtigt, dass Emotionen und bewusste Artikulation kognitiv in zwei unterschiedlichen Hirnhälften verarbeitet werden.

Eine bewährte Form non-verbaler Befragung ist die Methode der sog. „Emocards“; Karikaturgesichter (acht männliche Gesichter und acht weibliche) mit eindeutigen emotionalen Ausdrücken werden bildlich dargestellt (siehe Abbildung 7). Eine Validierung der gezeichneten Mimik wurde mittels EMG, durch Anlegen von Elektroden im Stirn-, Wangen- und Kinnbereich erlangt. Die Gesichtsausdrücke unterscheiden sich nach Russel (1980) je nach Ausmaß von „Erregung“ (arousal) und „Zufriedenheit“ (pleasantness).



*Abbildung 7: Emocard nach Desmet et al. (2001)*

Grundlage ist Russels Zirkel der Gefühle, dem Desmet entsprechende Gesichtsausdrücke zugeordnet hat. So kann jede Person einem Objekt eine Emocard zuordnen, deren Gesichtsausdruck am treffendsten die eigene Gefühlslage beim Betrachten des Objektes wiedergibt. Ziel des Verfahrens ist es, die von Designmerkmalen hervorgerufenen Emotionen zu identifizieren. Die Emocard-Nutzung bietet damit die Möglichkeit, das Design eines Produkts nonverbal zu bewerten.

In Kombination mit einem semantischen Differential lässt sich eine Ableitung von der positiven Bewertung auf die Produktmerkmale bilden (vgl. Zenk, 2008). So kann man durch gezielte Einflussnahme an herausgefundenen Stellgrößen Einfluss auf die Komfortbeurteilung nehmen.

### **2.3 Physiologische Grundlagen**

Entscheidend für das Komfortempfinden eines Menschen auf einem Fahrzeugsitz ist die Kenntnis der physiologischen Grundlagen des Körpers.

Basierend auf dem Grundgedanken der Psychophysik (vgl. Fechner, 1860) ist die Empfindung eine Funktion des Reizes. In diesem speziellen Fall stellt der Sitzkomfort die „Empfindung“ und der Druck den „Reiz“ dar, der durch den Sitz an unterschiedlichen Körperstellen unterschiedlich stark auf den Menschen einwirkt (Mergl, 2006).

Nach Literaturrecherchen von Hartung (2006) gilt: Ab einer äußeren Druckeinwirkung von 0,08-0,16 N/cm<sup>2</sup> ist eine Versperrung des venösen Abflusses möglich; ab einer Druckeinwirkung von 0,42 N/cm<sup>2</sup> kann es zu Schmerzreizen kommen. Bei lokalisierter Druckeinwirkung treten zudem verstärkt Gewebsschädigungen auf; bestes Beispiel hierfür ist das Sitzen auf einem Balken für längere Zeit.

Goossens (1994) stellt fest, dass bei jungen gesunden Menschen am Kreuzbein (Os sacrum) bereits bei 1,16 N/cm<sup>2</sup> reiner Druckbelastung eine Mangeldurchblutung einsetzt.

Diese Erkenntnisse haben für das Komfortempfinden auf dem Fahrzeugsitz entscheidende Bedeutung. Man muss sie jedoch differenziert im Hinblick auf die relevanten Körperbereiche betrachten.

#### **2.3.1 *Simultane Raumschwelle***

Entscheidend für den Sitzkomfort ist in erster Linie der Bereich der Oberschenkel und des Rückens. Daher muss gezielt nach der Sensitivität in diesem Körperbereich gefragt werden.

Der Begriff der simultanen Raumschwelle ist mit dem räumlichen Auflösungsvermögen gleichzusetzen. Dazu wird ein Tastzirkel wiederholt mit zunehmender Öffnung auf die Haut aufgesetzt. Der Punkt, an dem die beiden Zirkelspitzen als zwei getrennte Empfindungen wahrgenommen werden, wird als Zweipunktschwelle bezeichnet.

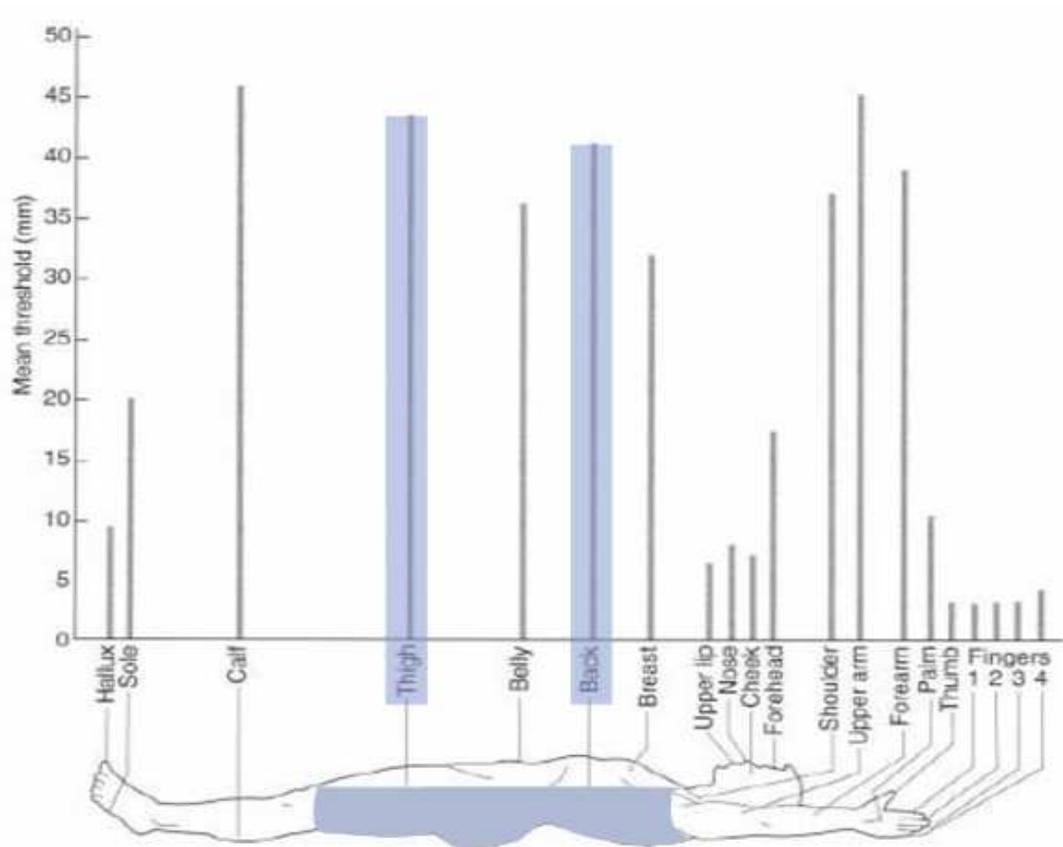


Abbildung 8: Simultane Raumschwellenwerte [statisch] (Schmidt, Thews, Lang, 2000)

Wie in Abbildung 8 zu erkennen ist, weist der Bereich auf der Rückenseite und an der Unterseite der Oberschenkel, der die Hauptschnittstelle zwischen Mensch und Sitz ist, einen simultanen Raumschwellenwert von 40-45 mm auf.

### 2.3.2 Hautrezeptoren

Das entscheidende Organ der Komfortwahrnehmung ist die Haut. Die Sensorik der Haut kann Diskomfort in folgenden Stufen wahrnehmen: als

- exteroception (Reizung von Hautsensoren)
- proprioception (Reizung von Sensoren in Muskeln, Sehnen und Gelenken)
- interoception (Reizung von inneren Organsystemen)
- nociception (Reizung von Schmerzsensoren).

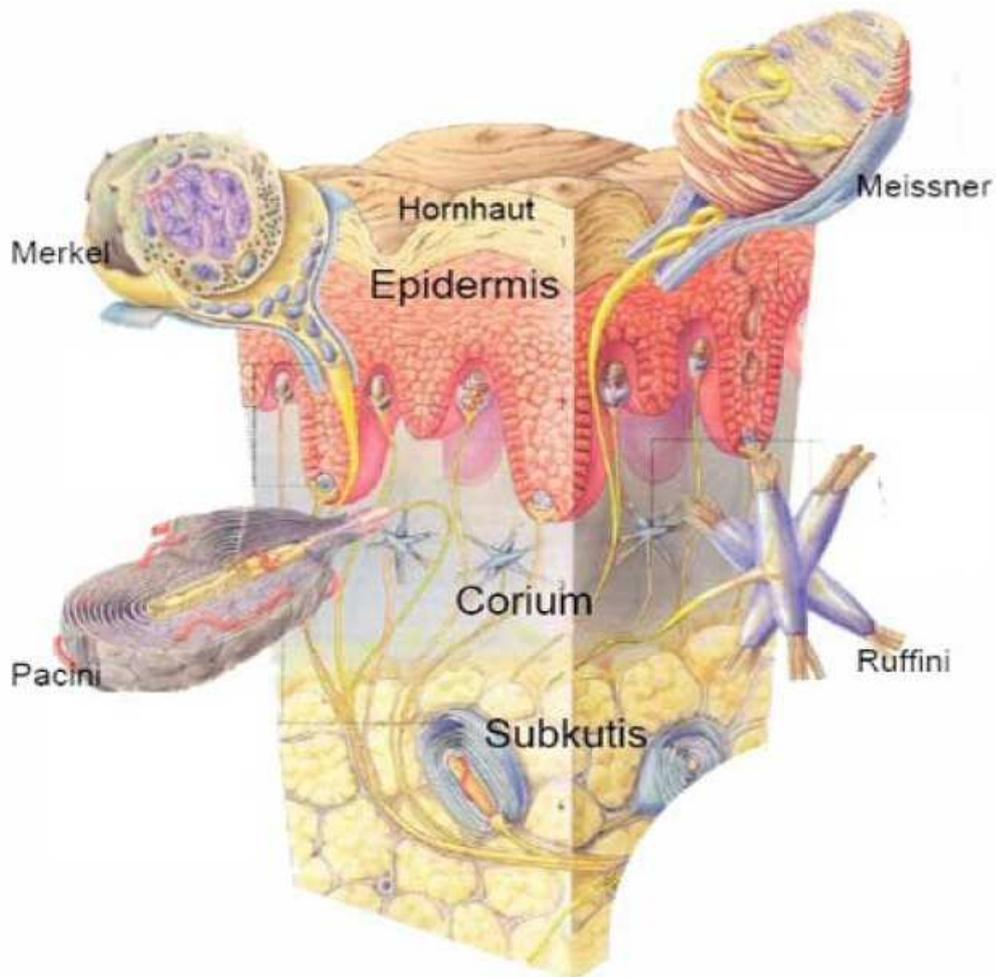


Abbildung 9: Tastsinn, Organe der Haut (Ecke, 2007)

Nach Schwegler (2002) besteht die Haut aus drei Schichten, nämlich (von außen nach innen) der Oberhaut (Epidermis) mit ihrer Horn- und Keimschicht, der Lederhaut (Corium), in der Kollagenfasern parallel zur Oberfläche laufen und der Haut Festigkeit geben, und das Unterhautgewebe (Subcutis) mit Fettschicht, welche vor Auskühlung schützt und Energie speichert (vgl. Abbildung 9).

In Bezug auf Berührungssensoren unterscheidet man vier relevante Typen:

Merkel-Zellen ( $20/\text{cm}^2$ ) sind häufig und klein und registrieren den Druck auf der Haut (P-Sensoren) mit einfachsten Rezeptoren des Tastsinns in der Oberhaut.

Meissner-Körperchen ( $100/\text{cm}^2$ ) sprechen besonders stark auf Druckänderungen in der Haut an, reagieren aber kaum auf gleichbleibenden Druck (D-Sensoren) zwischen Ober- und Unterhaut. Wir benötigen sie insbesondere, um kleinere Gegenstände präzise zu greifen. An der Fingerbeere kommt man auf bis zu 130 rezeptive Felder pro  $\text{cm}^2$ .

Ruffini-Kolben ( $10/\text{cm}^2$ ) sind relativ selten in der Lederhaut, messen dort die Spannung, reagieren aber noch empfindlicher auf Spannungsänderungen (PD-Sensoren); sie kommen an den Stellen der Haut vor, wo starke Scherkräfte zu bewältigen sind (etwa in den Handflächen).

Vater-Pacini-Körperchen ( $2/\text{cm}^2$ ) sind reine Vibrationsdetektoren und gehören den schnell adaptierenden Rezeptoren an. Sie sprechen nur auf sich schnell ändernde Berührungsreize an, nicht hingegen auf gleich bleibenden Druck im Unterhautfettgewebe. Die maximale Empfindlichkeit liegt bei einer Vibration um 300 Hz, bei der eine Verformung von wenigen Mikrometern genügt, um die Rezeptoren zu erregen.

Es ist anzunehmen, dass für das Diskomfortempfinden die langsam adaptierenden Merkel-Zellen ausschlaggebend sind. Auch die Ruffini-Kolben nehmen vermutlich Einfluss; ihre Bedeutung bei der Wahrnehmung von mechanischen Reizen ist medizinisch noch nicht ganz geklärt.

### 2.3.3 Sensitivität von Oberschenkel und Gesäß

Ein entscheidender Faktor für die Wahrnehmung von Diskomfort beim Sitzen ist die Sensitivität des Oberschenkels und des Gesäßes. Hierzu wurden Grundlagenuntersuchungen von Hartung und Goossens angestellt, ab welcher Druckschwelle der Mensch unter den Oberschenkeln und unter den Sitzbeinhöckern einen Unterschied wahrnehmen kann (vgl. Abbildung 10).

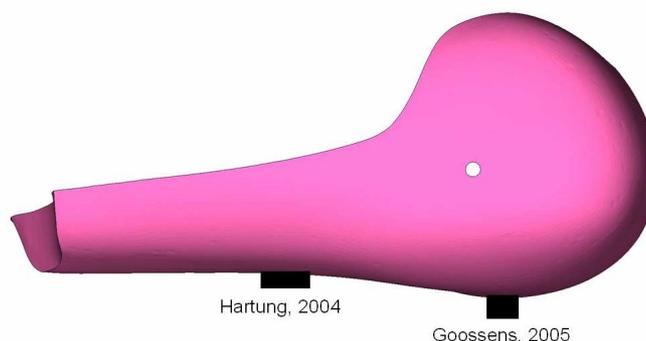


Abbildung 10: Skizzierung der Kontaktstellen der Versuchsreihen nach Hartung und Goossens

Hartung (2004) führte eine Versuchsreihe an fünf Frauen und fünf Männern (zwischen 23 und 59 Jahren) durch, insgesamt basierend auf 7200 Druckwerten. Als Kontaktgegenstand fungierte eine Pneumatikblase mit einem Durchmesser von 60 mm, die dem sitzenden Probanden unter dem linken mittleren

Oberschenkel aufgepumpt wurde. Ergebnis der umfangreichen Untersuchung war, dass vom Menschen erst ab einer Druckdifferenz von 2,66 kPa (bei einem Kontaktdurchmesser von 60 mm) signifikant ein Unterschied entdeckt werden kann.

Zusätzlich stellte sich heraus, dass ältere Menschen einen Sensitivitätsverlust haben und den Druckunterschied somit schlechter auflösen können, dass aber kein Unterschied der Empfindung zwischen Mann und Frau besteht. Eine weitere Erkenntnis der Untersuchung war, dass ein Druckabfall minimal besser beurteilt werden kann als ein Druckanstieg.

2005 untersuchte Goossens in einer sehr ähnlichen Versuchsreihe an fünf Frauen und fünf Männern (zwischen 19 und 30 Jahren) die Sensitivität des Bereichs um den menschlichen Sitzbeinhöcker. Der Kontaktgegenstand war ein rundes, synthetisches Material, das sich bezüglich des Durchmessers zwischen 10 mm und 20 mm variieren ließ. Ergebnis der 900 erzielten Druckwerte war, dass bei einem Kontaktgegenstand mit einem Durchmesser von 20 mm Empfindungen erst ab einem Druckunterschied von 3,5 kPa deutlich aufgelöst werden können, während dieser bei einem Durchmesser von 10 mm schon ab 2,7 kPa zu entdecken ist (Irrtumswahrscheinlichkeit < 50%). Bei Goossens findet sich der Hinweis, dass die Dauer des Reizes keinen Einfluss auf das Sensitivitätsempfinden hat. Fernandez und Poonawala (1998) haben hinsichtlich des Diskomforts in ihren Untersuchungen herausgefunden, dass dieser über die Zeit zunimmt.

### **2.3.4 Bewegungsmuster des Menschen**

Für optimales Sitzen ist es nicht ausreichend, die einzelnen Körpersegmente separat auf die dort vorherrschenden Drücke zu untersuchen, sondern man muss stets den sitzenden Menschen als ganzen betrachten, da die einzelnen Körperelemente miteinander in Verbindung stehen.

Zur Veranschaulichung der gesetzmäßigen Kopplung der einzelnen Bewegungskomponenten im Bewegungsmuster der aufrechten und krummen Körperhaltung in einer Ausgangsstellung wurde von Brügger das sog. Zahnradmodell (Abbildung 11) gewählt.

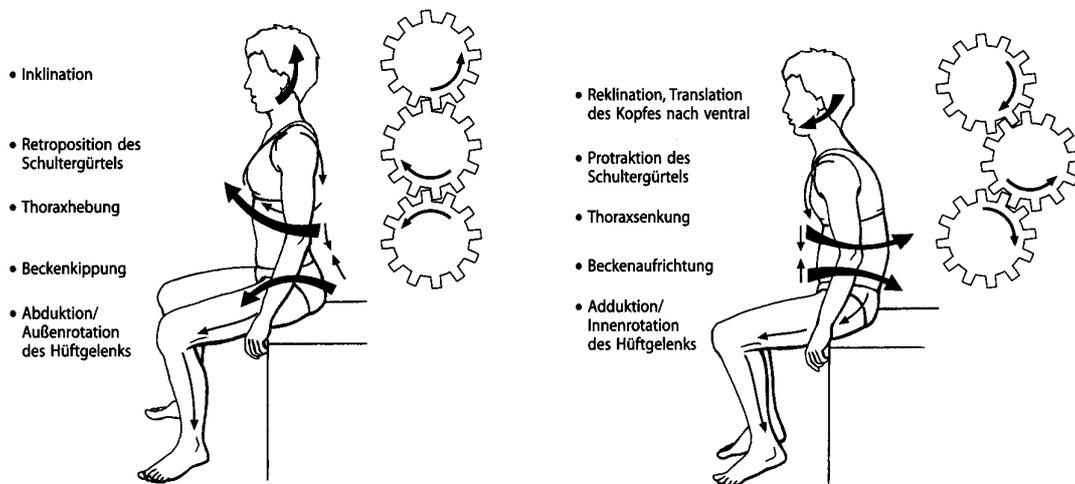


Abbildung 11: Zahnradmodell nach Brügger

Jedes Bewegungsmuster besteht aus zahlreichen Einzelbewegungen, die innerhalb der Freiheitsgrade der beteiligten Gelenke stattfinden. Da die Einzelbewegungen Bestandteile von komplexen Bewegungsmustern sind, werden sie als Bewegungskomponenten bezeichnet. Diese stehen innerhalb eines Bewegungsmusters in einer gesetzmäßigen Kopplung zueinander (Kubalek-Schröder, Dehler, 2004). Durch eine Beckenkipfung, wie sie beispielsweise durch Herausfahren der Lordosenstütze erzeugt wird, kommt es zu einer Thoraxhebung sowie einer Retroposition des Schultergürtels. Gleichzeitig wird die Halswirbelsäule in eine aufrechte Position gebracht (Inklinationsbewegung).

Die aufgeführten biomechanischen Koppelungen finden bei jedem gesunden Menschen in gleicher Art statt. Ist eine Bewegung, wie vorangegangen beschrieben, durch das Becken oder beispielsweise durch den HWS-Bereich eingeleitet, werden diese Koppelungen ausgelöst. Die Sperrung einer Einzelkomponente, z.B. einer nach vorne gezwungenen Kopfposition, führt zu einer Blockierung der Lordosierungsbewegung in der Lendenwirbelsäule. Das genannte Bewegungsmodell funktioniert genauso umgekehrt.

Hartung (2006) konnte zwar keinen mathematischen Zusammenhang zwischen den Druckverteilungen und dem Diskomfort finden; er entdeckte aber einen Zusammenhang zwischen den Druckverteilungen im Ganzen und den subjektiven Bewertungen. Ebenso lässt sich dieser Verweis auch bei Oudenhuijzen (2003) nachlesen, der darauf aufmerksam macht, dass keine einzelne Betrachtung von Parameter, wie z.B. der maximale Druck unter den Sitzbeinhöckern, sondern nur eine gesamthafte Betrachtung der Druckverteilung sinnvoll ist.

## 2.4 Objektivierung des Sitzkomforts mittels Druckverteilung

De Looze et al. (2003) vergleichen in einer umfassenden Literaturrecherche 21 Studien zum Zusammenhang zwischen Komfort/Diskomfort und objektiven Messgrößen wie Körperhaltung und -bewegung, Muskelaktivität (EMG), Wirbelsäulenbelastung und Schwellung der Füße.

Der deutlichste Zusammenhang zu subjektiven Bewertungen konnte dabei für die Druckverteilung bestätigt werden.

Um objektive Aussagen über den Sitzkomfort im Automobil machen, hat Mergl (2006) daher eine umfangreiche Befragungsstudie durchgeführt, die aufgrund ihrer aussagekräftigen Ergebnisse die zentrale Basis für ein automatisiertes Sitzeinstellungssystem bilden kann.

### 2.4.1 Parameter des Sitzkomforts

Mergl (2006) untergliedert die Dimensionen des Sitzkomforts in Haltungskomfort, Druckverteilung, Ansitzgefühl, Mikroklima, Schwingungskomfort, Seitenführungseigenschaften und Langzeitkomfort.

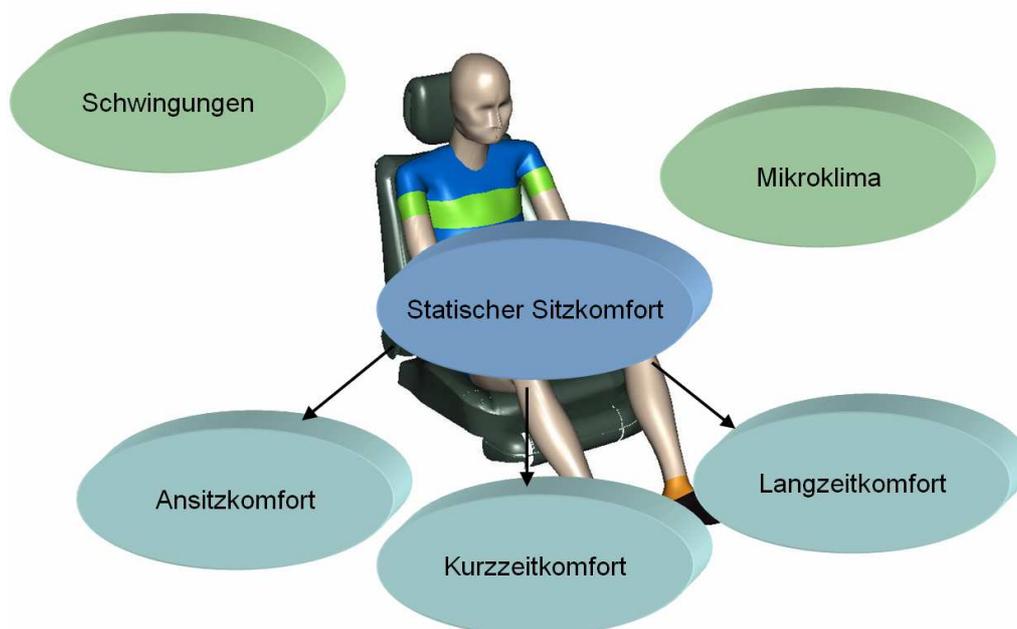


Abbildung 12: Dimensionen des Sitzkomforts (Bubb, 2007 – RAMSIS User Conference)

In Anlehnung an die Diskomfortpyramide mit direktem Einfluss des Sitzes kann Abbildung 12 erstellt werden, die bei Bubb (2007) aufgeführt ist. Zwei grundlegende Faktoren des Sitzkomforts sind der Schwingungs- und der Mikroklimakomfort. Hauptaugenmerk dieser Arbeit kommt dem statischen

Sitzkomfort zu, der sich in Ansitz- (oder auch Showroomkomfort), Kurzzeit- und Langzeitkomfort unterteilen lässt. Dabei gliedert Hartung diese wie folgt auf: Ansitzkomfort (wenige Sekunden nach dem Setzen), Kurzzeitkomfort (15-30 min) und Langzeitkomfort alles über 30 min. Im Rahmen dieser Arbeit geschieht eine Konzentration auf den Ansitz-/Kurzzeitkomfort mit Auszügen und Untersuchungen im Hinblick auf den Langzeitkomfort.

### **2.4.2 Ideale Druckverteilung**

Mergl (2006) hat eine umfangreiche Studie zur idealen Druckverteilung durchgeführt und für Kurz- und Langzeit validiert.

Er erstellte ein Modell für den Zusammenhang zwischen Druckverteilung und Diskomfort. Dabei kombinierte er den objektiven Messwert (Druckmessmatte) mit der subjektiven Bewertung der Probanden (Diskomfort-Interview).

Für die Erfassung des Diskomforts wurde auf eine Methode zurückgegriffen, in der eine Kombination aus einer „Body Map“<sup>1</sup> und einer „Category Partitioning Scale“ CP50<sup>2</sup> Verwendung findet (Hartung, 2006).

Die Versuchsreihe der Kurzzeituntersuchungen an 40 Probanden (20 Männer, 20 Frauen) auf Sitzen lieferte folgende Ergebnisse:

Für die Sitzfläche konnten signifikante Zusammenhänge zwischen den drei Parametern der Druckverteilung und dem Diskomfort gefunden werden. Demnach sollte eine Druckverteilung die in Abbildung 13 dargestellten Kriterien für prozentuale Lastverteilung, maximalen Druck und Gradienten der Summenkurve erfüllen. Für den Schulterblattbereich und die Seitenwangen in Sitzfläche und Lehne konnten noch keine signifikanten Ergebnisse ermittelt werden, da diese Bereiche extrem vorliebenabhängig sind.

Die in Abbildung 13 dargestellten Werte haben für Menschen jeder Körpergröße und jeden Gewichts Gültigkeit. Der Sitz muss so verstellbar sein, dass für alle Personen die gleichen relativen Lasten in ihren Körperteilbereichen erreichbar sind.

---

<sup>1</sup> In Analogie zu Corlett und Bishop (1979) wurde von Hartung eine Body Map entwickelt, die aufgrund einer Aufteilung der Körperanlagefläche in 17 definierte Körperbereiche, die die Lokalisierung und Bewertung für die Versuchspersonen erleichtert.

<sup>2</sup> Diese Skala wurde bereits von Shen & Parson (1997) evaluiert.

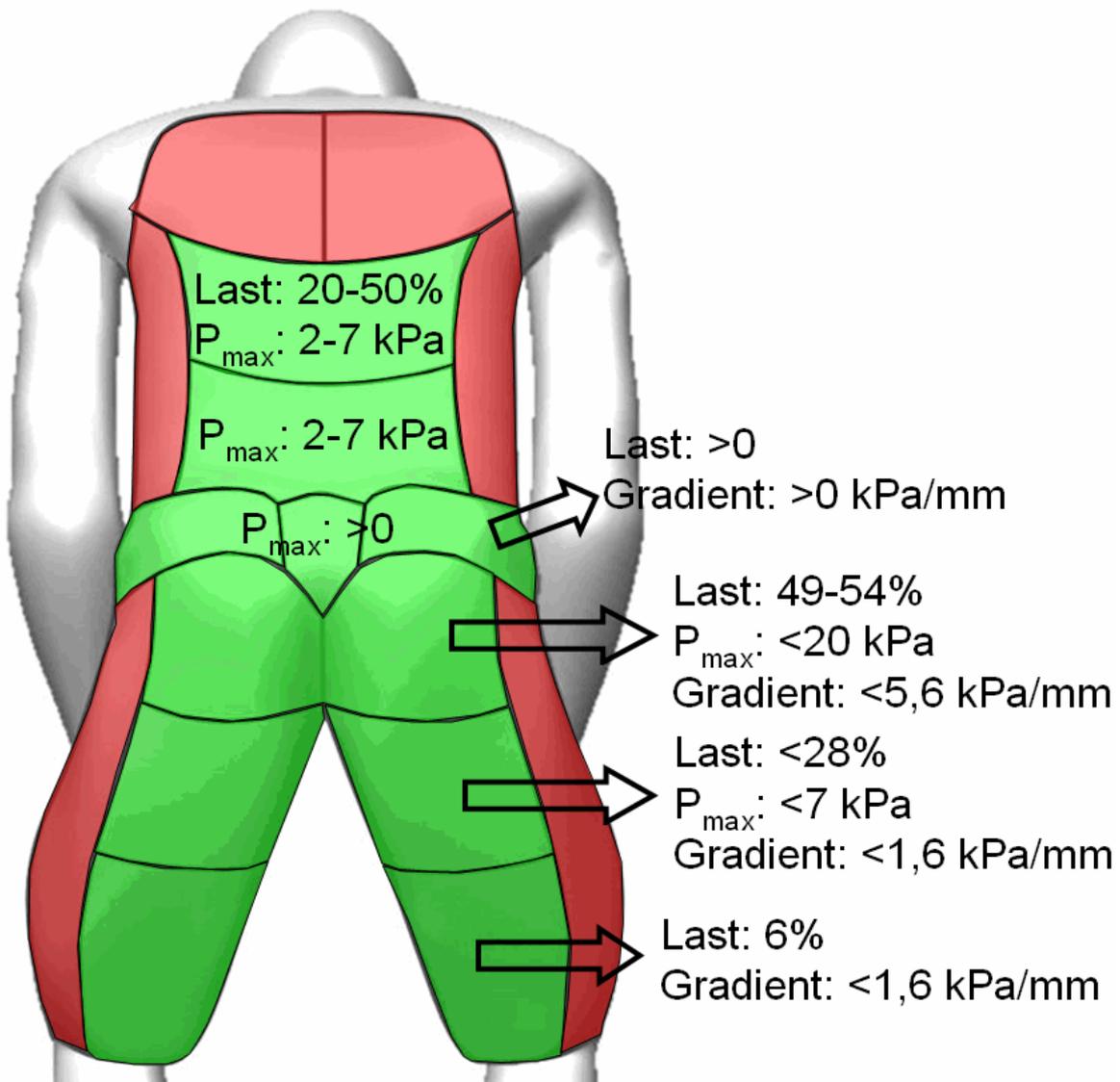
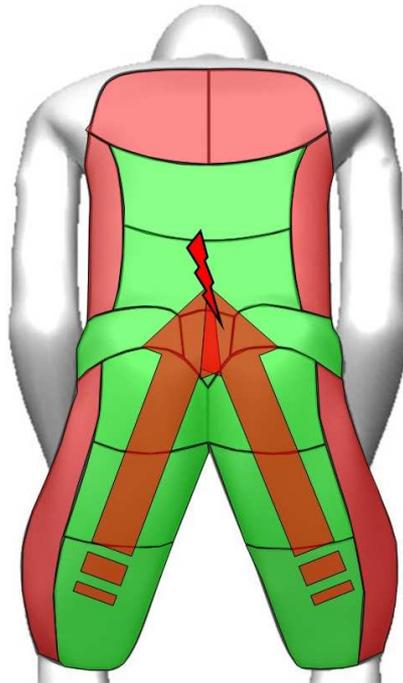


Abbildung 13: Richtwerte für eine gute Druckverteilung:  
Rot markierte Bereiche zeigen keinen abgesicherten Zusammenhang; die Rückenwerte sind für Kurzzeitdiskomfort, die Sitzwerte sind für Kurz- und Langzeitdiskomfort validiert (Mergl, 2006).

Anhand von dreistündigen Versuchsfahrten erprobte Mergl an zehn Probanden sein Modell der idealen Druckverteilung. Die Sitzeinstellung gemäß des Modells wurde besser oder zumindest nicht schlechter als die anderen Sitzeinstellungen auf der CP50-Skala bewertet. Somit zeigt sich, dass das Kurzzeit-Modell zur idealen Druckverteilung auch für die Langzeit valide ist. Dadurch ist folglich die Möglichkeit geschaffen, mithilfe der Druckverteilung gemessen nach wenigen Minuten in einem Autositz den Langzeitdiskomfort vorherzusagen.

Bei den Langzeituntersuchungen konnte Mergl zudem zeigen, dass ein Teil des Diskomforts im unteren Rücken durch die Druckverteilung auf der Sitzfläche hervorgerufen wird, ohne dass eine Veränderung der Lehne vorlag.



*Abbildung 14: Eine Abweichung in der Sitzfläche von der idealen Druckverteilung hat negative Auswirkung auf den unteren Rückenbereich.*

Hierbei spielt die Unterstützung der vorderen Oberschenkel eine entscheidende Rolle. Zu wenig Druck unter den vorderen Oberschenkeln führt zu hohem Druck auf den Sitzbeinhöckern (Gesäß). In Kombination mit erhöhter Muskelanspannung, die nötig ist, um das Becken aufzurichten, kann dies auf Dauer als Schmerz im unteren Rückenbereich wahrgenommen werden (vgl. Abbildung 14).

Mergl (2006) weist darauf hin, dass die Ursache eine Verspannung von Muskeln, welche zwischen Oberschenkel und unterer Wirbelsäule ausgespannt sind, sein könnte. Beispielsweise sei hier der *musculus iliopsoas* genannt: Dieser Muskel verbindet den Oberschenkelknochen (Femur) mit der Lendenwirbelsäule. Der *musculus iliopsoas* wird für die Aufrichtung des Beckens und zur Außenrotation des Oberschenkels benötigt.

Mit den Forschungsarbeiten Mergls ist die entscheidende Grundlage für die automatische Sitzeinstellung geschaffen, da über die Daten zur Druckverteilung nun eine Prognose über den Sitzkomfort gegeben werden kann. Mergl liefert so die Druckwerte, die die Zielwerte für eine ideale Sitzeinstellung darstellen können. Allerdings müssen diese Ergebnisse zunächst noch durch medizinische Validierung überprüft werden, bevor sie als Grundlage für ein neues Sitzkonzept herangezogen werden können.

### 3 Validierung des Modells mittels Bandscheibendruckmessungen

Nordin (2004) beschreibt, dass über viele Jahre hinweg das Sitzen als einer der Hauptrisikofaktoren für Rückenschmerzen angesehen wurde. In einer umfassenden Literaturrecherche über den Zusammenhang zwischen Sitzen und Rückenschmerzen stellt sie demgegenüber fest, dass das Sitzen allein keine erhöhte Korrelation mit Rückenschmerzen zeigt; erst in Kombination mit anderen Koexpositionen wie Ganzkörpervibration oder Zwangshaltungen löst das Sitzen Rückenschmerzen aus.

Bei der Fahraufgabe muss eine solche Zwangshaltung eingenommen werden, da bei dieser Tätigkeit beide Hände am Lenkrad und die Füße auf der Pedalerie verharren. Insofern kann das Sitzen auf dem Fahrzeugsitz auf längere Dauer durchaus Rückenschmerzen verursachen. In diesem Kapitel sollen verschiedene Haltungen des Fahrers näher betrachtet und bezüglich ihrer physiologischen Auswirkungen analysiert werden.

Als zentrales Untersuchungsmittel diene dabei eine In-vivo-Bandscheibendruckmessung, also die Messung des Bandscheibendrucks an einer lebenden Person in unterschiedlichen Sitzpositionen.

Auf den ersten Blick erscheint es fraglich, ob eine solche Untersuchung des Bandscheibendrucks überhaupt geeignet für Aussagen über den Rückenschmerz ist. Der Bandscheibendruck selbst nämlich ist nicht die Ursache für Rückenschmerzen, da die Bandscheibe nicht mit Gefäßen versorgt ist (Neidlinger-Wilke, 2004). Rückenschmerzen entstehen fast immer aufgrund von Fehlbelastungen und Fehlhaltungen, was zu einer Dauerbelastung der beanspruchten Muskeln im Bereich der Wirbelsäule und somit zu einer Muskelverspannung führt. Auch unter psychischer Unzufriedenheit und Anspannung lässt sich erhöhte Muskelanspannung im Rücken- und insbesondere im Nackenbereich feststellen. Nichtsdestotrotz ist der Bandscheibendruck aber nachweislich ein Indikator für eine erhöhte Muskelanspannung im Rückenbereich (Nachemson, 1966), die ihrerseits wiederum den Rückenschmerz verursacht. Für die durch Bandscheibenfehlbelastungen ausgelösten Muskelverspannungen und die hierdurch bedingten Rückenschmerzen bieten In-vivo-Untersuchungen daher sehr aussagekräftige Untersuchungsergebnisse, da lebensnahe und natürliche physiologische Verhältnisse vorliegen.

### 3.1 Medizinische Zusammenhänge

Für die Untersuchung der Bandscheibendruckmessung ist es entscheidend, die anatomischen Einflüsse der Wirbelsäule in Betracht zu ziehen. Die Druckveränderungen der Bandscheibe in der Lendenwirbelsäule können auf unterschiedlichste Einflüsse zurückgeführt werden. Als erstes lässt sich ein allgemein bekannter Grund anführen: Um eine Körperhaltung – egal welche – einzunehmen, muss in irgendeiner Körperregion eine Muskelanspannung erfolgen, wodurch der Druck in der Bandscheibe ansteigt. Eine weitere Möglichkeit der Erklärung für eine Druckveränderung durch Wirbelsäulenbewegungen kann die anatomische Beschaffenheit um den Wirbelkörper herum sein.

Eine wichtige Rolle für die Druckveränderung spielen die Ligamente (Kapandji, 1985). Einige von ihnen haben eine überwiegend bewegungslimitierende Funktion (Hüfte); aber ansonsten für die Bewegungsführung eine untergeordnete Bedeutung. Andere Ligamente, etwa das vordere und hintere Kreuzband, haben eine überwiegend bewegungsführende Funktion. Ein dritter Typ von Ligamenten hat die Funktion, verbundene Knochenanteile in ihrer funktionellen Kongruenz über den gesamten Bewegungsbereich in der Funktionsstellung zu halten, so wie die Wirbelkörper der Wirbelsäule. Dementsprechend werden die Wirbelgelenke durch die Bandverbindungen stabilisiert.

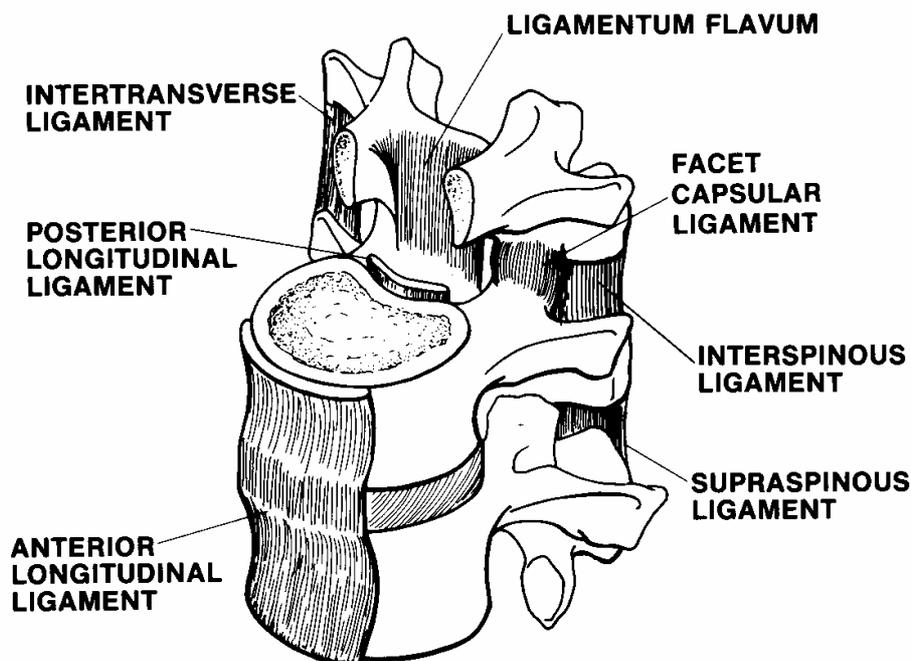


Abbildung 15: Ansicht (ventrolateral) zweier Wirbelkörper mit Bandapparat (White, Panjabi, 1978)

Bereits ohne Belastung besteht ein geringer Druck in der Bandscheibe. Dieser wird durch die elastische Vorspannung der Bänder, die das Wirbelgelenk überbrücken, verursacht (Brinckmann, 2004). White und Panjabi (1978) beschreiben detailliert (vgl. Abbildung 15), dass die Ligamenta flava – zwischen den Wirbelbögen ausgespannt – auch im Ruhezustand unter Spannung stehen. Bei Beugung der Wirbelsäule werden diese stärker gedehnt, überwiegend wird aber die Bandscheibe komprimiert, da der Bandapparat aufgrund seiner Vorspannung eher bewegungslimitierend wirkt.

Im Ruhezustand produzieren die Ligamente – besonders das Ligamentum flavum – einen Ruhedruck auf die Bandscheiben und gewährleisten so die Stabilität des Rückgrats. Falls die Wirbelsäule – insbesondere die Lendenwirbelsäule – eine neutrale Körperhaltung verlässt, beispielsweise bei Bewegung des Beckens, steigt der Druck in der Bandscheibe an.

Alle Wirbelkörper sind mit Facetten verbunden. White und Panjabi (1978) zeigen, dass der Bereich L4-L5 und L5-S1 dem höchsten Druck ausgesetzt ist und zudem dazu neigt, die meiste Bewegung zu leisten. Untersuchungen von Wilke (2004) haben gezeigt, dass Druckveränderung in den Bandscheiben bei unterschiedlichen Körperhaltungen auftreten. So liegt es nahe, dass auch in unterschiedlichen Fahrzeugsitzpositionen der Druck in der Bandscheibe variiert.

White, Panjabi (1978) und Kendall (2001) beschreiben, dass für eine Druckveränderung in der Bandscheibe der Musculus iliopsoas (Lenden-Darmbeinmuskel) – insbesondere der Musculus psoas major (großer Lendenmuskel) – verantwortlich sein muss (vgl. Abbildung 16).

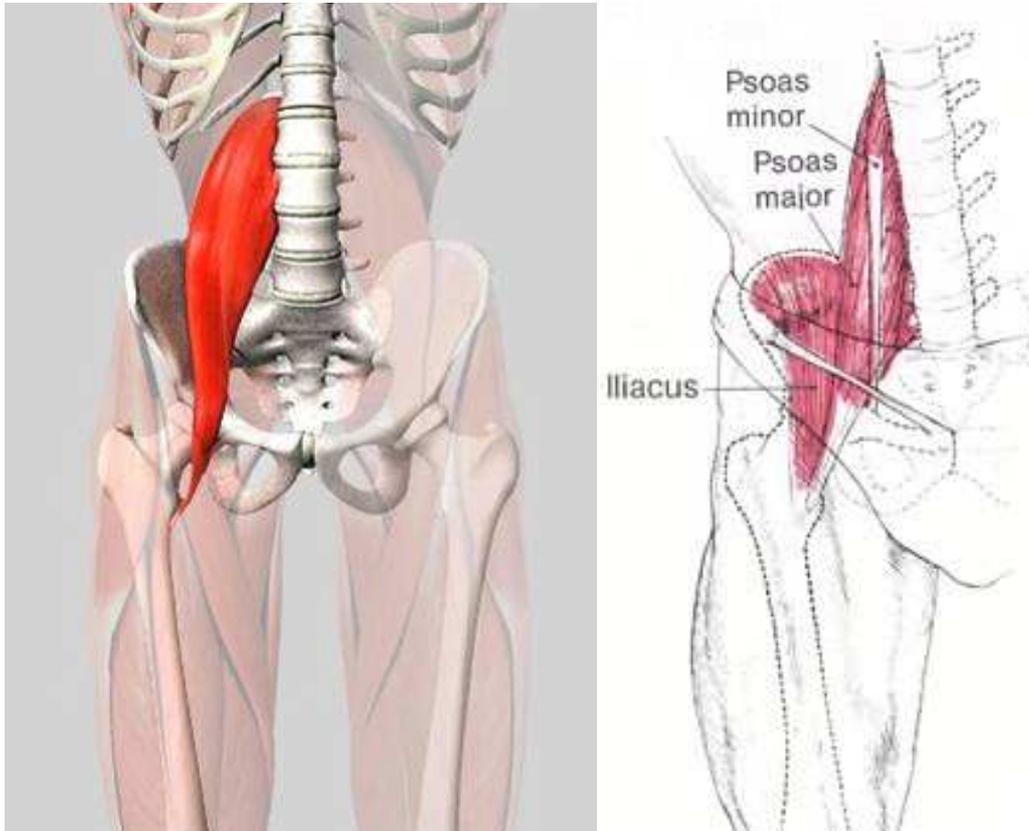


Abbildung 16: Musculus iliopsoas (Psoas minor, Psoas major, Iliacus) – Kendall (2001)

Die Ansatzstellen des Muskels sind die lateralen Seiten des Wirbelkörpers und die der Bandscheiben L1-L5. Seinen Ursprung hat der Muskel an der Spitze des Oberschenkelschaftes auf der Innenseite, dem sog. Trochanter minor (kleiner Rollhügel). Der Musculus psoas major ist der stärkste Hüftbeuger des Menschen. Des Weiteren bewirkt er bei beidseitiger Anspannung eine Beugung in der Wirbelsäule. Durch das Abkippen des Beckens bei kyphotischem Sitzen muss dieser Muskel Haltearbeit leisten, was auf Dauer Rückenschmerzen verursachen kann. Darüber hinaus ist bekannt, dass die Form der Lendenwirbelsäule durch die Kontraktion des Musculus iliopsoas verändert wird (Kendall, 2001). Jede Flexion der Wirbelsäule führt zu einer Druckveränderung in der Bandscheibe.

Der Grund für einen Druckanstieg ist folglich eine Kombination aus Verbiegung und Stabilisation der Wirbelsäule durch Muskelkontraktion und ein Zusammenhalten durch die Ligamente. Wenn die Sitzposition nicht optimal ist,

wird eine höhere Muskelaktivität für die Stabilisierung gefordert, was zu einem deutlich höheren Druck in der Bandscheibe führt. In diesem Fall ist der Muskel Iliopsoas angespannt, da er statische Haltearbeit leisten muss, um die Oberschenkel in einer komfortablen Position zu halten. In einer Studie von Franz (2008) wurde die Muskelspannung des Musculus erector spinae („Aufrichter der Wirbelsäule“) mit einem EMG in unterschiedlichen Sitzpositionen gemessen. Dabei war die Muskelanspannung in von der „idealen“ Sitzposition abweichenden Körperhaltungen signifikant höher. In einer gut unterstützten Sitzhaltung mit einer „optimalen“ Lastverteilung – so wie in Kapitel 3.3 beschrieben – ist die Muskelaktivität gering, so dass auf die Bandscheiben eine geringere Last wirkt.

### **3.2 Literaturüberblick zur In-vivo-Bandscheibendruckmessung**

Lange galten die intradiskalen Druckmessungen von Nachemson und seinen Mitarbeitern aus den 60er und 70er Jahren als hochgradig zuverlässig. Ihre Messmethode bestand darin, bei freiwilligen Probanden eine Kanüle mit einem integrierten Messsensor in den Gallertkern (Nukleus pulposus) der Bandscheibe L3-L4 oder L4-L5 einzustechen und auf diese Weise den lokalen Druck bei verschiedenen Körperhaltungen zu bestimmen. Die Untersuchungen ergaben, dass der Druck im Sitzen um ca. 40% höher ist als im Stehen.

Da es sich bei der intradiskalen Druckmessung um eine invasive Methode handelt, war eine Wiederholung dieser Versuche schwer möglich, da diese nur in Ausnahmefällen mit Freiwilligen durchgeführt werden können. Die Interpretation dieser Messergebnisse hat deshalb die zum Teil bis heute gültige Lehrmeinung über die Belastung der Bandscheibe stark geprägt. Besonders abgeraten wird seither vom längeren Sitzen in konstanten Positionen. Gleichzeitig wird ein aufrechtes Sitzen propagiert, am besten mit Unterstützung der Lendenlordose, um ein lordosiertes Stehen zu simulieren. Diese Empfehlungen wie auch die Ansicht, dass ein asymmetrischer Bandscheibendruck zu deren Verschiebung und zu einem Druck auf den Nervenstrang führe, was Ursache für Rückenschmerzen sei, sind heute überholt. Wilke (2004) gibt zu bedenken, dass die Bandscheibe von Natur aus ausgelegt wurde, um belastet und bewegt zu werden. Höherer Druck in der Bandscheibe braucht deshalb nicht schädlich zu sein. Bubb (2004) gibt daher an, dass das bisherige, sich auf physiologische Untersuchungen stützende ergonomische Credo einer gleichmäßig belasteten Bandscheibe infrage zu stellen ist. Möglicherweise ist die Ursache für Rückenschmerzen ohnedies eher in verspannter Muskulatur zu suchen, der am besten durch Bewegung vorzubeugen ist.

Eine weitere neuere intradiskale Druckmessung aus Japan (Sato et al., 1999) zeigt wie bei Nachemson einen erhöhten Bandscheibendruck beim Sitzen im Vergleich zum Stehen. Allerdings verwendete diese Gruppe ebenfalls eine steife Sonde. Zudem saßen die Probanden bei der Versuchsdurchführung alle in einer aufrechten Sitzposition, die nur mit einem gewissen Muskelaufwand eingenommen werden konnte.

Eine entscheidende Untersuchung in neuester Zeit wurde von Wilke (2004) durchgeführt. Ziel war es, den Druck in der Bandscheibe bei verschiedensten Arbeitstätigkeiten und Sitzpositionen des Menschen festzustellen. Dabei wurde dem Probanden (einem 45-jährigen Orthopäden) ein flexibler Druckaufnehmer mit einem konstanten Durchmesser von 1,5 mm operativ unter sterilen Bedingungen direkt in den Nukleus Pulposus (Gallertkern) seiner Bandscheibe L4-L5 platziert. Damit sich der Proband uneingeschränkt bewegen konnte, wurden die Signale drahtlos an einen Computer übertragen und dort registriert. Insgesamt zeichnete man über einen Zeitraum von 24 Stunden Druckergebnisse unter anderem von unterschiedlichen Sitz- und Liegepositionen, vom Gehen, Treppensteigen, Gewichtheben und vielen anderen Übungen auf. Das auffälligste Ergebnis dieser Untersuchungsreihe ist, dass beim Sitzen in lordosierter Haltung der Druck in der Bandscheibe höher ist als beim angelehnten Sitzen in kyphosierter Haltung. Im Sitzen kann der Druck in der seit Nachemson verpönten lässigen Sitzhaltung (d.h. auch mit Rundrücken) sogar auf die Hälfte reduziert werden.<sup>3</sup>

Eine Gegenüberstellung der Druckwerte von Nachemson und Wilke, normiert auf 100% im Stehen, ist in Abbildung 17 ersichtlich.

---

<sup>3</sup> Diese Ergebnisse liefern eine Erklärung, warum viele Menschen diese Sitzhaltung bevorzugt einnehmen. Die lässige Sitzhaltung nutzt eine Eigenstabilität der Wirbelsäule, die folglich keine Muskelanstrengung erforderlich macht. Das rückenschulmäßige Sitzen ist allerdings nach wie vor nicht pauschal abzulehnen; denn es stärkt und trainiert die Rückenmuskulatur, obwohl der Druck in der Bandscheibe aufgrund der Muskelaktivität ansteigt.

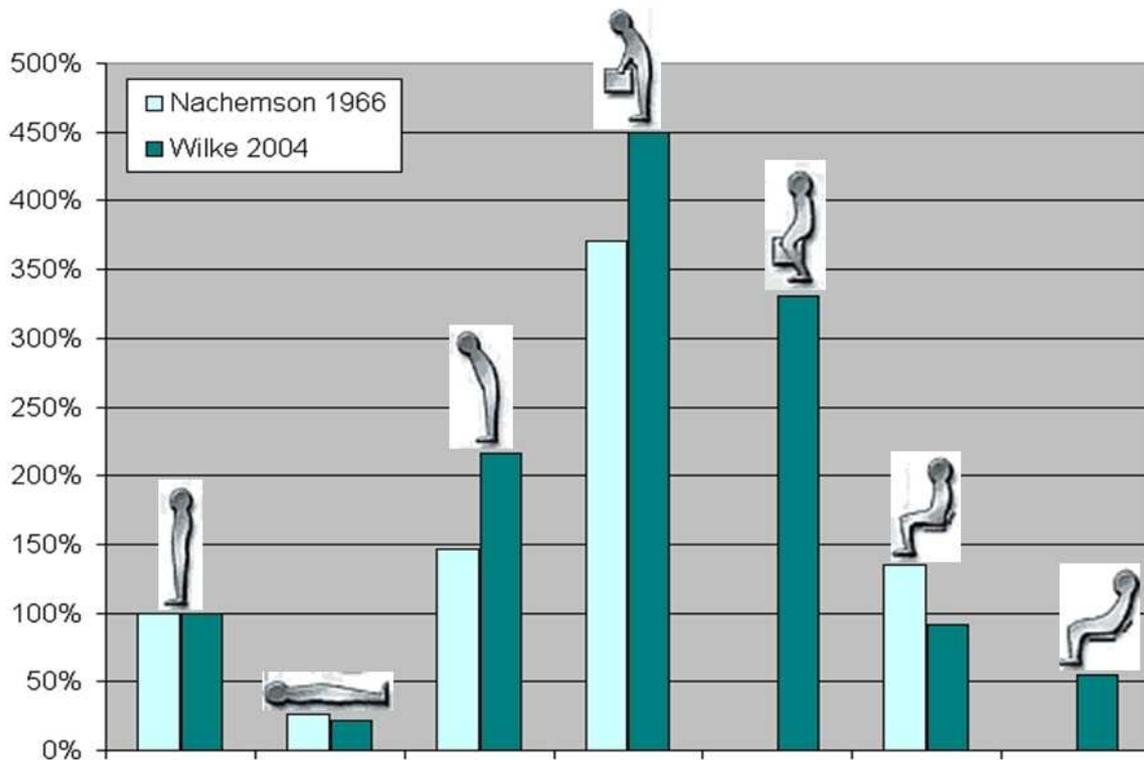


Abbildung 17: Vergleich der Messwerte, normiert auf 100% im Stehen (Nachemson/Wilke)

In vielen Fällen lässt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen von Nachemson und Wilke feststellen, wie z.B. beim Druckvergleich zwischen der Rückenlage und dem Stehen. Bezogen auf den Druck beim Stehen erreichte Wilke beim Liegen 20%, Nachemson dagegen 24%. Ein deutlicher Druckanstieg lässt sich beim Nachvornebeugen erkennen. Beim „falschen“ Hochheben, also beim Heben einer Last (ca. 20 kg) aus dem Rundrücken mit gestreckten Beinen, wurde bei Wilke eine Drucksteigerung von 450% registriert. Wird die Last mit gestrecktem Rücken aus den Beinen gehoben, kann der Druck deutlich auf 340% reduziert werden.

Signifikante Druckunterschiede zeigen sich aber zwischen Stehen und Sitzen. Nachemson wies 1966 darauf hin, dass beim (aufrechten) Sitzen ein Druckanstieg von 40% entstehe, während Wilke 2004 eine Druckreduzierung von mindestens 10% feststellte. Noch deutlicher manifestiert sich dieser Effekt bei der bisher verpönten Rundrücken-Sitzhaltung, da hier der Druck sogar auf die Hälfte reduziert werden kann.<sup>4</sup>

<sup>4</sup> An dieser Stelle muss darauf hingewiesen werden, dass nicht allein von den Druckwerten in der Bandscheibe auf die Schädlichkeit einer Körperhaltung geschlossen werden darf. Bei dieser lässigen Sitzposition kommt es zwar zu einer Druckentlastung in der Bandscheibe, es können aber Scherkräfte auf die Gelenkfacetten einwirken, wenn keine gleichmäßige Abstützung gewährleistet ist.

Die Unterschiede der Ergebnisse zwischen Nachemson und Wilke lassen sich auf die Messtechnik zurückführen. Nachemson integrierte seinen Messaufnehmer in eine steife Kanüle, die z.B. aufgrund der Muskelanspannung oder -verschiebung verbogen werden kann, was evtl. zu Falschsignalen und somit zu verfälschten Druckwerten geführt haben könnte. Die implantierte Sonde von Wilke hingegen konnte nicht verbogen werden, da sie über die gesamte Länge flexibel war. Nur die 7mm-Metallspitze des Sensors selbst war steif, sie befand sich aber nach der Implantation komplett im Nukleus pulposus und erfuhr somit in diesem Bereich einen hydrostatischen, d.h. gleichmäßigen Druck (Wilke, 2004).

### **3.3 Zielsetzung**

Die in dieser Arbeit durchgeführte Testreihe ähnelt von den Rahmenbedingungen den Untersuchungen von Wilke (2004). In einer über acht Stunden andauernden Versuchsreihe wurden Bandscheiben-Druckwerte in Alltagstätigkeiten wie dem Gehen, Treppensteigen, Liegen, Sitzen und Stehen aufgezeichnet. Des Weiteren wurden auch die Druckwerte bei der Nutzung unterschiedlicher physiotherapeutischer Produkte und Sportgeräte analysiert. Der Schwerpunkt der Untersuchung lag darauf, erstmalig am Menschen den Druck in der Bandscheibe in unterschiedlichen Sitzhaltungen im Fahrzeug festzustellen, um herauszufinden, bei welcher Autositzeinstellung der geringste Bandscheibendruck vorliegt.

Ausgehend von umfangreichen Probandenstudien (Mergl, 2006) nahm man bislang an, dass es eine Druckverteilung gibt, die intersubjektiv als ideal gelten und durch die ein bestmögliches Komfortempfinden erzeugt werden kann. Allerdings lag bislang außer den Interviews kein Nachweis für diese Erkenntnis vor. Ein medizinischer Messwert zur Validierung des Modells fehlte. Mit Hilfe der Bandscheibendruckmessung sollte ein entscheidender Schritt in Richtung Objektivierung des Sitzkomforts gemacht werden.

### **3.4 Versuchskonzept**

#### **3.4.1 Methode**

Durch einen minimalinvasiven Eingriff an der Alpha Klinik München (Dr. Hoogland) konnte mittels Endoskoptechnik eine Bandscheibendruckuntersuchung am lebenden Menschen durchgeführt werden. Es wurden dabei zwei Drucksensoren in die Bandscheiben des unteren Rückens implantiert. Untersuchungen dieser Art sind nur unter Zustimmung und Beisein der Ethikkommission<sup>5</sup> mit Sitz in Berlin möglich.

#### **3.4.2 Versuchsperson**

Die invasive medizinische Untersuchung geschah auf eigene Anregung der Versuchsperson (42-jähriger professioneller Golfspieler), die sich vollkommen freiwillig für diesen Selbstversuch zur Verfügung stellte. Der Proband war 179 cm groß und hatte ein Gewicht von 83 kg, was in etwa dem 50. Perzentil Mann entspricht.

#### **3.4.3 Versuchsequipment**

Für die Aufzeichnung der Versuchsdaten kamen gleichzeitig zwei Messsysteme zum Einsatz, Bandscheibendrucksensoren und Druckmessmatten. Zur Einstellung der unterschiedlichen Sitzeinstellungen diente ein Versuchsfahrzeug, welches mit einem Multifunktionssitz ausgestattet war. Dieses wurde während der gesamten Studie nicht bewegt, da die Untersuchung im rein statischen Zustand stattfand.

##### **3.4.3.1 Drucksensoren**

Das entscheidende Messmittel dieser Untersuchung stellten die beiden Drucksensoren vom Typ K4121-00-1629-D (Abbildung 18) dar, die vom Mammendorfer Institut für Physik und Medizin stammen. Sie haben eine Länge von etwa 640 mm und einen Durchmesser von 1,45 mm; die Messfläche beträgt 2 mm<sup>2</sup>. Sie ähneln in Form und Größe also einem Streichholz. Am Ende des Sensors sitzt eine sog. Sterilvorrichtung, eine Verschlussbuchse, die ein Infektionsrisiko zusätzlich reduzieren soll. Die Messempfindlichkeit des Sensors beträgt 0,15 mV/VmmHg, die Genauigkeit des gesamten Messsystems (Sensor, Signalverstärker, Messrechner) liegt bei +/-0,1 bar und der Arbeitsbereich

---

<sup>5</sup> Mitglieder sind Mediziner und Naturwissenschaftler, sowie Juristen und Theologen. Übergreifendes Ziel ist die Beurteilung von Forschungsvorhaben, die an Lebewesen durchgeführt werden, aus ethischer, rechtlicher und sozialer Sicht sowie der Schutz des Individuums vor den Folgen der klinischen Forschung am Lebewesen. Die Mitglieder der Ethikkommission erstellen ein schriftliches Votum für oder gegen das beantragte Forschungsvorhaben.

zwischen 0 und 50 bar. Ein Messrechner zeichnete diese Druckdaten auf und konnte diese mit der Software ‚ARGUS junior‘ visualisieren.

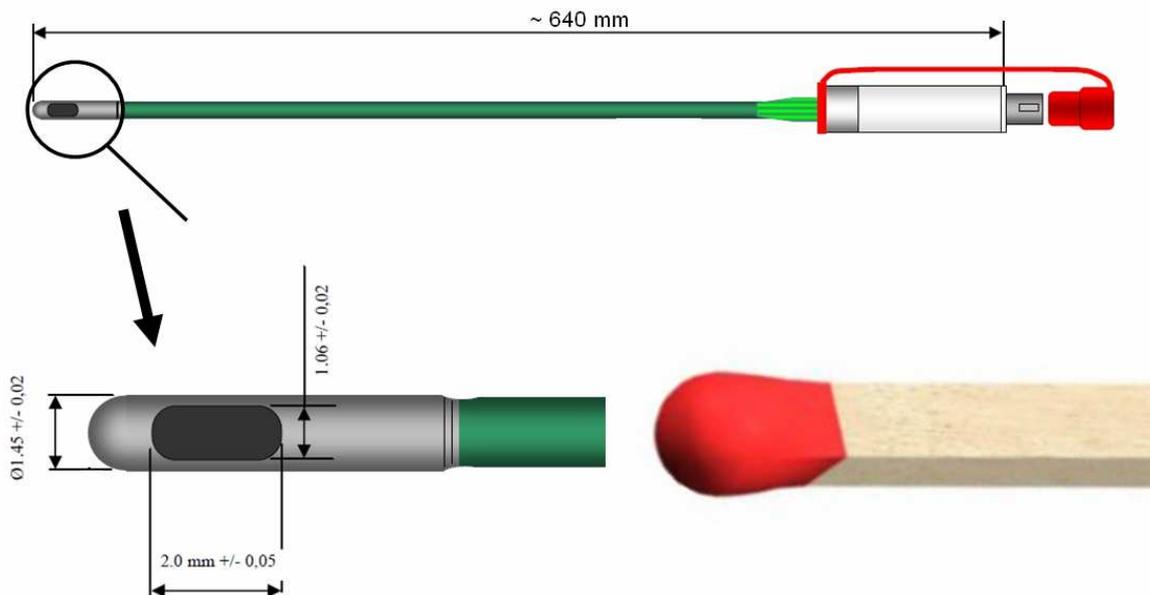


Abbildung 18: Implantierter Sensortyp K4121-00-1629-D

### 3.4.3.2 Druckmessmatten

Der Druck, der vom Sitz auf den Menschen einwirkt, kann mit Druckmessmatten aufgenommen werden. Nach Kruse (2001) sollen Druckmessmatten insbesondere eine geringe Dicke aufweisen, sich der Oberfläche gut anpassen und den infrage kommenden Druckbereich beim Sitzen (ca. 0-30 kPa) vollständig erfassen. Für Komfortuntersuchungen ist dabei wichtig, dass die Anwesenheit der Matten selbst keinen negativen Einfluss auf das subjektive Empfinden des Menschen hat. Eine Untersuchung von Hartung und Mergl (2006) zeigte, dass sich bei der Komfortbeurteilung eines Sitzes mit und ohne Druckmesssystem ein Unterschied von 3% ergab. Dieser Wert ist vernachlässigbar klein, so dass eine Sitzkomfortbewertung mit aufliegender Druckmessmatte zulässig bleibt.

Zum Zeitpunkt der Untersuchung befinden sich vier geeignete Druckverteilungsmesssysteme am Markt. Entsprechend ihren Arbeitsprinzipien lassen sie sich in kapazitive<sup>6</sup> (Novel, XSensor) und resistive<sup>7</sup> Messsysteme (FSA, Tekscan)

---

<sup>6</sup> Diese Systeme basieren darauf, dass die Kapazität eines Plattenkondensators sich umgekehrt proportional zum Abstand der Platten verhält. Vertreter dieser Gattung sind die Druckmessmatten der Firmen Novel und Xsensor.

einteilen. Die Messmatten bestehen in der Regel aus in einer Matrix angeordneten Druckaufnehmern, die über einen Multiplexer an einen Auswerterechner angeschlossen sind. Alle Produkte verfügen mindestens über einen Messbereich von bis zu 200 mmHg und eine Mindestauflösung von 2 mmHg. Zudem ermöglichen sie den Export der Messdaten in eine ASCII-Datei. Eine Auflistung der Linearitäten der Messsysteme untereinander befindet sich im Anhang 1.

Für diese Untersuchung wurden Tekscan Druckmessmatten (vgl. Abbildung 19) herangezogen, welche aus dünnen, flexiblen Folien mit mechanisch entkoppelten Messzellen bestehen (CONFORMat: 1024 Messzellen). Für den Einsatz im Sitzbereich stehen 57 cm x 54 cm (Messfläche: 47 cm x 47 cm) große Matten zur Verfügung.



Abbildung 19: ConforMat (links: Messmatten auf Fahrzeugsitz; rechts: Innenansicht)

---

<sup>7</sup> Resistive Systeme (Fa. FSA, Tekscan) nutzen den Umstand, dass sich der Widerstand bestimmter Substanzen mit der auf sie wirkenden Kraft ändert, im Regelfall verringert. Ein bekannter Vertreter sind die sog. druckempfindlichen Farben (pressure sensitive inks).

Der Foliensensor<sup>8</sup> besteht aus zwei sehr dünnen, flexiblen Polyesterfolien, auf die Leiterbahnen gedruckt werden. Auf einer der beiden Innenseiten des Sensors werden die „Spalten“, auf der anderen Seite die „Reihen“ gedruckt. Bevor beide Folien aufeinander gelegt werden, wird die Innenseite der Sensorfolien mit einer halbleitenden Tinte benetzt. Wenn nun die beiden Folien aufeinander gelegt werden, entsteht an jedem Kreuzungspunkt der Matrix eine Sensor-Zelle. Die kraftsensitiven Messzellen liefern einen variablen Widerstand, der im unbelasteten Zustand am größten ist und bei zunehmender Belastung abnimmt. Die Druckmessmatte wurde vor der Versuchsdurchführung kalibriert.

Wie in Abbildung 20 dargestellt, kann eine Visualisierung der Kontaktkräfte zwischen Mensch und Sitz vorgenommen werden. Die Verteilung des Körpergewichts auf der Sitz- bzw. Lehnenfläche kann so vermessen und visuell dargestellt werden.

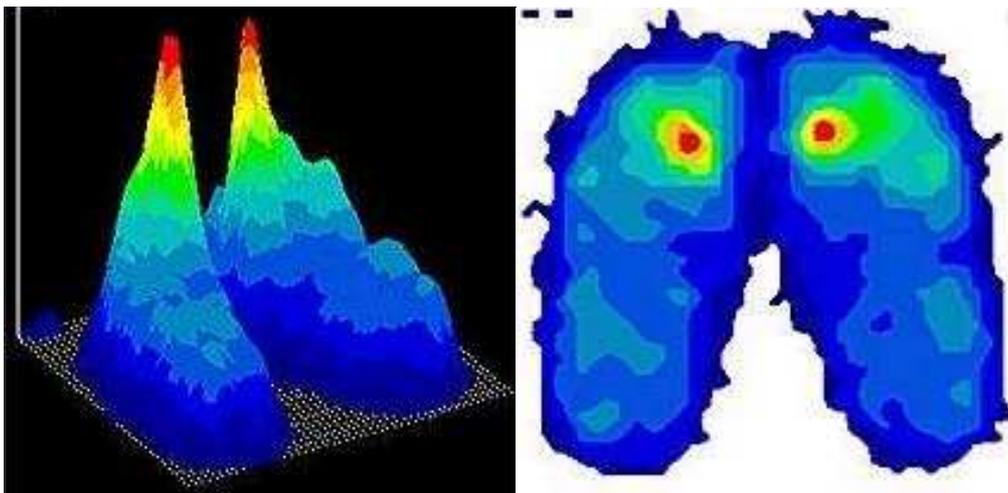


Abbildung 20: Druckspitzen und Druckverteilung auf der Sitzfläche

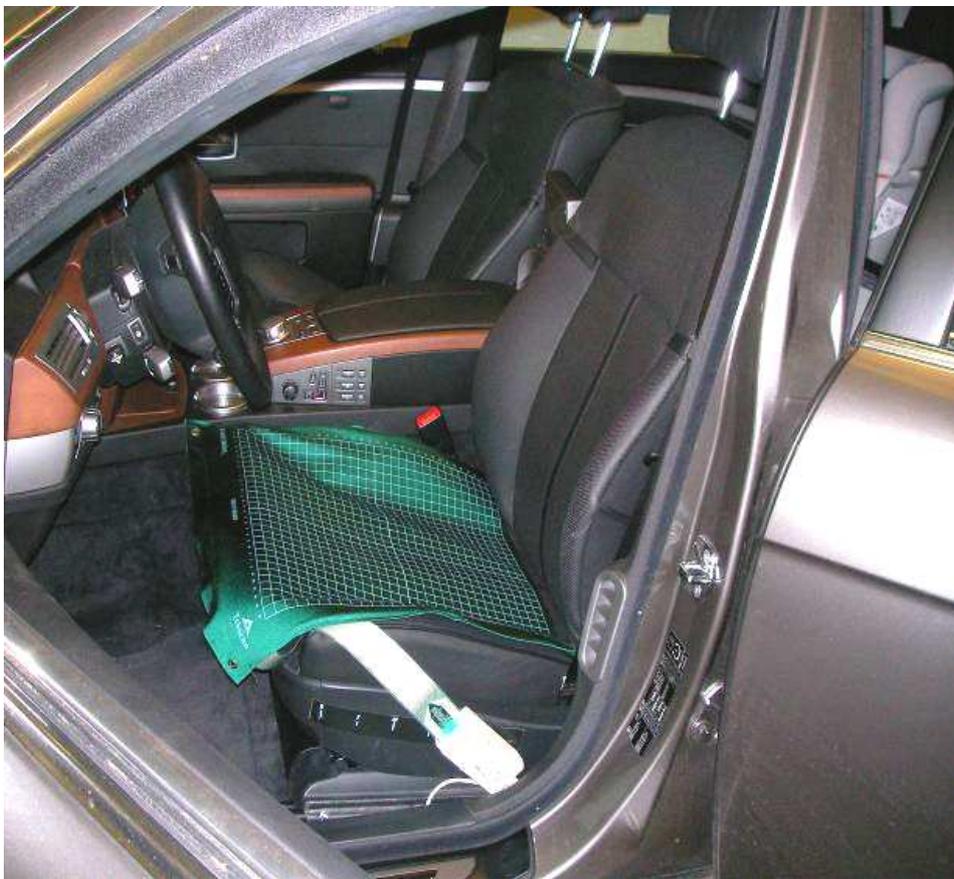
Da für den Betrieb der Druckmessmatten eine minimale Bestromung der Messzellen notwendig ist, können Wechselwirkungen zwischen der Bandscheibendruckmessung und der Kontaktflächenmessung nicht ausgeschlossen werden. Eine Beeinflussung beider Systeme musste unbedingt vermieden werden. Die Druckmessmatte wurde daher nur auf der Sitzfläche und nicht an der Rückenlehne aufgelegt. So konnte jegliche Störung der beiden angewandten Messsysteme untereinander ausgeschlossen werden, weil kein direkter Kontakt zwischen der Druckmessmatte und dem Messkabel des Bandscheibendrucks, das direkt aus dem Rücken des Probanden kam, bestand.

---

<sup>8</sup> Diese Sensortechnologie wurde erstmals auf Anfrage von Zahnärzten entwickelt, die nach einer quantitativen Bestimmung der Kräfte beim Gebisschluss suchten.

### **3.4.3.3 Versuchsfahrzeug**

Das Versuchsfahrzeug war ein 7er-BMW (E65), mit Multifunktions-Ledersitzen ausgestattet (vgl. Abbildung 21). Mit dieser Ausstattungsvariante war es möglich, den Sitz in 16 Freiheitsgraden zu verfahren, so dass sich eine ideale Sitzposition einstellen ließ. Zuvor wurde die ideale Sitzeinstellung für diese Versuchsperson (50. Perzentil Mann) mittels Druckmessmatten ausfindig gemacht und mit der vorhandenen Memory-Funktion gespeichert (genau definierte Sitzposition). Dabei waren insbesondere die Sitzflächenneigung und die Lehnenneigung von großer Bedeutung.



*Abbildung 21: Versuchsfahrzeug mit Druckmessmatte auf der Sitzfläche des Multifunktionssitzes*

### 3.5 Operative Vorbereitung des Versuchs

#### 3.5.1 Implantierung der Messsonden

Die Implantation wurde mittels Endoskop ausgeführt. Zwei flexible Druckaufnehmer mit einem konstanten Durchmesser von 1,45 mm wurden mittels der Endoskoptechnik operativ unter sterilen Bedingungen (vgl. Abbildung 22) direkt in den Nucleus pulposus (Gallertkern) der Bandscheiben implantiert, um Druckverhältnisse bei unterschiedlichen Bewegungen und Körperpositionen messen zu können.



Abbildung 22: Implantierung der Messsonden mittels Endoskoptechnik

Beide Sensoren hatte man mit zwei flexiblen Kabeln, die direkt aus dem unteren Rücken des Probanden herauskamen, noch auf dem Operationstisch mit dem Messlaptop für einen ersten Funktionstest verbunden. Um ein Verrutschen und Herausrutschen der Sensoren aus der Messposition während des gesamten Versuchs zu vermeiden, wurden die Messkabel mit einem Stich an der Hautoberfläche unter lokaler Betäubung vernäht (Abbildung 23).



*Abbildung 23: Austritt der Messsonden aus dem Rücken (an der Oberhaut vernäht)*

Nach Auskunft des durchführenden Arztes besteht bei diesem minimalinvasiven Eingriff kaum Gefahr, den Rückenmarks-Nerv zu verletzen; problematisch ist allenfalls die Infektionsgefahr im Bereich der Eingriffstelle. Am Ende des Messensors befand sich daher eine Sterilvorrichtung (verschließbare Steckbuchse), die sich aus Hygienegründen an den Sensor angliederte. Dieser Standardstecker ließ sich direkt an einen Messrechner anschließen, der die Druckdaten aufzeichnete und visualisierte.

### 3.5.2 Platzierung der Messsonden

Bandscheiben bestehen aus zwei Teilen (vgl. Abbildung 24); einem äußeren Faserring (Anulus fibrosus) und einem inneren Gallertkern (Nucleus pulposus). Der Anulus fibrosus enthält konzentrische Schichten von kollagenen Bindegewebsfasern, die nach innen allmählich in Faserknorpel übergehen. Die Bindegewebsfasern heften sich an die Wirbelkörper an. Der Nucleus pulposus ist ein zellarmes gallertartiges Gewebe mit einem hohen Wassergehalt.

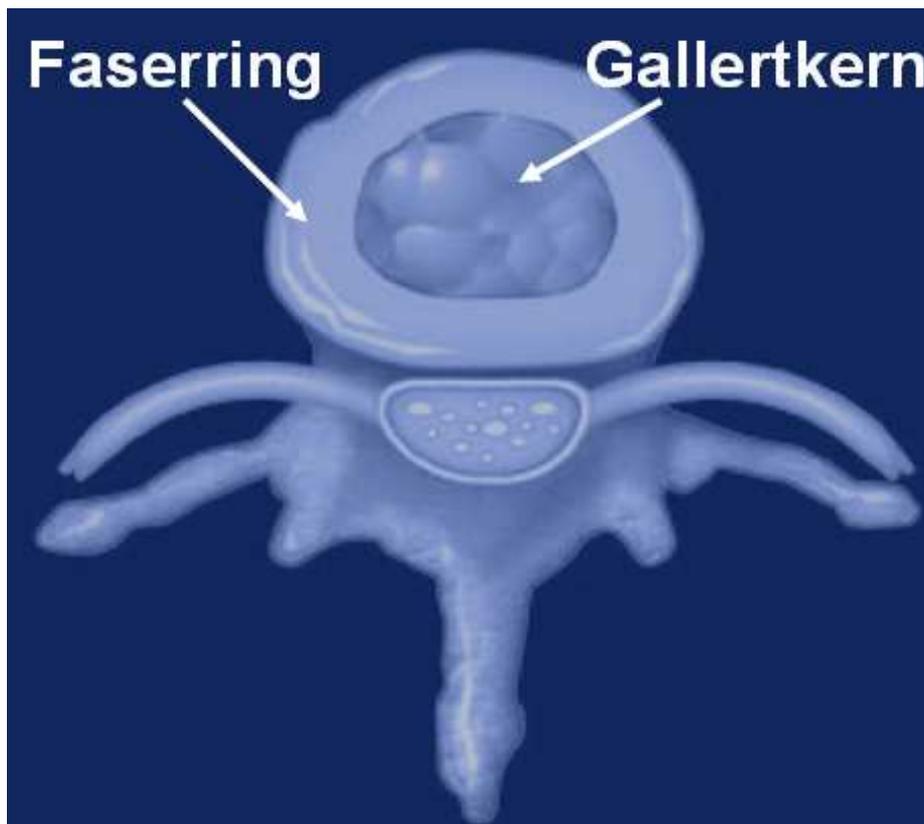
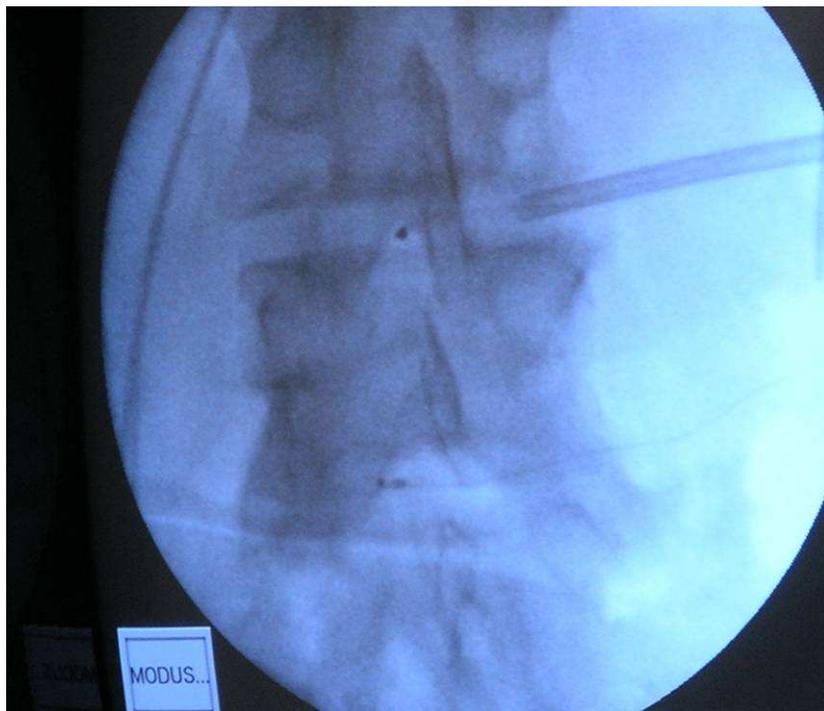


Abbildung 24: Transversalansicht des Wirbelkörpers – Bandscheiben bestehen aus zwei Teilen: äußerer Anulus fibrosus (Faserring); innerer Nucleus pulposus (Gallertkern)

Die Sensoren mit ihrer Metallspitze wurden bei der Implantation komplett im Nucleus Pulposus der Bandscheibe eingebracht und erfuhren somit in diesem Bereich einen hydrostatischen Druck.



Abbildung 26 zeigt eine originale Röntgenaufnahme, die während der Operation gemacht wurde. Unter dem unteren Wirbelkörper (L5) ist bereits ein Drucksensor implantiert. Ein dünner Schatten verläuft zum linken Bildrand hin, was die Verkabelung des Sensors zeigt. Deutlicher feststellen lässt sich die Kanüle darüber, die bei der Endoskoptechnik eingesetzt wird, um den Sensor zu platzieren. Die schwarzen Punkte sind die 7 mm langen metallischen Enden der Drucksonden.



*Abbildung 26: Röntgenaufnahme (dorsal) des Lendenwirbelsäulenbereichs mit eingebrachten Sensoren*

### **3.6 Versuchsdurchführung**

Schon auf dem Behandlungstisch konnten erste Untersuchungen und Funktionstests des Sensorsystems durchgeführt werden. Insgesamt wurden über einen Zeitraum von ca. acht Stunden unter anderem folgende Tätigkeiten aufgezeichnet: verschiedene Liegepositionen, verschiedene Sitzpositionen auf einem normalen Stuhl, Therapieübungen auf unterschiedlichen Sportgeräten, Abschlag beim Golfspielen, Tätigkeiten in und um das Automobil, Sitzpositionen im Fahrzeug, Gehen, Joggen, Treppensteigen (mit und ohne Last), Gewichtheben und viele andere Übungen und Aktivitäten aus dem Alltagsleben. Durch die hohe Anzahl an Versuchen konnte dadurch später ein Abgleich zu vorherigen Messungen von Wilke und Nachemson vollzogen werden.

Die für das Komfortempfinden im Automobil relevanten Versuche sollen im Folgenden nachgezeichnet werden.

Nachdem der Proband im Fahrzeug Platz genommen hatte, wurde ihm in einem ersten Schritt die Möglichkeit gegeben, sich den Sitz nach eigenen Vorlieben und Wünschen zu verfahren. Er hatte dabei Schwierigkeiten, sich mit dem Sitzeinstellungsschalter (Abbildung 27) den Sitz richtig einzustellen, was aus der Eigenverständlichkeit des Schalters resultierte: Man muss auf dem Schalter zuerst auf dem schematisch dargestellten Sitz das gewünschte Sitzteil auswählen und dann durch Drehen oder Schieben des runden Verstellungschalters die Position anfahren.



Abbildung 27: Sitzverstellungsschalter 7er-BMW (E65)

In einem zweiten Schritt wurden drei unterschiedliche Einstellungen für die Sitzfläche vorgegeben, wie in Abbildung 28 dargestellt. Die Lehneinstellung und -neigung blieb dabei in allen drei Einstellungen in einer idealen, unveränderten Position.

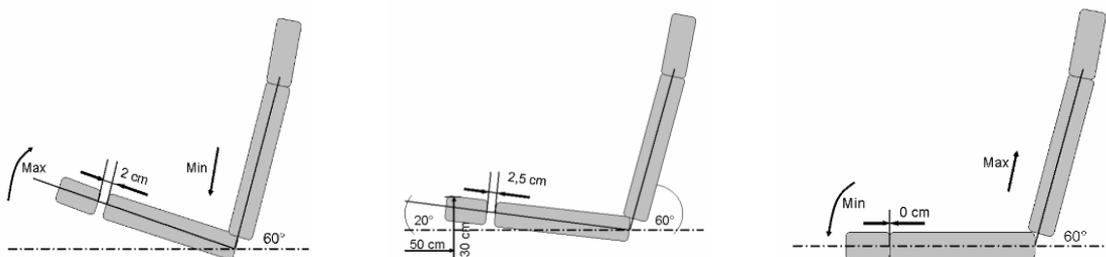


Abbildung 28: Einstellung der Sitzflächeneinstellungen

Es werden drei Einstellungen für die Sitzfläche ausgewählt, die jeweils für drei Minuten eingenommen wurden (vgl. Abbildung 28):

- Eine Einstellung mit zu viel Unterstützung der vorderen Oberschenkel. Sie sollte durch hohen Druck in den vorderen Oberschenkeln dort Diskomfort hervorrufen. Sie wird im Folgenden mit „max“ bezeichnet.
- Eine „ideale“ Einstellung, welche minimalen Diskomfort hervorrufen sollte. Sie wird im Folgenden „ideal“ genannt. Sie sollte sehr nah an den Ergebnissen der idealen Druckverteilung liegen.
- Eine Einstellung mit fehlender Unterstützung der vorderen Oberschenkel. Diese Einstellung sollte aufgrund der hohen Lasten im Gesäß Diskomfort verursachen. Im Folgenden wird diese Einstellung mit „min“ abgekürzt.

Um die Gesamtform der Druckverteilung zu kontrollieren, wurde der Parameter prozentuale Last gewählt. Dabei wurde das Augenmerk auf die Lastverteilung im Gesäß- und vorderen Oberschenkelbereich gelegt. Deutlich lässt sich erkennen, dass die Last auf den vorderen Oberschenkeln von links nach rechts abnimmt, gemäß den Einstellungen „max“, „ideal“ und „min“.

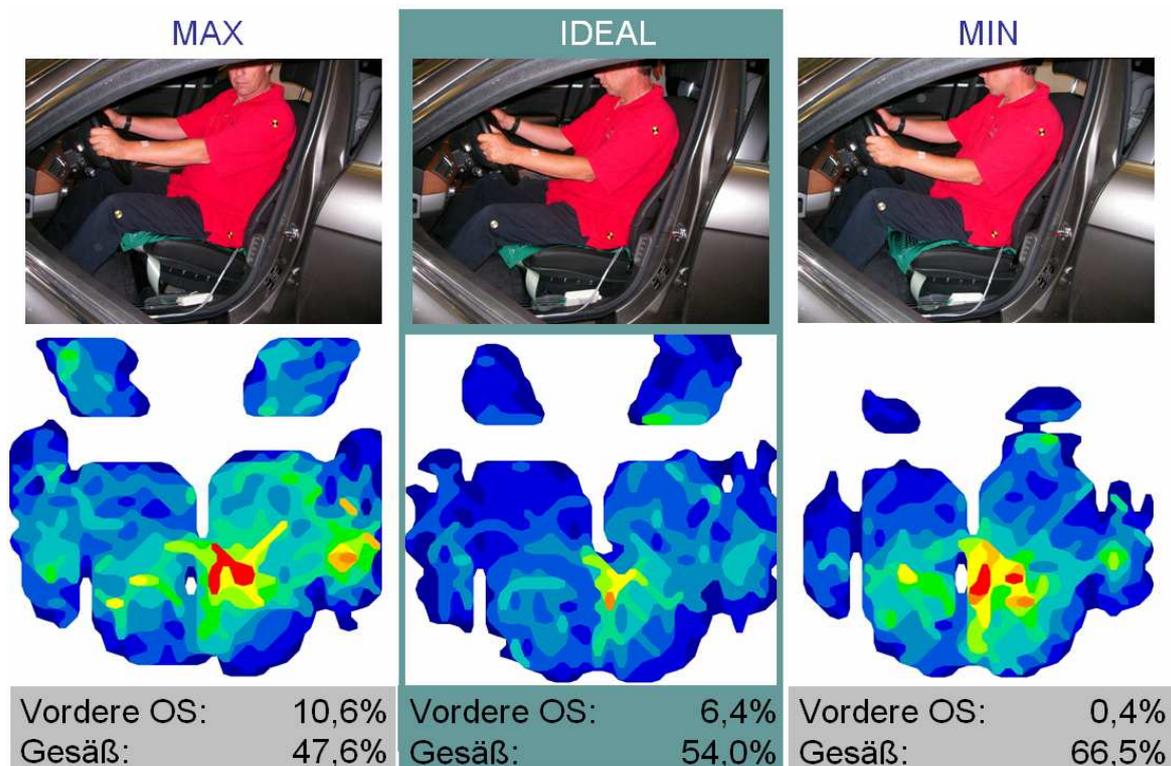


Abbildung 29: Ergebnisse der prozentualen Lastverteilung für unterschiedliche Sitzflächeneinstellungen

Mittels der Druckmessmatten lassen sich Druckverteilungsbilder erstellen, wie in Abbildung 29 zu sehen. Der Sitz wurde gezielt nach den Einstellungen, die in Abbildung 28 gezeigt sind, positioniert, um die unterschiedlichen Druckverteilungen in der Sitzfläche zu erreichen. Zur erneuten Überprüfung soll die Auswertung der Druckaufnahmen vorgenommen werden. Bei der „ideal“-Einstellung zeigt sich eine Lastverteilung von 6,4% auf den vorderen Oberschenkeln und von 54,0% auf dem Gesäß. Bei der Sitzeinstellung „max“ wurde eine maximale Unterstützung der vorderen Oberschenkel von 10,6% erreicht. Gleichzeitig reduzierte sich der Druck auf dem Gesäß auf 47,6% der Last auf der Sitzfläche. In der letzten Sitzeinstellung „min“ wurde die Auflage der vorderen Oberschenkel auf ein Minimum reduziert und hatte hier einen Wert von gerade noch 0,4%; im gleichen Schritt stieg der Druck auf dem Gesäß auf 66,5% an.

### 3.7 Ergebnisse

Eine Mittelung der Ergebnisse über einen Messzeitraum von drei Minuten je Sitzposition ergab folgende Ergebnisse (Abbildung 30): Bei „idealer“ Sitzeinstellung war der Bandscheibendruck (im Nucleus pulposus) signifikant am geringsten und erzielte einen Mittelwert von 0,5 bar. Bei einer maximalen Unterstützung des vorderen Oberschenkelbereichs durch maximale Sitzflächenneigung und Ausfahren der Sitztiefenverstellung (Sitzeinstellung „max“) wurde der Druck auf fast das Doppelte (0,95 bar) erhöht. Der deutlichste Druckanstieg (Mittelwert: 1,5 bar) in der Bandscheibe wurde durch eine minimale vordere Oberschenkelunterstützung erreicht. Dieser Wert war dreimal so hoch wie bei „idealen“ Sitzeinstellung. Dieser deutliche Druckanstieg ist dadurch zu erklären, dass der Proband seine vorderen Oberschenkel eigenständig halten musste. Der Testperson wurde in keiner der Sitzpositionen mitgeteilt, ob sie sich in einer komfortablen oder weniger komfortablen Haltung befindet.

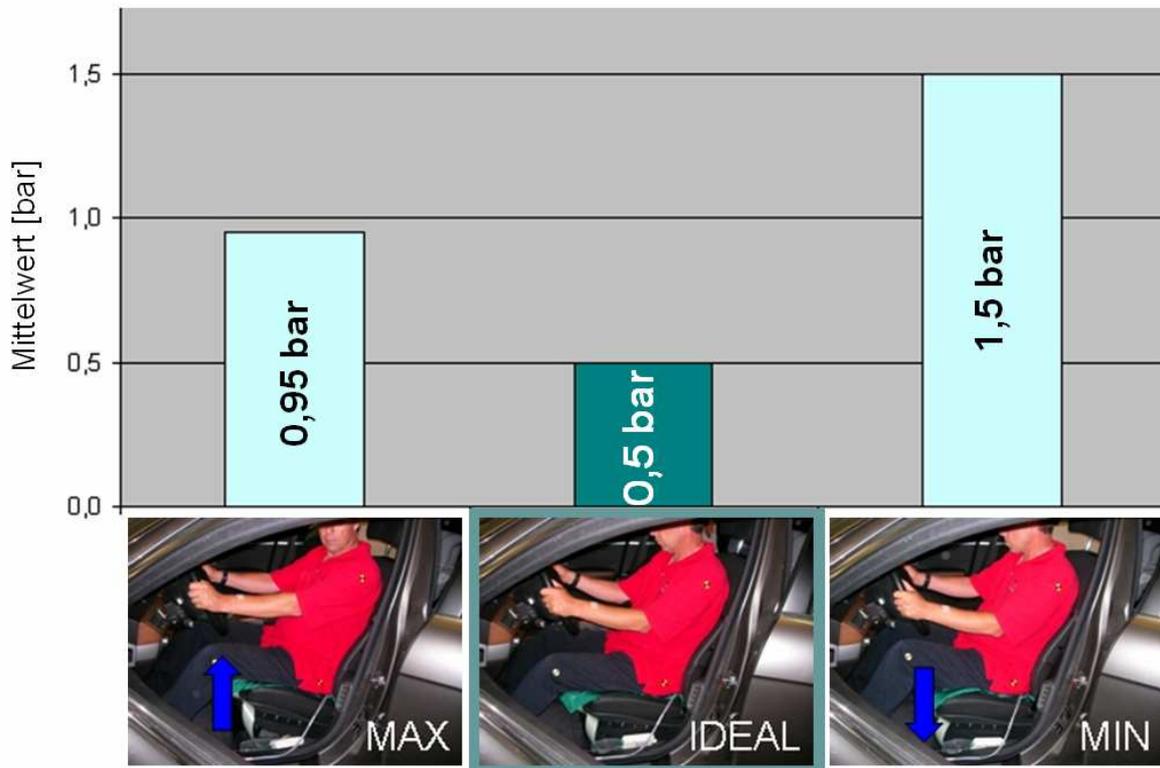


Abbildung 30: Ergebnisse des Drucksensors; Mittelwert (Aufnahmezeit: 3 min.)

Eine Befragung des Probanden in den unterschiedlichen Sitzpositionen ergab, dass er die beiden Sitzeinstellungen „max“ und „min“ als deutlich unkomfortabel einstufte. Eine Unterscheidung, welche der beiden besser oder schlechter sei, konnte er in dieser kurzen Zeit nicht treffen. Eindeutig positiv fiel das Urteil bezüglich der idealen Sitzeinstellung aus; er empfand diese Sitzposition als sehr komfortabel.

Ein weiteres Ergebnis lieferten die Drucksensoren bezüglich der Versuche des Probanden, sich den Sitz selbst einzustellen, welche in Abbildung 31 aufgeführt sind. Dabei ist deutlich erkennbar, dass es bei den ersten vier Eigenversuchen nie gelang, den niedrigsten Druck der idealen Sitzeinstellung nur annäherungsweise zu erreichen. Die Bandscheibendrucke der eigenen Einstellversuche übertrafen großteils sogar die der vorgegebene „max“- und „min“-Einstellung; dies liegt daran, dass bei den vorgegebenen Sitzeinstellungen zwar die Sitzfläche variiert wurde, aber nicht die Lehne, die immer in einer optimalen Position gemäß der idealen Druckverteilung war. Dies ist ein zusätzliches Indiz für die Annahme, dass nicht nur die Werte der Sitzfläche ihre Gültigkeit haben, sondern auch die Werte der Lehnenfläche.

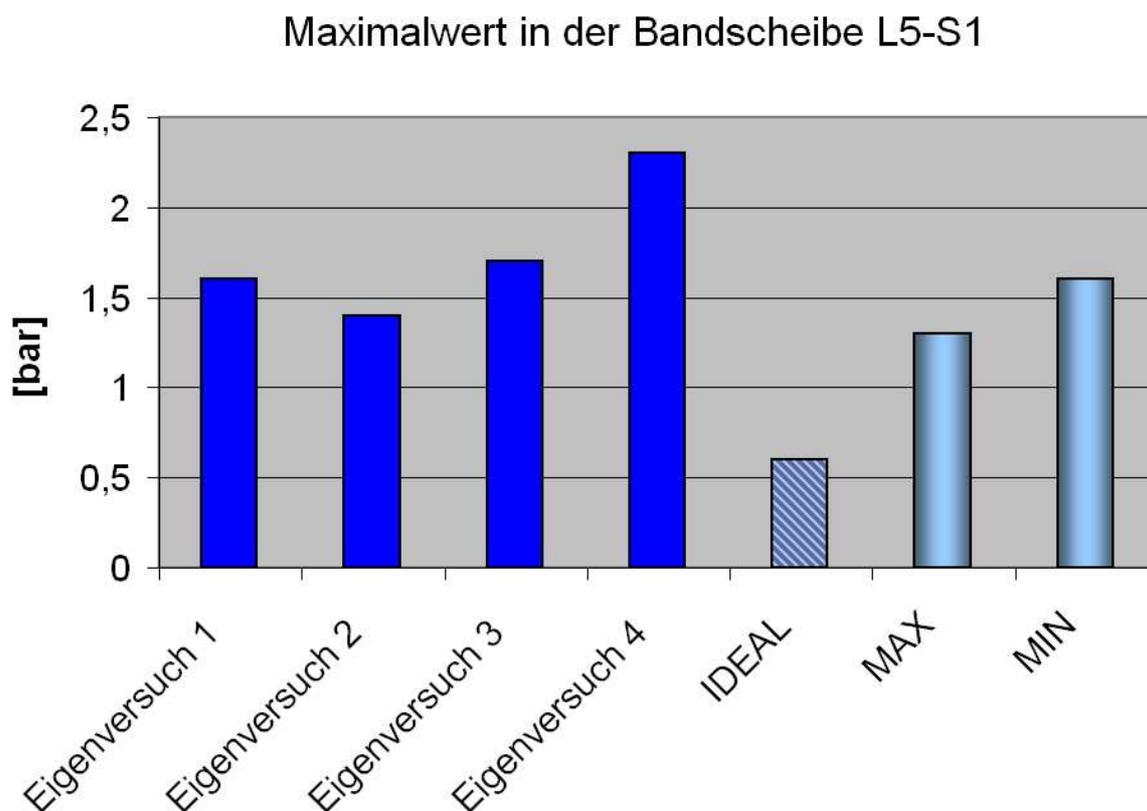


Abbildung 31: Vergleich der Bandscheibendrucke bei eigener Einstellung und bei „ideal“ vorgegebener Einstellung

### 3.8 Diskussion der Ergebnisse

Für eine Ergebnisdiskussion ist es entscheidend, die ermittelten Bandscheibendruckwerte in Beziehung zu den Messwerten anderer Studien zu setzen.

#### 3.8.1 Abgleich zu bisherigen Studien

Obwohl der Eingriff und die Untersuchung nur an einer Person durchgeführt wurden, sind diese Ergebnisse bedeutsam und aussagekräftig; sie stehen in Einklang mit der Studie von Wilke (2004). Beide Studien wurden an der gleichen Klinik durchgeführt. In der Arbeit Wilkes nahm der Proband (45 Jahre, 70 kg, 168 cm) auf einem Bürostuhl und einem Pezziball Platz. Die Bandbreite des Drucks in der Bandscheibe L4-L5 in unterschiedlichen Körperhaltungen variierte während des Sitzens zwischen 1,0 bar bis hin zu 9,0 bar.

Eine Aufstellung der Studienreihen von Hoogland, Wilke und Nachemson zeigt Abbildung 32. Sie sind auf 100% im Stehen normiert. Im Vergleich stellt sich klar heraus, dass der Druck beim Liegen eindeutig am geringsten ist. Die „ideale“

Sitzeinstellung im Fahrzeug schneidet aber deutlich besser ab als das aufrechte Sitzen oder das Stehen; in diesem Druckbereich liegen die schlechteren Einstellungen „min“ und „max“. Eine weitere entscheidende Erkenntnis aus den Versuchen Wilkes und Hooglands zeigt sich bei unterschiedlichen Sitzhaltungen: Eine aufrechte Sitzposition (90° abgewinkelte Beine, 90° Torso zu Oberschenkel) brachte bei Hoogland einen Druck von 1,6 bar, während die – bislang verpönte – „Lümmel“-Haltung, d.h. ein Sitzen mit extremem Rundrücken, einen Wert von nur 0,05 bar in der Bandscheibe erzeugte. Der bei jeder Bewegung stattfindende dynamische Wechsel zwischen Belastung (= Dehydration der Bandscheibe) und Entlastung (= Hydratation) fördert laut Neidlinger-Wilke (2004) die Nährstoffversorgung der Bandscheibenzellen und ist für die Vitalität des Gewebes unerlässlich, da das Bandscheibengewebe nicht durchblutet ist. Bei gleich bleibender konstanter Belastung stellt sich mit der Zeit ein Gleichgewicht ein, währenddessen kein Flüssigkeitsaustausch mehr stattfindet. Für über lange Zeit beibehaltene Positionen, wie sie in sitzender Körperhaltung vorkommen können, ist ein niedriger Bandscheibendruck zu empfehlen.

Vorgebeugtes Sitzen wie vorgebeugtes Stehen führen – so die Ergebnisse von Nachemson (1966) wie auch von Wilke (2004) – zu einer Druckerhöhung in der Bandscheibe. Ebenso sind sich alle einig, dass ein Heben von Lasten aus dem Rundrücken wesentlich bandscheibenunfreundlicher ist als das Heben von Lasten aus den Beinen heraus bei durchgestrecktem Rücken.

## Validierung des Modells mittels Bandscheibendruckmessungen

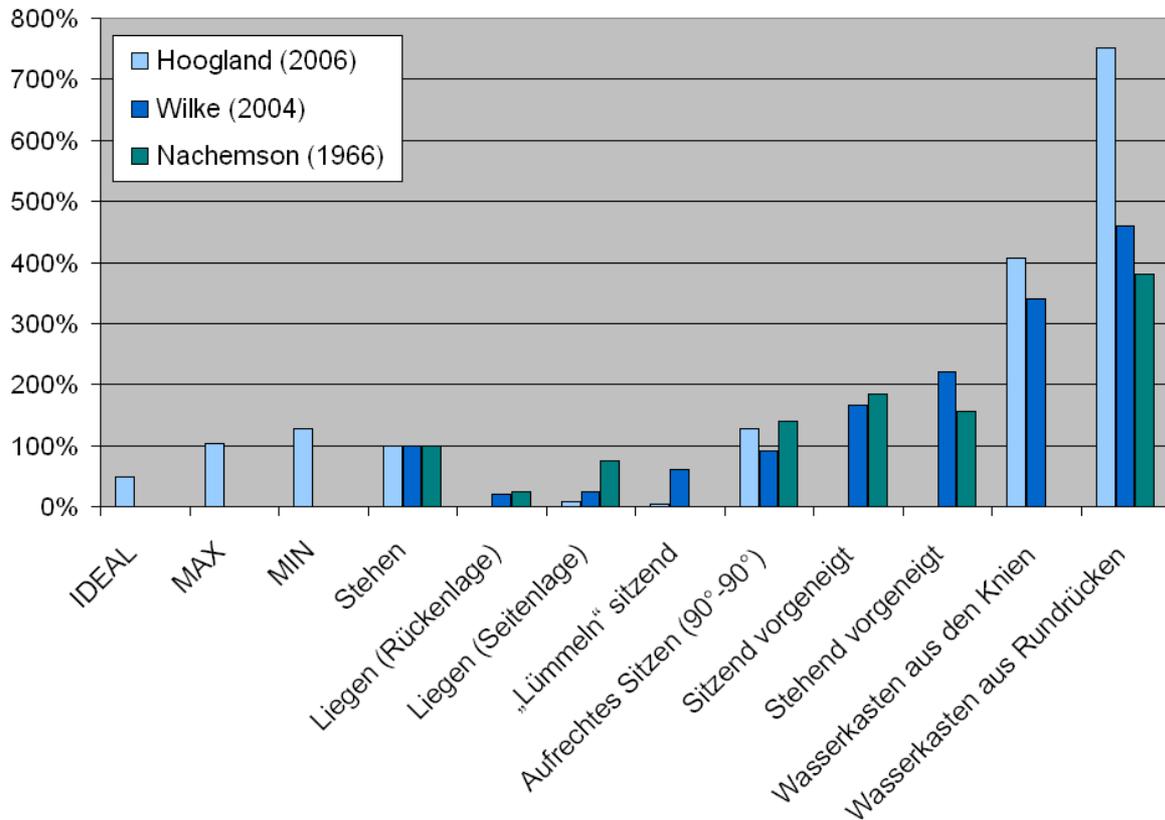


Abbildung 32: Bandscheibendrucke (auf 100% im Stehen normiert) im Vergleich zwischen Hoogland, Wilke und Nachemson

Natürlich ist ein pauschaler Rückschluss von diesen Messdaten (50. Perzentil Mann) auf das 5. Perzentil Frau oder 95. Perzentil Mann nicht zulässig. Allerdings wurde in diesem Experiment erstmalig eine signifikante Verknüpfung zwischen subjektiver und objektiver Wahrnehmung des Sitzkomforts nachgewiesen.

### 3.8.2 Abgleich zu Alltagsaktivitäten

An den ersten Stellen der Abbildung 33 sind die drei vorgegebenen Sitzeinstellungen angeführt. Die mit 0,5 bar geringste Last auf die Bandscheibe beim Sitzen im Fahrzeugsitz wurde in dieser Studie mit der „idealen“ Lastverteilung erzielt.

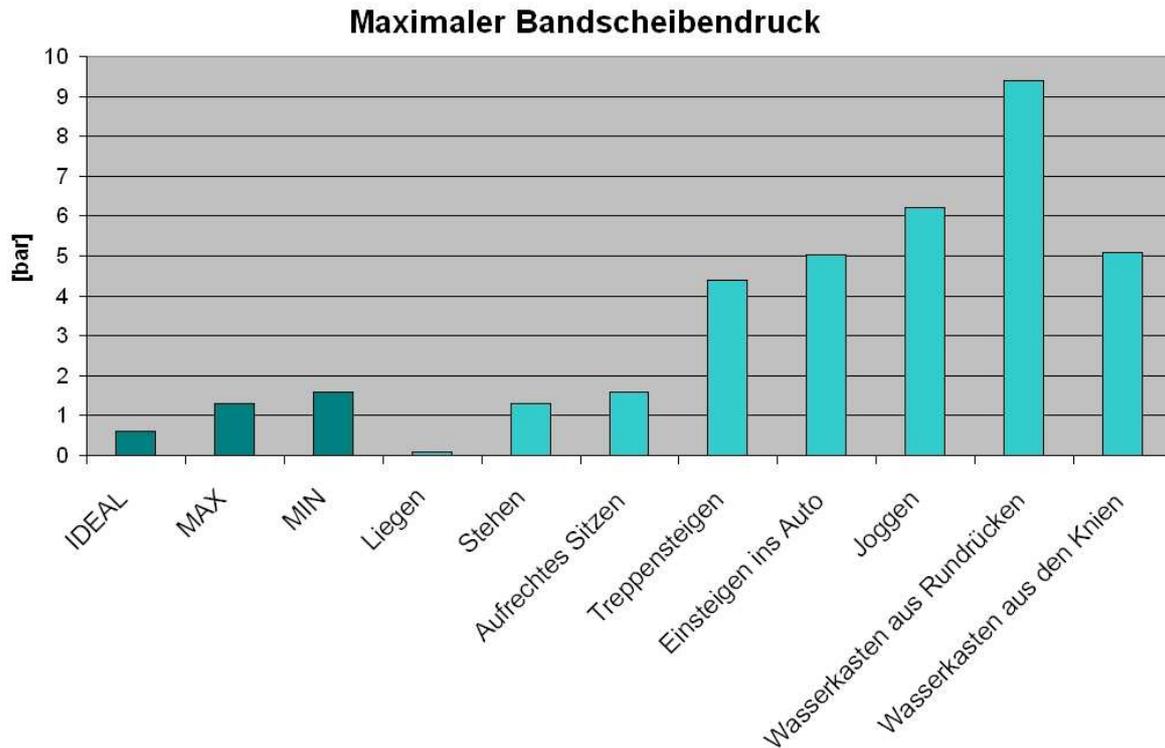


Abbildung 33: Bandscheibendrucke bei Alltagsaktivitäten

Weitere Tätigkeiten aus dem Alltag sollen angeführt werden, um eine Vergleichsmöglichkeit zu den Druckwerten in den Sitzeinstellungen zu erhalten. Beim Liegen auf dem Rücken wird ein Wert von 0,1 bar, beim aufrechten Sitzen ein Wert von 1,6 bar und beim Treppensteigen ein Wert von 4,4 bar erreicht. Ein Einstieg ins Fahrzeug verursacht 5,0 bar, Joggen 6,2 bar und das Anheben eines Wasserkastens aus dem Rundrücken 9,4 bar, während ein Anheben aus den Beinen bei durchgestrecktem Rücken nur 5,1 bar Druck erzeugt. Der höchste gemessene Bandscheibendruckwert wurde mit ca. 12 bar am Vormittag auf dem Golfplatz beim Abschlag gemessen. Im Gespräch des Verfassers mit Hoogland (am 15. Juli 2006) stellte sich heraus, dass ein Maximaldruck von bis zu 20 bar in der Bandscheibe möglich ist; dieser stellt dann bereits einen kritischen Wert dar, der zu dauerhafter Schädigung der Bandscheibe führen kann.

### 3.8.3 Abgleich zur bisherigen Diskomfortbewertung

Als wichtiger Part soll an dieser Stelle der Abgleich zu bisher erfolgten Diskomfortbewertungen bei unterschiedlichen Sitzeinstellungen aufgegriffen werden, wie sie bei Mergl (2006) aufgeführt sind. Durch Langzeitversuchsfahrten anhand von zehn Probanden (fünf Männer, fünf Frauen) wurde erprobt, welche der Sitzeinstellungen („max“, „ideal“, „min“) über einen Zeitraum von drei Stunden hinweg den geringsten Diskomfortwert hervorruft (vgl. Abbildung 34).

Den geringsten Gesamtdiskomfort weist mit einem Mittelwert von 5,9 die Einstellung „ideal“ auf, während die Einstellung „max“ einen Wert von 7,2 und die Einstellung „min“ mit 18,1 den mit Abstand höchsten Wert aufweist. Zudem gaben die Versuchspersonen bei der Einstellung „min“ durchwegs hohen Diskomfort im Bereich des unteren Rückens an.

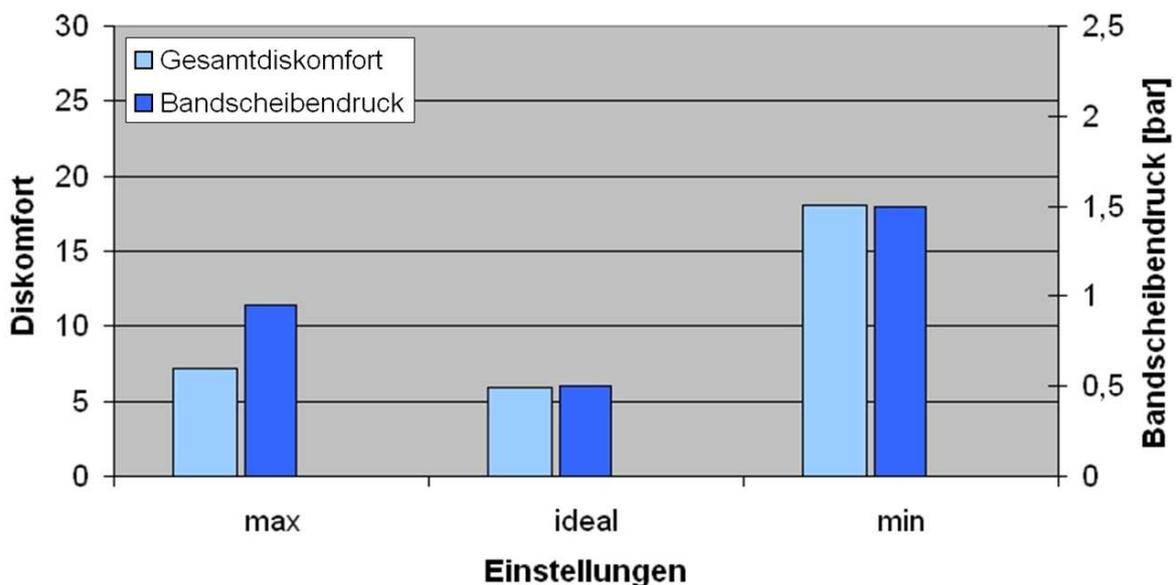


Abbildung 34: Vergleich der Bandscheibendrucke mit den Gesamtdiskomfortbewertungen für die drei Einstellungen: „max“, „ideal“ und „min“. Diskomfortbereiche: 1-10 „sehr geringer Diskomfort“, 11-20 „geringer Diskomfort“, 21-30 „mittlerer Diskomfort“

In einer Gegenüberstellung der Ergebnisse der Gesamtdiskomfortbewertungen über Langzeit hinsichtlich der „max“- , „ideal“- und „min“-Einstellung (Mergl, 2006) mit den Bandscheibendrucke aus Abbildung 30 über die gleichen Sitzeinstellungen ergibt sich eine bemerkenswerte Übereinstimmung. Die Diskomfortbewertungen aus Langzeit stimmen mit den auf Kurzzeit bezogenen Bandscheibendrucke überein; insbesondere bei den Einstellungen „ideal“ und „min“ lässt sich eine auffallende Deckungsgleichheit feststellen. Die ideale Einstellung nach Mergl (2006) ruft über Langzeit den geringsten Diskomfort hervor, genauso wie sie bei der Bandscheibendruckmessung den geringsten

Druck auf die Bandscheibe ausübt. Auch für die Einstellungen „max“ und „min“ tritt diese Entsprechung auf: Die Einstellung „max“ steht bei der Bandscheibendruckmessung wie über Langzeit an zweiter Stelle; die Einstellung „min“ folgt mit dem schlechtesten Wert in beiden Kategorien.

Diese Gegenüberstellung ist ein Indiz dafür, dass der Bandscheibendruck ein Indikator für die Muskelanspannung ist, die auf Dauer direkten Einfluss auf das menschliche Empfinden bezüglich des Gesamtdiskomforts hat.

Die Ergebnisse sollten nicht vorschnell generalisiert werden, da sie nur von einem einzigen Probanden stammen; sie stimmen jedoch sehr gut mit jenen Werten überein, die durch indirekte Methoden (Mathematische Modelle, Finite-Elemente-Rechnung, Belastungsmessungen an Wirbelsäulenimplantaten/Präparaten, Stadiometrie) gewonnen wurden, und sind aus biomechanischer Sicht plausibel (Wilke, 2004).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass in dieser bislang einmaligen Studie der medizinische Nachweis erbracht wurde, dass der Druck in der Bandscheibe allein durch Modifikation der Sitzfläche verändert werden kann. Was Mergl (2006) durch Interviews belegt hatte, konnte nun erstmalig auch medizinisch mit einem objektiven Messwert belegt werden.

## 4 Identifizierung der relevanten Körperregionen

Bei technischen Konstruktionen ist es von Vorteil, Systeme zu entwickeln, die mit einem möglichst geringen Aufwand maximale Erfolge erzielen. Insofern ist es speziell im Hinblick auf eine automatische Sitzkomforteinstellung erstrebenswert, vorab Körperregionen auszumachen, die ausschlaggebend für die Komfortbeurteilung sind und denen daher besonderes Augenmerk gelten sollte.

Im Folgenden soll deshalb die entscheidende Frage beantwortet werden, wie der Gesamtdiskomfort sich aus den einzelnen Körperteilbeurteilungen zusammensetzt und welche Größe letztendlich ausschlaggebend ist (vgl. Zenk, 2007).

### 4.1 Versuchsdesign

Die Testreihe des Verfassers basierte auf insgesamt 84 Probanden und über 500 Messwerten, welche sich in die drei Kategorien Sitzfläche, Lehnenfläche und Seitenhalt aufteilen lassen. Zum Zusammenhang von Einzeldiskomfortempfinden in einem bestimmten Körperteil und Gesamtdiskomfortempfinden sind drei unterschiedliche Theorien denkbar:

1. Mittelwert aus der Diskomfortbeurteilung:

Hier wird der Gesamtdiskomfort aus dem Mittelwert der Diskomfortbewertungen eines jeden einzelnen Körperteiles über die ganze Body Map (KT1–KT17) errechnet.

2. Maximalwert der Diskomfortbeurteilung:

Hierbei wird angenommen, dass der Gesamtdiskomfort durch den maximalen Diskomfort in einem der 17 Körpersegmente erzeugt wird. Nur der Körperteil mit der höchsten Diskomfortbeurteilung bestimmt den Gesamtdiskomfortwert.

3. Regressionsmodell:

Ein weiterer Ansatz, eine Korrelation für die gesamte Diskomfortbeurteilung zu erhalten, ist eine multiple Regression von Diskomfortbewertungen ganzer Körperpartien oder einzelner Körperteile.

Das zugrunde liegende angewendete Schema war bei allen Probandenstudien gleich. Der Proband hatte an der Body Map mit Hilfe der CP50-Skala (Hartung, 2006) für jeden einzelnen Körperbereich einen Diskomfortwert zu nennen. Nachdem alle Körperteile durchgegangen waren, war die Versuchsperson aufgefordert, einen Gesamtkomfortwert für die Sitzkonfiguration zu nennen, wie in

Abbildung 35 dargestellt. Diese Werte wurden anschließend miteinander in Korrelation gestellt.

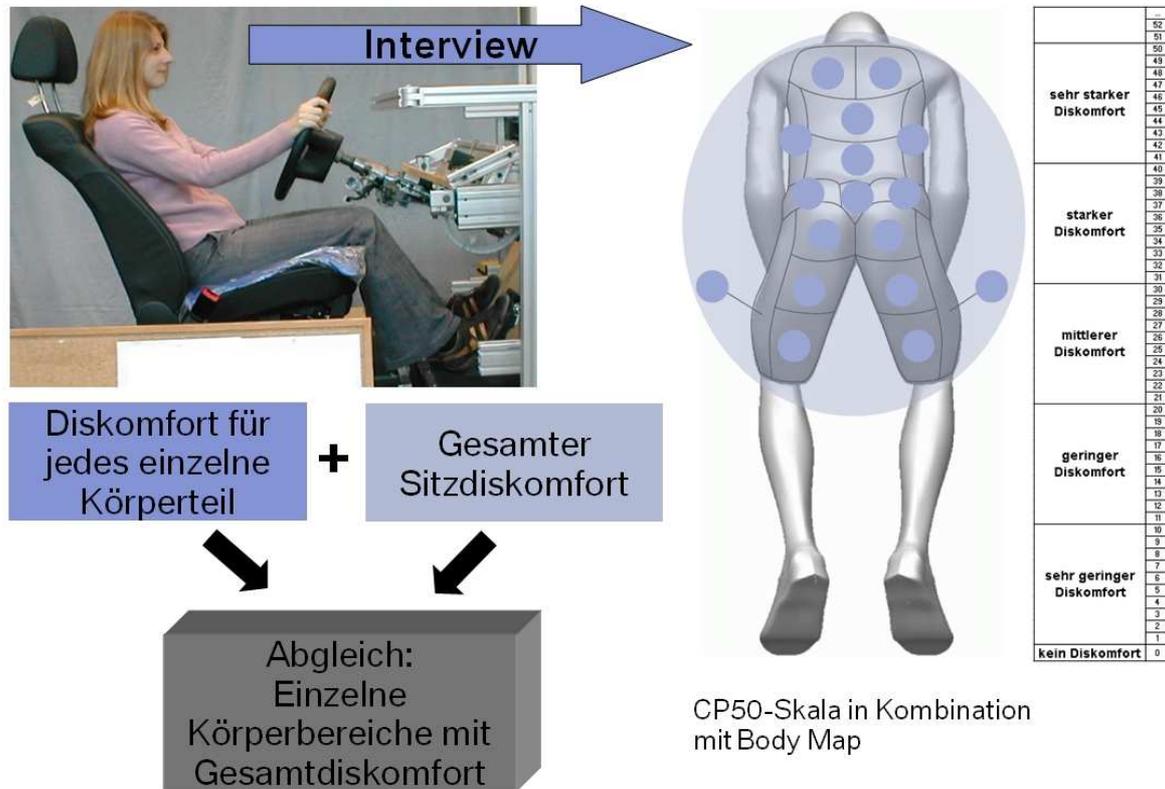


Abbildung 35: Versuchsdesign zur Gesamtdiskomfort-Beurteilung

## 4.2 Versuchsdurchführung

Für alle Probanden waren die Testbedingungen gleich, da die Testreihen auf einem Mockup im Versuchslabor stattfanden.

Der Fokus der ersten Untersuchung (Klendauer, 2004) lag auf der Sitzfläche. Sechs unterschiedliche Sitzflächenvariationen wurden von 20 Probanden beurteilt, so dass am Ende 120 einzelne Diskomfortbewertungen vorlagen.

Um ein möglichst großes Spektrum an Lastverteilungen zu erzeugen, sind zwei unterschiedliche Mercedesitze (M-Klasse [W 163], SLK [R 170]) gewählt worden, die durch unterschiedlichen Hartplastik- und Weichschaum modifiziert wurden. Die Versuchspersonen wurden aufgefordert, für jeden Körperbereich gemäß der Body Map – beginnend von den Schultern über das Gesäß bis zu den vorderen Oberschenkeln (KT1-KT17) – eine Diskomfortbewertung anhand der CP50-Skala vorzunehmen. Abschließend wurden sie gebeten, den Gesamtdiskomfort für die Druckempfindung zu beurteilen.

Die zweite hier angeführte Untersuchung (Krenn, 2004) konzentrierte sich auf die Rückenfläche. Dabei nahmen 25 Probanden teil; sechs unterschiedliche Lehnenvariationen standen zur Beurteilung bereit. Insgesamt wurden 150 unterschiedliche Sitzbedingungen geschaffen, um eine Aussage bezüglich des Rückendiskomforts zu erhalten.

Für die Testprozedur wurde ein Volvo-Sitz herangezogen, bei dem man durch Anwendung von Schaumplatten unterschiedlicher Härte und Dicke unterschiedliche Lehnenmodifikationen erzeugte. Die Probanden sollten für jeden Körperteil des Rückens (KT1-KT9) eine Diskomfortbewertung abgeben und zusätzlich am Ende jedes Interviews einen Gesamtdiskomfortwert für die Sitzkonfiguration nennen.

Bei der letzten Versuchsreihe lag das Kernaugenmerk auf der Seitenwangenunterstützung (Zenk, 2006). Es wurden sechs unterschiedliche Lastfälle, von maximal geöffneter bis maximal geschlossener Lahnbreitenverstellung, ausgewählt und von 40 Probanden (24 Männern, 16 Frauen) überprüft. Letztendlich wurden so 240 unterschiedliche Sitzbedingungen geschaffen, um ein aussagekräftiges Gesamtdiskomforturteil bezüglich der Seitenwangen zu erhalten.

Für diese Studie wurde ein BMW M5-Sitz (E60) mit verstellbaren Seitenwangen für die Rückenlehne ausgewählt. Es wurde ein Spektrum von sechs vordefinierten Lehnenbreitenverstellungen gewählt – von breit bis schmal. Die Diskomfortbefragung der Probanden konnte nach einer Adaptionszeit von 1 bis 2 min in jeder einzelnen Lehnenbreitenkonfiguration beginnen. Während des Interviews mussten die Versuchspersonen einen Diskomfortwert für jeden Körperteil des Rückens nennen – beginnend von den Schultern bis zum Steißbein (KT1-KT9). Am Schluss erfolgte eine Gesamtdiskomfortbewertung für jede Sitzeinstellung.

### 4.3 Ergebnisse

Eine Auswertung der Ergebnisse für Sitzfläche, Lehne und Seitenwangen ist in den Diagrammen in Abbildungen 36 bis 38 dargestellt. Dabei wird die Bewertung des Gesamtdiskomforts in Korrelation zum gemittelten Diskomfort und zum maximalen Diskomfort der einzelnen Körperregionen gestellt.

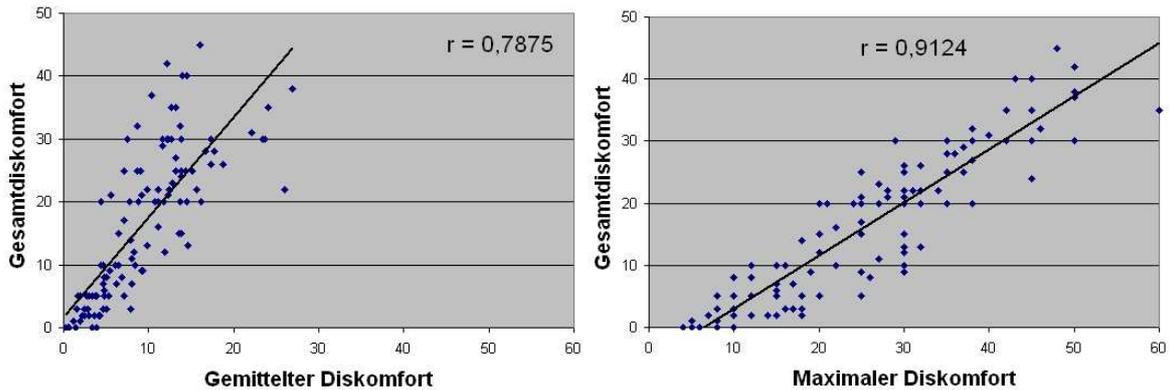


Abbildung 36: Bewertung des Gesamtdiskomforts der Sitzfläche nach gemitteltem Diskomfort und maximalem Diskomfort

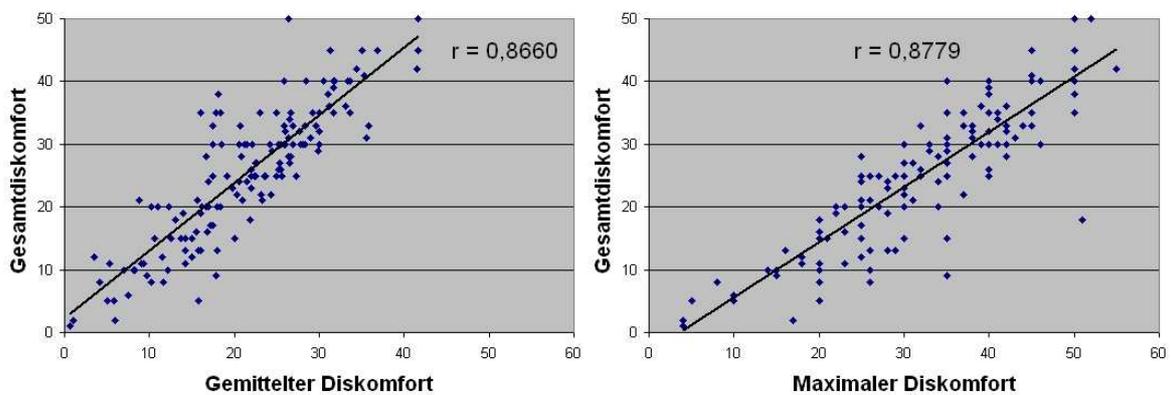


Abbildung 37: Bewertung des Gesamtdiskomforts der Rückenlehne nach gemitteltem Diskomfort und maximalem Diskomfort

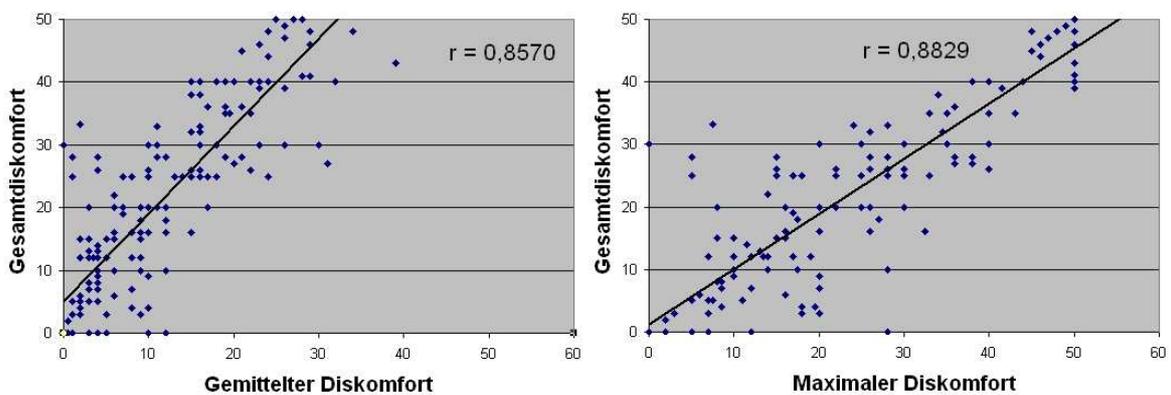


Abbildung 38: Bewertung des Gesamtdiskomforts der Seitenwangen nach gemitteltem Diskomfort und maximalem Diskomfort

Klar ersichtlich ist, dass in allen Diagrammen auf der Seite des maximalen Diskomforts ein höherer Regressionskoeffizient mit dem Gesamtdiskomfort erzielt wird als auf der Seite des gemittelten Diskomforts. Am deutlichsten ist dieser Effekt bei der Auswertung der Sitzflächenergebnisse zu erkennen; hier ergibt sich ein Anstieg des Regressionskoeffizienten von 0,79 auf 0,91.

Für alle drei oben angeführten Studien wurden die unterschiedlichen Theorieansätze nach ihrer Korrelation mit Mittelwert, Maximalwert und Regressionsmodell hinsichtlich der Gesamtdiskomfort-Beurteilung untersucht. Eine Zusammenstellung der Ergebnisse ist in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Korrelationskoeffizient für Sitzfläche, Rückenlehne und Seitenwangen

	Sitzfläche			Rückenlehne			Seitenwangen		
	Mittelwert	Regression	Maximalwert	Mittelwert	Regression	Maximalwert	Mittelwert	Regression	Maximalwert
Korrelationskoeffizient (r)	0,79	0,82	<b>0,91</b>	0,87	0,87	<b>0,88</b>	0,86	0,87	<b>0,88</b>

#### 4.4 Diskussion

Um eine Wechselbeziehung für die gesamthafte Diskomfortbeurteilung zu erhalten, wurden 2006 von Hartung verschiedene Theorien bezüglich der Zusammensetzung des Gesamtdiskomforts aufgestellt.

Die naheliegendste Theorie ist, dass sich der Gesamtdiskomfort aus dem Mittelwert der Einzeldiskomfortwertungen in den verschiedenen Körperregionen zusammensetzt (hier Regressionskoeffizient  $r = 0,695$ ).

Als Erweiterung wird angenommen, dass der Gesamtdiskomfort sich aus dem Mittelwert und dem Maximalwert der Einzeldiskomfortwertungen zusammensetzt. Dabei ergibt sich ein Regressionswert  $r = 0,71$ .

Als zusätzliche Verfeinerung werden Rücken und Sitzfläche getrennt betrachtet. Daraus ergibt sich der Regressionswert  $r = 0,72$ .

Durch eine weitere Aufgliederung in die Diskomfortwertungen der einzelnen Körperregionen (KT1-KT17) erhält man einen Regressionswert von  $r = 0,75$ .

Wie sich erkennen lässt, steigt mit zunehmender Ausdifferenzierung die Korrelation an, was sich aber nur in marginalen Schritten niederschlägt.

Die Auswertung der oben angeführten Studien hat hingegen gezeigt, dass in allen Fällen die Ergebnisse der Korrelation zwischen dem Gesamtdiskomfort und dem Maximaldiskomfort höher sind als die zum Mittelwert oder zu den Regressionsmodellen. Durch zusätzliche Differenzierung erhält man bei den multiplen Regressionen nur eine marginale Erhöhung des Bestimmtheitsmaßes ( $B=r^2$ ). Mit dem Maximalwert eines Körperteils hingegen konnte in allen untersuchten Fällen eine hohe oder sehr hohe Korrelation zur Gesamtdiskomfortbeurteilung erzielt werden.

Zacher (2004) unterstreicht diese Erkenntnis bei ihren Untersuchungen bezüglich menschlicher Körperbewegungen. Auch im dynamischen Zustand lässt sich eine starke Relation zwischen Gesamtdiskomfort-Beurteilung und maximalem Diskomfortwert in einem Gelenk oder Körperteil erhalten.

Deshalb eignet sich der Maximalwert aus den Einzeldiskomfortwertungen in den Körperregionen als einfachstes Vorhersagemodell für die Bestimmung des Gesamtdiskomforts.

Für die Entwicklung einer automatischen Sitzeinstellung bedeutet dies, dass es nicht ausreicht, sich bei der Optimierung des Sitzkomforts auf bestimmte Körperregionen zu konzentrieren.

Zwar hat Hartung (2006) in den Regressionsgleichungen zur Zusammensetzung des Gesamtdiskomforts festgestellt, dass Diskomfortwertungen im Rücken eine stärkere Gewichtung erfahren als die anderen Faktoren, es ist dabei aber festzuhalten, dass diese Art der Bestimmung des Gesamtdiskomforts nur für die in seinem Projekt betrachteten Versuchsbedingungen (nahe am Optimum) Gültigkeit hat. Seine Vermutung, dass bei ungünstigeren Konstellationen der Maximalwert in einem der betrachteten Körperregionen zunehmende Bedeutung gewinnt, kann durch die vorliegende Untersuchung bestätigt werden und muss im Sitzeinstellsystem Berücksichtigung finden.

Bei der im Folgenden dargestellten Entwicklung eines Sitzeinstellsystems soll diese Erkenntnis angewandt werden. Es geht darum, ein System vorzustellen, das es ermöglicht, im gesamten für den Sitzkomfort ausschlaggebenden Bereich automatisch eine ideale Druckverteilung zu erzeugen.

## 5 Entwicklung der automatischen Sitzkomferteinstellung

Mittlerweile besitzt ein Sitz eines Oberklassefahrzeugs (Abbildung 39) mehr als zehn verstellbare Funktionen, wobei vier Verstellmöglichkeiten in der Sitzfläche (Sitzlängs-, Sitzhöhen-, Sitztiefen-, Sitzneigungsverstellung) und drei in der Lehne (Lehnenneigungs-, Lehnenkopf-, Lehnenbreitenverstellung) stecken.

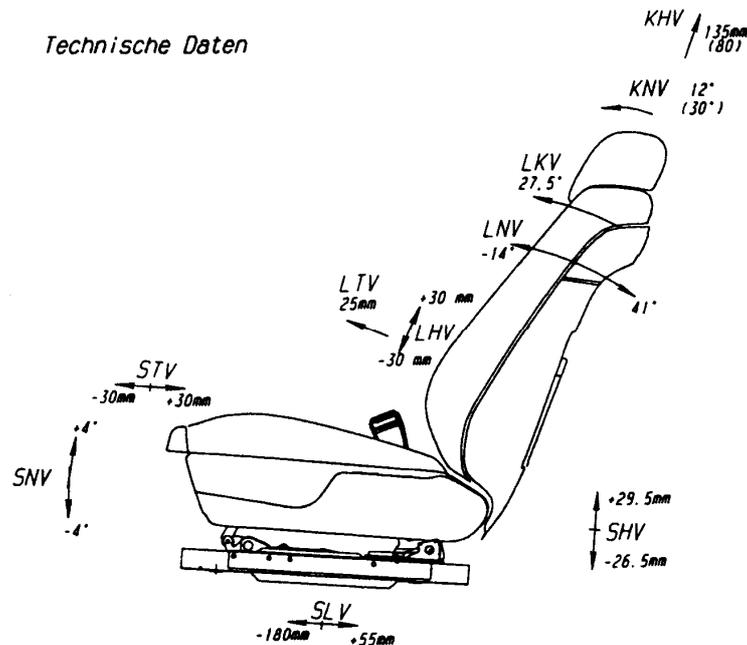


Abbildung 39: Schematische Skizze eines BMW 7er - Multifunktionssitzes (E65)

Wenn man die einzelnen Einstellschritte<sup>9</sup> der vier Verstellmöglichkeiten auf der Sitzfläche (SLV [44], SHV [25], SNV [18], STV [11]) mit den drei Verstellmöglichkeiten für die Lehne (LNV [60], LKV [13], LBV [12]) kombiniert, erhält man eine Zahl von insgesamt 203.860.800 unterschiedlichen Einstellungen, die theoretisch mit diesem Sitz möglich sind. Nicht berücksichtigt ist dabei noch die Lordosenhöhen-, die Lordosentiefenverstellung sowie die Kopfstützenhöhen- und Kopfstützentiefeneinstellung. Jede einzelne Sitzverstellung für sich beeinflusst eine andere. Daher ist es sehr schwer, die Sitzhaltung auf manuellem Wege perfekt, d.h. mit minimaler Muskelanspannung und somit minimalem Bandscheibendruck einzustellen. Nur so aber kann über längere Zeit Sitzkomfort gewährleistet werden. Aus diesem Grund soll auf Basis der idealen Druckverteilung (siehe Kap. 2.4) eine automatische Sitzkomferteinstellung (ASCA = Automatic Seat Comfort Adjustment) geschaffen werden.

<sup>9</sup> Hier durch [...] gekennzeichnet.

### 5.1 Technische Grundlagen und Voruntersuchungen

Damit die ASCA im Automobil praktisch realisiert werden kann, muss der betreffende Fahrzeugsitz zwei Kriterien erfüllen: Zum einen muss es möglich sein, den Sitz gemäß der idealen Druckverteilung einzustellen. Dies ist nach Mergl (2005) mit einem 7er-BMW-Sitz (Multifunktion) erreichbar, da sich dieser sehr individuell verstellen lässt. Zum anderen muss der Sitz über eine sensible Drucksensorik verfügen, da exakte Messwerte die Voraussetzung für alle folgenden Einstellungsschritte darstellen. Diese Drucksensorik muss im Sitz selbst verbaut werden.

#### 5.1.1 Anforderungsadäquate Sensorik

Die für die ASCA infrage kommende Technik muss zwei Anforderungen Genüge tun:

Der erste Faktor ist das Ausbleiben von Komfoteinbußen. Die Drucksensoren müssen möglichst dünn und flach zwischen Mensch und Sitzstruktur ausgelegt werden; idealerweise sollten sie selbst flexibel sein.

Die zweite entscheidende Größe ist die Messgenauigkeit. Schon kleinste Veränderungen der Druckverteilung sollten aufgelöst werden. Dabei ist der Absolutwert weniger entscheidend als die Relativwerte aufgrund der prozentualen Lastverteilung.

Generell können für die automatische Sitzkomfoteinstellung unterschiedliche Sensorsysteme in Betracht gezogen werden:

OC-Matten (OC = occupant classification), die die Sitzbelegung überprüfen, werden auf der Beifahrerseite bereits in Serie verbaut, da sie für die Airbagaktivierung nötig sind. Die Versuche, eine OC-Matte auf der Fahrerseite des 7er BMWs als Druckmessmatte einzusetzen, schlugen jedoch fehl: Die hier verwendete Sensorik lässt lediglich die duale Bestimmung zu, ob Last auf diesem Sensor anliegt oder nicht. Einen kalibrierten, aussagekräftigen Messwert, der mit anderen in Vergleich gebracht werden soll, kann die OC-Matte nicht liefern.

Exakte Messergebnisse sind hingegen mit der Kraftmessdose möglich. Allerdings kann ihre feste Ummantelung zu Komfoteinbußen führen. Da für die Sitzkomfoteinstellung der Druck an exponierten Stellen, beispielsweise unter den Schulterblättern oder unter den Sitzbeinhöckern, untersucht werden muss, wäre eine solche Projektierung sehr nachteilig.

Druckmessmatten (kapazitiv oder resistiv) können eine sehr hohe Auflösung liefern und sind so flexibel, dass kaum Komforteinbußen entstehen. Den Anforderungen im dauerhaft dynamisch belasteten Bereich – im Sitz selbst – sind Druckmessmatten allerdings auf Dauer nicht gewachsen, so dass es in der Praxis häufig zu Ausfällen kommen könnte. Zudem ist eine so hohe Auflösung, wie sie durch Druckmessmatten möglich ist, für die Anwendung in der ASCA gar nicht vonnöten. Angesichts der vergleichsweise hohen Kosten ist also auch diese Methode als eher ungeeignet einzustufen.

Die Entscheidung fiel daher auf pneumatische Sensoren. Zwar weist auch dieses System einige nachteilige Eigenschaften auf. Als die wichtigste ist der Umstand zu nennen, dass die pneumatischen Sensoren nur dann einen Messwert liefern können, wenn zuvor ein Blasenvordruck aufgebaut wurde. Dies kann evtl. zu akustischen Beeinträchtigungen während des Lufteinfüllens bzw. -ablassens führen. Zudem bedarf es einer Pumpe, die den Vorgang des Luftbefüllens übernimmt, und Ventile, über die die Befüllung und das Ablassen geregelt werden. Nichtsdestotrotz überwiegen die Vorteile dieser Sensortechnik. Der wichtigste Vorteil dieses Systems besteht darin, dass es erstaunlich sensibel ist und sehr schnell anspricht, so dass schon ein leichtes Streichen über die Blaselemente einen sichtbaren Druckunterschied erzeugt. Zudem sind pneumatische Systeme in Bezug auf ihre Verkopplung untereinander einfach in der Handhabung. So können beispielsweise zum Ausgleich von Asymmetrien von linker und rechter Sitzhälfte beide Druckblasen durch direkte Kopplung über Schläuche miteinander verknüpft werden. Im Vergleich zu elektronischen Sensoren bedarf es hier keiner eigenen Software, die für eine Zusammenkopplung von mehreren Messstellen sorgt.

Mit ausschlaggebend war auch, dass man auf diese Blaselemente bereits in Form eines Übernahmeteils zurückgreifen kann.<sup>10</sup> Diese Pneumatikelemente wurden für den Serieneinsatz bezüglich ihrer Dauerhaltbarkeit erprobt. Auch gegen Scherkräfte sind sie im Vergleich zu Kraftmessdosen oder Druckmessmatten resistent.

---

<sup>10</sup> Ab Ende 2008 wird ein Massagesystem bei BMW im Rücksitz als Sonderausstattung angeboten, der über zwölf pneumatische Hubelemente in der Rückenlehne verfügt.

### 5.1.2 Platzierung der Sensorik

Beim Einbau der Sensorik in den Sitz stellt sich zunächst die Frage der Platzierung. Die Drucksensoren müssen sich zwischen dem Menschen und der metallischen Sitzstruktur befinden. Eine Positionierung der Sensoren direkt auf der Sitzoberfläche wäre jedoch unschön und würde das Design des Sitzes zerstören. Auch ein Einfügen der Sensoren direkt unter dem Bezug ist nicht möglich, da dies zu Komforteinbußen führen könnte, weil die Sensoren dann noch deutlich spürbar wären. Somit bleibt als einzige praktikable Lösung eine Einbringung der Drucksensoren zwischen die Sitzstruktur bzw. die Befederung und den Schaumteil.



Abbildung 40: Übertragung der Druckverteilung und Einbaulage der „Pneumatiksensoren“

Die Sensoren sind so im Sitz angeordnet, dass sie die exponierten Stellen der menschlichen Druckverteilung ideal abdecken (vgl. Abbildung 40). Gemäß der Bodymap (Hartung, 2006) sind dabei sechs Lastbereiche entscheidend: Schulterblätter, oberer Rücken, Lordosenbereich, Gesäß, mittlerer Oberschenkel- und vorderer Oberschenkelbereich.

Für den Rückenbereich sind also drei Sensoren erforderlich, die je einen Druckwert für die Körperbereiche Schulterblätter, oberer Rücken und Lordosebereich erzeugen. Zur Umsetzung werden immer vier Hubelemente der Massagematte durch eine pneumatische Kopplung zu einer Sensoreinheit zusammengefasst. In der Sitzfläche sind Sensoren unter dem Gesäß und unter den vorderen Oberschenkeln in der Sitztiefenverstellung notwendig.

### 5.1.3 Sitzaufbau

Mit einem Multifunktionssitz der 7er-Baureihe bei BMW (E65), wie er derzeit erhältlich ist, lässt sich eine ideale Druckverteilung erzielen. In Sitzfläche und Lehne wird weder der Maximaldruck noch der Gradient überschritten, d.h. unzulässig starke Kantensprünge sind in diesem Sitz nicht vorhanden. Bei der Sitzeinstellung durch den Fahrer liegt das Hauptaugenmerk daher auf der richtigen prozentualen Lastverteilung, die sich mittels der hohen Anzahl an Verstellmöglichkeiten (SLV, SHV, SNV, LNV, LKV, LTV, LHV, LBV, KHV) ideal einstellen lässt.

Für den Aufbau der automatischen Sitzkomferteinstellung wurde ein Multifunktionssitz mit Aktivsitzfunktion<sup>11</sup> herangezogen, der über eine 10-fach elektrische Sitzverstellung verfügt. Zusätzlich zu diesem Serienstand wurde eine Massagematte (Sonderausstattung für 7er-BMW ab EZ 10/2008 [F01]; Rücksitz) zwischen die Struktur (Flexmatte) und das Schaumteil der Rückenlehne eingefügt. Darüber hinaus ist in der Sitztiefenverstellung ein weiteres Hubelementpaar untergebracht. Die eingebauten Blasen fungieren in dieser Anordnung lediglich als Drucksensoren und werden nicht als Konturverstellelemente genutzt. Sobald der Druck registriert und der Sitz eingestellt ist, wird der Blasenvordruck wieder abgelassen. So treten die Blasenelemente wieder in den Hintergrund und können erneut in ihrer ursprünglichen Funktion, der Aktivierung des menschlichen Körpers durch Massage und somit der Trophikförderung der Bandscheiben, aktiv werden.

Die Einbaulage der Hubelemente, welche als Drucksensoren fungieren, ist auf einem Multifunktionssitz (E65) in Abbildung 41 zu erkennen.

---

<sup>11</sup> Ein Aktivsitz weist Blasenelemente unter den Sitzbeinhöckern auf, die durch abwechselndes Auf- und Ablassen eine Trophikförderung in der Bandscheibe erzielen sollen.



*Abbildung 41: Hubelemente, die als Sensoren verwendet werden (Massagematte, Aktivsitzelemente, weiteres Blasenpaar in der STV)*

### **5.1.4 Abgleich zur idealen Druckverteilung**

Für die Umsetzung der Messergebnisse in ein technisches System können die ermittelten Werte der idealen Druckverteilung nicht unmittelbar übernommen werden. Da die Blasenelemente unter der Sitzoberfläche, zwischen Schaum und Unterstruktur, verbaut werden, ergibt sich ein Unterschied zu den Werten der idealen Druckverteilung, die durch Auflage einer Druckmessmatte auf der Sitzoberfläche gemessen wurden.

Zur Transferierung der Werte der idealen Druckverteilung auf die Blasenelemente wurde in einem Vorversuch an 40 Probanden (28 Männern, 12 Frauen) der Sitz in einem Versuchsmockup (vgl. Abbildung 42) gemäß der idealen Druckverteilung

eingestellt. Zudem wurde für jede Versuchsperson eine Sitzdruckverteilung aufgezeichnet, welche zusätzlich bestätigte, dass der Sitz ideal eingestellt war.



Abbildung 42: Aufbau der automatischen Sitzkomforteinstellung auf dem Mockup

Nachdem die ideale Druckverteilung erreicht war, mussten die Probanden den Sitz verlassen. Dann wurden die Blasen mit einem Vordruck befüllt und die Versuchspersonen nahmen erneut Platz. Dieser Vordruck wurde vom Messrechner aufgezeichnet, was dem eingesessenen Druck in den Blasenelementen einer idealen Druckverteilung entsprach.

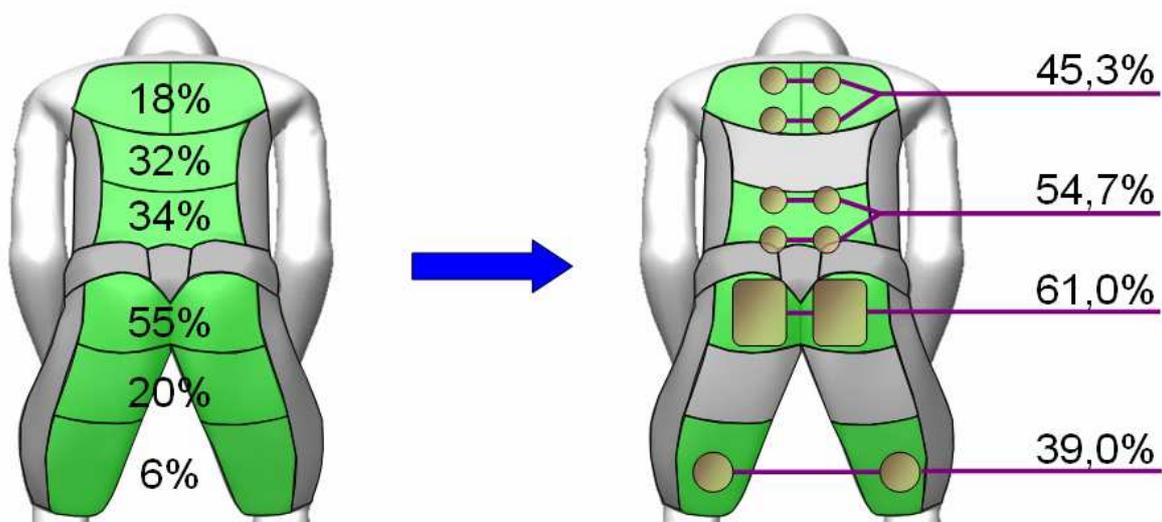


Abbildung 43: Übertragung der idealen Druckverteilung auf die Blasenelemente (prozentual).  
Linke Seite: Ideale Druckverteilung auf der Sitzfläche. Rechte Seite: Übertrag der idealen Druckverteilung auf die Blasenelemente unter der Sitzfläche

Die Ergebnisse des Mittelwerts der prozentualen Druckverhältnisse in den Blasenelementen von 40 Personen sind in Abbildung 43 aufgeführt. Dabei ist zu erkennen, dass auf der Sitzfläche der prozentuale Druck in den Blasenelementen im Vergleich zur idealen Druckverteilung deutlich variiert, was sich aufgrund der Einbaulage und der Blasengeometrie erklären lässt. Im Rückenbereich erwies sich die Druckverteilung in den Pneumatikblasen als recht ausgeglichen.

### 5.1.5 Sitzverstellmöglichkeiten und ihre Auswirkungen

Ziel dieser Studie war es, Druckveränderungen in den Blasenpaaren der Rückenlehne und der Sitzfläche abhängig von der entsprechenden Sitzverstellung aufzuzeigen. D.h. es sollte gezielt herausgefunden werden, welche Sitzverstellung durchgeführt werden muss, um eine Druckerhöhung/-reduzierung hinsichtlich der Druckverteilung zu erreichen.

Eine Probandenstudie an 20 Versuchspersonen (10 Männer, 10 Frauen) sollte zeigen, welche Druckveränderungen sich in den Pneumatikblasen im Sitz selbst durch Verfahren des entsprechenden Sitzverstellmotors ergeben. Dabei wurden alle Verstellmöglichkeiten vom einen bis zum gegenüberliegenden Anschlag komplett verfahren. Die Ergebnisse sind in Abbildung 44 aufgeführt.

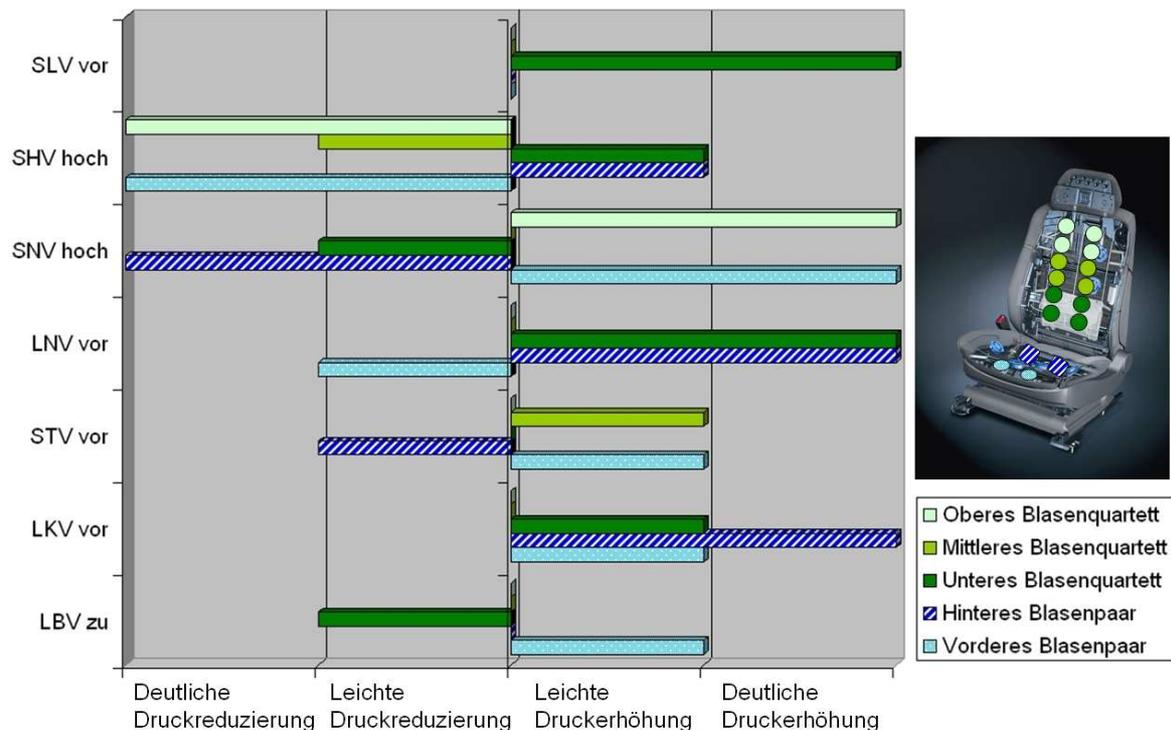


Abbildung 44: Sitzverstellungen und ihre Auswirkung auf die Druckveränderung in Lehnen- und Sitzflächenbereichen

Aus der Übersicht in Abbildung 44 wird deutlich, dass die Sitzhöhen- (SHV), Sitzneigungs- (SNV) und Lehnenneigungsverstellung (LNV) den größten Einfluss auf die Druckveränderung des eingesessenen Sitzes haben – ein Phänomen, das sich über alle Probanden hinweg beobachten ließ. Wird beispielsweise die Rückenlehne weiter nach vorne gestellt, nimmt der Druck im unteren Rückenbereich deutlich zu. Gleichzeitig erhöht sich aber auch der Druck unter den Sitzbeinhöckern signifikant, was zu einem leichten Druckabfall unter den vorderen Oberschenkeln führt. Auch weniger bekannte Effekte einer Druckveränderung im Sitz konnten durch diese Probandenstudie aufgezeigt werden, beispielsweise eine Druckerhöhung unter den Sitzbeinhöckern durch ein Heranfahen der Lehnenkopfverstellung (LKV).

Es lässt sich also festhalten, dass Druckveränderungen im Rückenbereich deutliche Auswirkungen auf die Sitzfläche haben und genauso auch umgekehrt.

Die Untersuchung zeigt auch, dass auf die mittleren Blasen Elemente in Sitzfläche und Rückenlehne verzichtet werden kann, da in diesen Blasenpaaren durch keine der Sitzmotorverstellungen eine signifikante Veränderung auftritt. Nur im Schulter- und unteren Rückenbereich lässt sich eine deutliche Druckveränderung feststellen.<sup>12</sup>

### **5.1.6 Reihenfolge der Sitzverstellmöglichkeiten**

Die Automatisierung der Sitzeinstellung sollte sich am Vorgehen der manuellen Einstellung des Sitzes orientieren. Denn nur wenn der automatisierte Ausrichtungsvorgang in gewohnter Reihenfolge abläuft, wird er vom Menschen als harmonisch und intuitiv als ideal wahrgenommen.

Daher wurden die Empfehlungen des ADAC und der großen Automobil- und Sitzhersteller in Deutschland zur Einstellung des Sitzes analysiert (Stand 10/2007). Sie sind in Tabelle 2 dargestellt.

---

<sup>12</sup> Vgl. hierzu: Zahnradmodell nach Brügger (Kubalek-Schröder, Dehler, 2004)

## Entwicklung der automatischen Sitzkomfoteinstellung

---

*Tabelle 2: Empfehlung einer Reihenfolge hinsichtlich der Sitzeinstellung*

	1. Schritt	2. Schritt	3. Schritt	4. Schritt	5. Schritt	6. Schritt	7. Schritt	8. Schritt
ADAC	SLV	SHV	SNV	LNV	LRV	KSV		
Audi	SHV	SLV	LNV					
BMW	SLV	SHV	SNV	LNV	LKV	LRV	Lordose	KSV
Mercedes	SLV	SHV	SNV	LNV	KSV			
Recaro	SLV	LNV	SHV	SNV	STV	Lordose	LBV	KSV
<b>Mittel</b>	<b>SLV</b>	<b>SHV</b>	<b>SNV</b>	<b>LNV</b>				

Die Empfehlungen unterscheiden sich nur in geringem Maß: Fast alle sich äußernden Institutionen empfehlen, mit der Sitzlängsverstellung (SLV) zu beginnen; dem soll die Einstellung der Sitzhöhe (SHV) folgen, darauf wiederum die Sitzneigung (SNV). Zuerst wird also die Sitzfläche in eine ideale Position gebracht, erst dann erfolgt das Einstellen der Rückenlehne über die Lehenneigungsverstellung (LNV). Wenn der Sitz über weitere Sonderausstattungen verfügt, beispielsweise eine Lehenkopfverstellung (LKV), Lehenbreitenverstellung (LBV) oder Sitztiefenverstellung (STV), folgen diese. Die Kopfstützenverstellung (KSV) wird in allen untersuchten Fällen als letzter Schritt angeführt.

Aus diesen Empfehlungen lässt sich eine sinnvolle Reihenfolge der Ansteuerung der Verstellmotoren ableiten. Abbildung 45 zeigt ein mögliches Szenario hinsichtlich der Gewichtung der Verstellreihenfolge einer automatischen Sitzkomfoteinstellung. Dabei wird unterschieden zwischen der Eigenvorgabe, den Kernverstellgrößen und den Zusatzverstellgrößen.

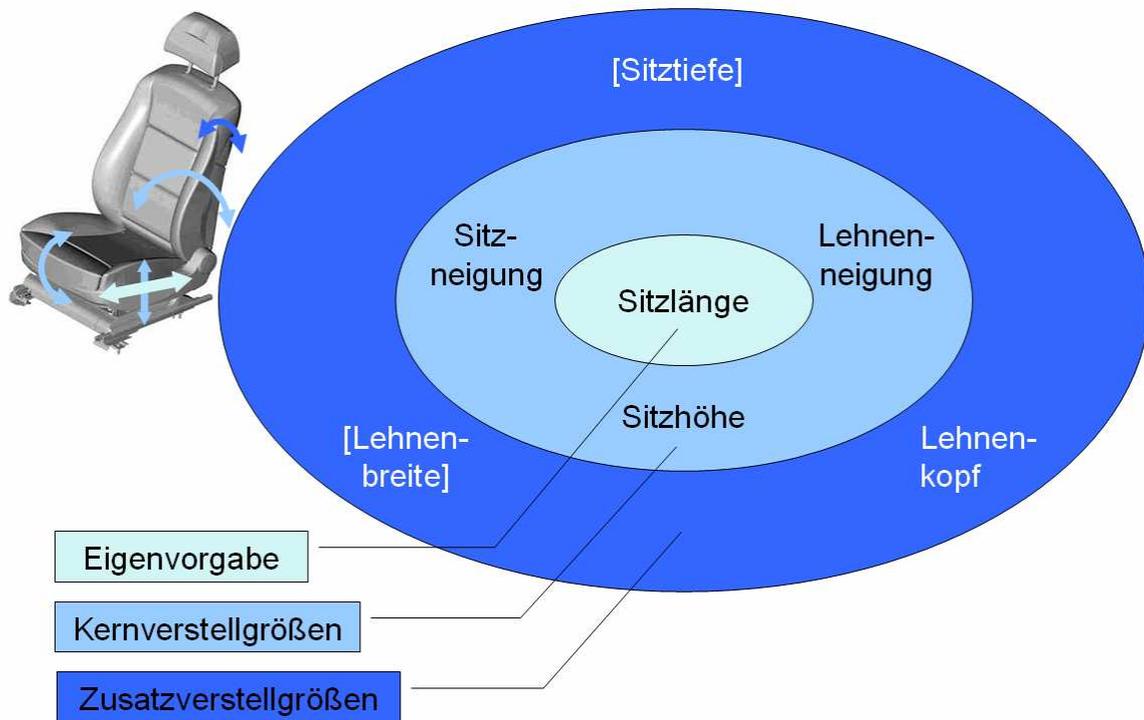


Abbildung 45: Reihenfolge der Ansteuerung der Verstellmotoren:  
Eigenvorgabe – Kernverstellgrößen – Zusatzverstellgrößen

Der einsitzende Fahrer kann zunächst durch Eigenvorgabe der Sitzlängsverstellung eine Grobausrichtung im Fahrzeuginnenraum tätigen. Alle weiteren Einstellungen erfolgen automatisch.

In einem ersten Schritt werden die Kernverstellgrößen<sup>13</sup> – Sitzhöhen-, Sitzneigungs- und Lehnenneigungsverstellung – angesteuert, die den entscheidenden Ausschlag für eine ideale Druckverteilung geben. Im zweiten Schritt werden die Zusatzverstellgrößen verfahren. In der automatischen Sitzkomferteinstellung ist bislang nur die Lehnenkopferstellung implementiert, da die Sitztiefen- und Lehnenbreitenverstellung sehr vorliebenabhängig ist.<sup>14</sup>

<sup>13</sup> Dies korrespondiert mit einer Untersuchung, die Reum (2004) an 38 Probanden durchführte. Er fand heraus, dass folgende Verstellmöglichkeiten genutzt werden: Zu 92% SLV und LNV, zu 83% SHV, zu 50% SNV und LKV, zu 42% STV und zu 33% LBV.

<sup>14</sup> Auf die Lordosenverstellung wird in diesem Punkt bewusst verzichtet, da diese in Form einer pneumatischen Verstellung (bei der BMW Group) ausgeführt ist und die automatische Sitzverstellung gezielt auf die prozentuale Lastverteilung eingeht, die sie mit Hilfe der Sitzmotoren und deren passender Ansteuerung erreichen will.

Auf diese Weise ist eine Reihenfolge der Automatisierungsschritte festgelegt, die den Erfahrungen und damit auch den Erwartungen der Fahrer in hohem Maß entspricht und daher von ihnen als angenehm empfunden wird.

### 5.2 Regelung und Steuerungsalgorithmus

Die automatische Sitzeinstellung beruht im Wesentlichen auf einem Regelkreis, der für das Verfahren der Sitzvariablen in ideale Position sorgt. Seine Funktionsweise soll im Folgenden erklärt werden.

#### 5.2.1 Hardware für Regelung

Die schematische Skizze für die automatische Sitzkomforteinstellung (vgl. Abbildung 46) ist in zwei Funktionsstränge unterteilt: die Aufnahme der Messsignale und die Ansteuerung des Sitzes.

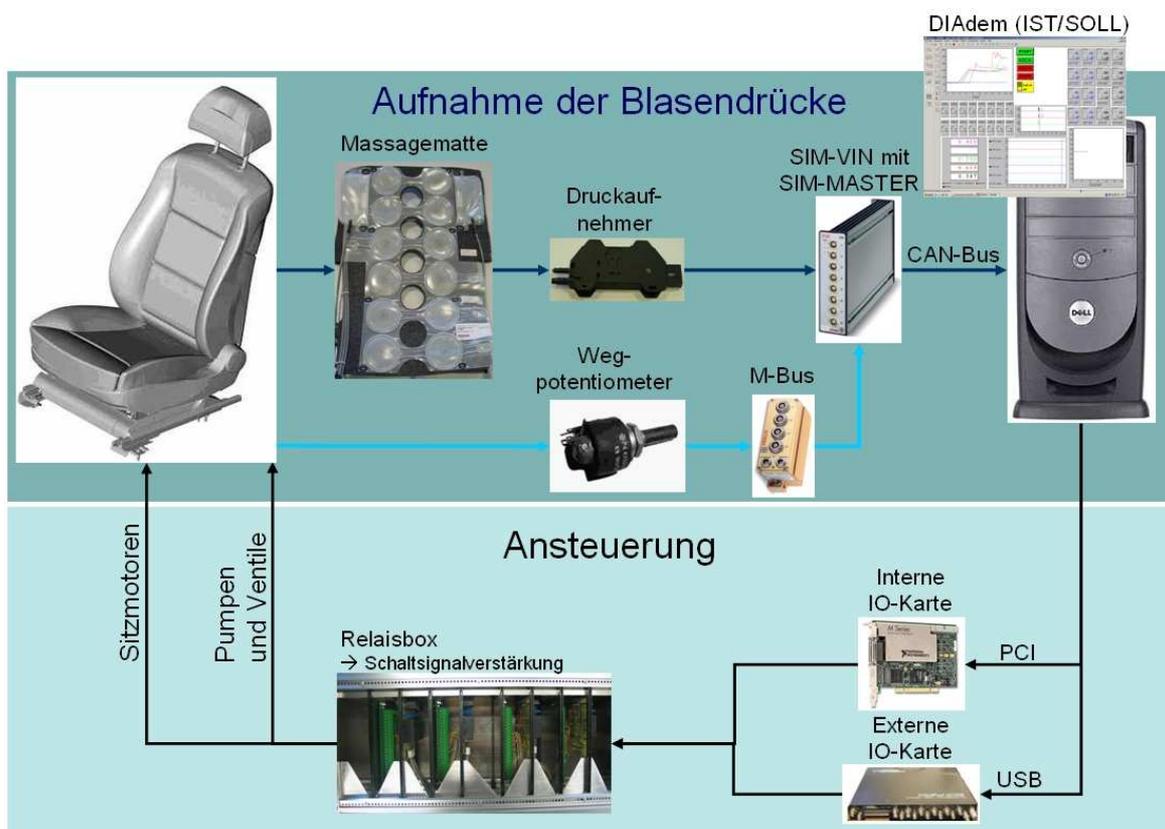


Abbildung 46: Schematische Skizze der automatischen Sitzeinstellung (Aufnahme der Blasendrucke → Ansteuerung der Sitzmotoren)

Die Messung der prozentualen Lastverteilung erfolgt über die eingebrachten Blasenlemente in der Lehnen- und Sitzfläche, die an einen Druckaufnehmer gekoppelt sind. Ein Sensor wandelt das analoge Signal in ein digitales um und gibt es an das Messmodul vom Typ SIM-VIN weiter. Über den SIM-MASTER werden die Drucksignale mittels CAN-Bus an den Messrechner übergeben, der sie mittels der interaktiven und automatisierten Datenverarbeitungssoftware DIAdem verarbeitet. Die Regelung und Ansteuerung der automatischen Sitzkomfoteinstellung wird in den folgenden Kapiteln erörtert.

Als Steuerungseinheit dient ein Messrechner, in den zwei digitale I/O-Karten eingebaut sind. Für die gesamte Ansteuerung der Sitzmotoren, Pumpen und Ventile werden insgesamt vier I/O-Karten benötigt, so dass zwei weitere digitale I/O-Karten (extern) per USB am Rechner angeschlossen werden. Bei den internen I/O-Karten handelt es sich um PCI-Steckkarten von National Instruments vom Typ DAQCard-6036E; die externen I/O-Karten sind vom Typ DAQPad-6020E. An jede I/O-Karte wird jeweils ein Anschlussblock (Typ CB68LPR) über ein Flachbandkabel angeschlossen.

Über diese Anschlüsse werden pro Anschlussblock jeweils vier Motorumpolrelais vom Typ Elli Echo ER20T-S angesteuert, welche sich auf einer Platine befinden. Diese Platinen verfügen über die passenden Anschlüsse zu den Anschlussblöcken, den Verstellmotoren und den Drucksensoren. Für die Platinen und die Anschlussblöcke wurde eigens eine Relaisbox geschaffen. Mit diesen Relais aktiviert man die Drucksensoren und die Verstellmotoren im Sitz.

### **5.2.2 Modell der Regelung**

Ein Regelkreis ist ein rückgekoppeltes System, das aus einer Regelstrecke, einem Regler und der Rückführung besteht. Kennzeichnend dabei ist der geschlossene Wirkungskreis mit einer negativen Rückkopplung.

In Abbildung 47 ist das Blockschaltbild eines einfachen Standardregelkreises gezeigt, bestehend aus der Regelstrecke (Sitzmotor, Sitz, Mensch), dem Regler (DIAdem) und einer negativen Rückkopplung der Regelgröße (Istwert; hier: IST-Druckverteilung) auf den Regler. Die Regeldifferenz (hier: Druckdifferenz) wird aus der Differenz zwischen der Führungsgröße (Sollwert; hier: ideale Druckverteilung) und der Regelgröße errechnet. Der vom Regler ermittelte Stellwert (hier: Ansteuerung der Sitzmotoren) wirkt auf die Strecke und damit wiederum auf die Regelgröße ein. Die Störgröße (z.B. das Verrutschen des

Probanden auf dem Sitz) bewirkt eine Veränderung der Regelgröße, die kompensiert werden muss.

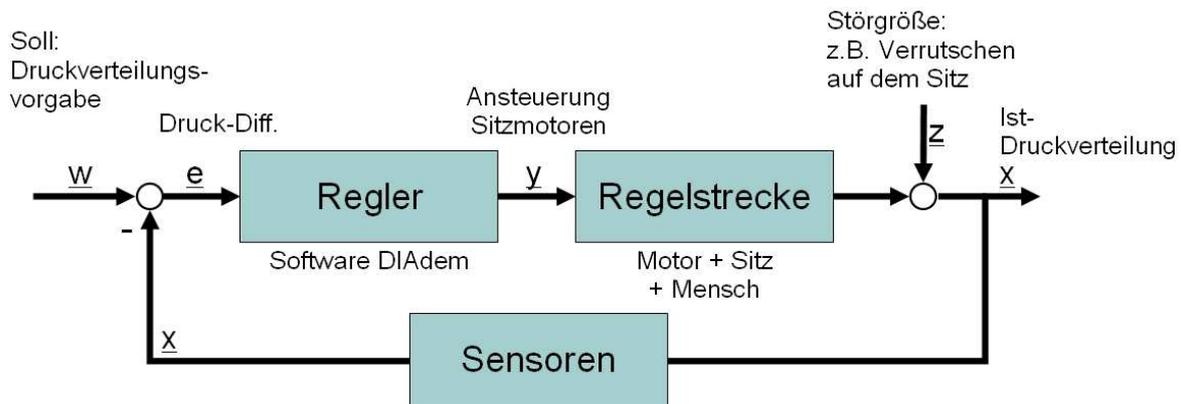


Abbildung 47: Regelkreis – Automatische Sitzkomfoteinstellung

Eine schematische Darstellung des Regelalgorithmus der automatischen Sitzkomfoteinstellung ist in Abbildung 48 gezeigt. Beim Start des Programms werden die Blasenpaare auf einen Normdruck aufgefüllt, der sich bei allen Hubelementen auf das gleiche Niveau einstellen muss. Dieser Befüllvorgang dauert bei dieser Pumpenkonfiguration nur etwa fünf Sekunden (vgl. Anhang 1, Abbildung 65). Nachdem ein konstanter Messdruck erreicht ist, kann sich der Fahrer einsetzen, was zu einer deutlichen Druckänderung in einzelnen Blasenpaaren führt. Erst wenn sich der Fahrer im Sitz ausgerichtet hat, bleibt der Messdruck dauerhaft konstant und die Regelung kann starten.

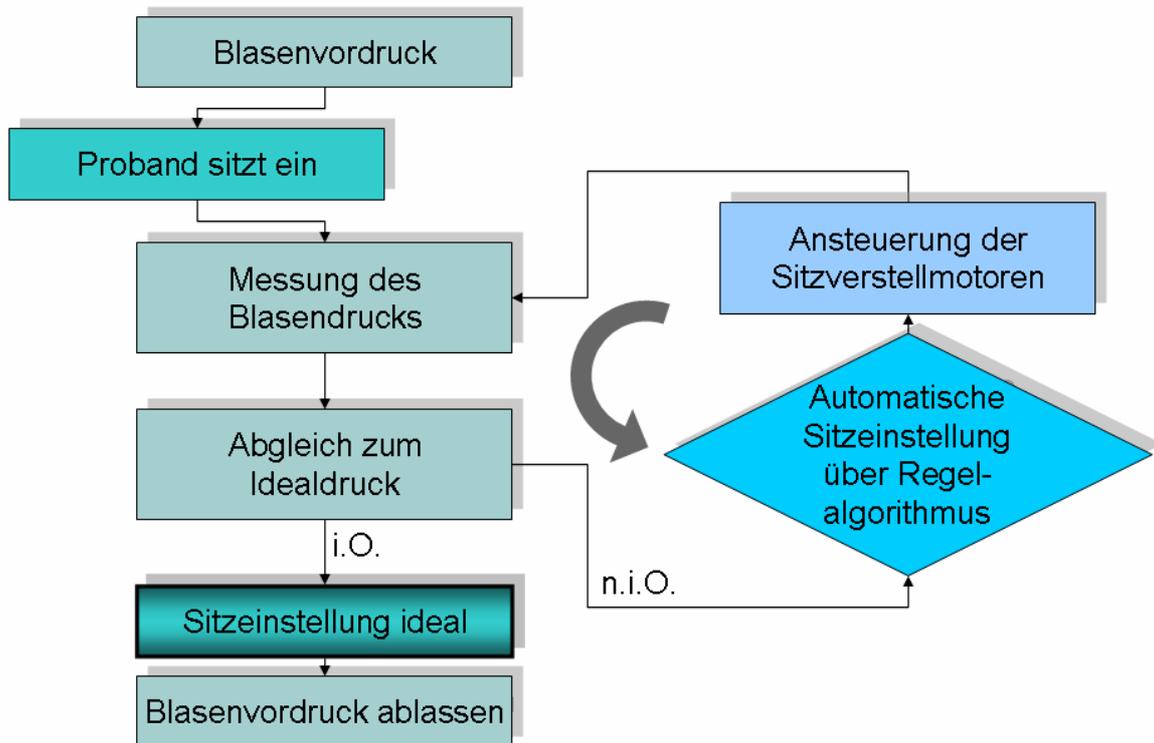


Abbildung 48: Ablauf des Regelalgorithmus der automatischen Sitzkomferteinstellung

Für die Einstellung des Sitzes wird zunächst die IST-Druckverteilung ermittelt und mit der Soll-Druckverteilung – der idealen Druckverteilung – verglichen. Stimmen Ist- und Sollwert nicht überein, tritt ein Regelalgorithmus der automatischen Sitzkomferteinstellung in Kraft, wie er in Kapitel 5.2.3 beschrieben wird. Grundlage ist hierbei der prozentuale Druck in den einzelnen Hubelementen; die entsprechende Ansteuerung erfolgt über die Sitzmotoren. Dieser Regelkreis taktet in einer Frequenz von 5 Hz und lässt die Sitzmotoren so lange verfahren, bis der aktuelle Blasendruck mit der idealen Druckverteilung in diesem Bereich übereinstimmt.

Wie in Kapitel 5.1.4 aufgezeigt, wird dabei ein Druckverteilungswert der Blasenpaare anvisiert, der den Blasenvordruck im Vergleich zur idealen Druckverteilung bereits beinhaltet. Die Sitzmotoren verfahren solange in eine Richtung, bis die Zielwerte erreicht sind. Sobald alle Blasenpaare prozentual übereinstimmen und diese Werte auch über drei Sekunden konstant gehalten werden, wird die Sitzkomferteinstellung automatisch gestoppt. Sobald der Blasenvordruck abgelassen ist, ist der Sitz ideal eingestellt.<sup>15</sup>

<sup>15</sup> Wichtig hierbei zu erwähnen bleibt, dass der Blasendruck einzig und allein der Sensorik dient. Er bewirkt keine Kontur- oder Sitzeinstellung; diese wird ausschließlich von den Sitzmotoren übernommen.

### 5.2.3 Verstellalgorithmus

Wie in Kapitel 5.1.6 erörtert, ist die Verstellreihenfolge ein entscheidendes Kriterium, damit die Einstellung des Sitzes von den Fahrzeuginsassen als homogen angesehen wird. Die Verstellreihenfolge beginnt bei der Sitzlängsverstellung (SLV), dann folgen die Sitzhöhen- (SHV) und Sitzneigungsverstellung (SNV); erst dann werden die Lehnenneigungs- (LNV) und die Lehnenkopfverstellung (LKV) aktiviert.

Der Verstellalgorithmus wird durch die Überprüfung des Blasendrucks gesteuert. Hierbei ist die Reihenfolge der Abfrage der einzelnen Blasenpaarungen von Bedeutung, da die Reaktion – das Ansteuern der Sitzmotoren – von entscheidendem Einfluss ist. Um den oben genannten Einstellvorgang zu erreichen, wurden rückwirkend von der Vorstudie in Kapitel 5.1.5 die Hubelemente herausgegriffen, bei denen sich je nach Sitzmotoransteuerung der deutlichste Druckveränderungseffekt feststellen ließ. Der Ablauf der Überprüfung des Blasendrucks und die daraus resultierende Ansteuerung sind in Abbildung 49 gezeigt.

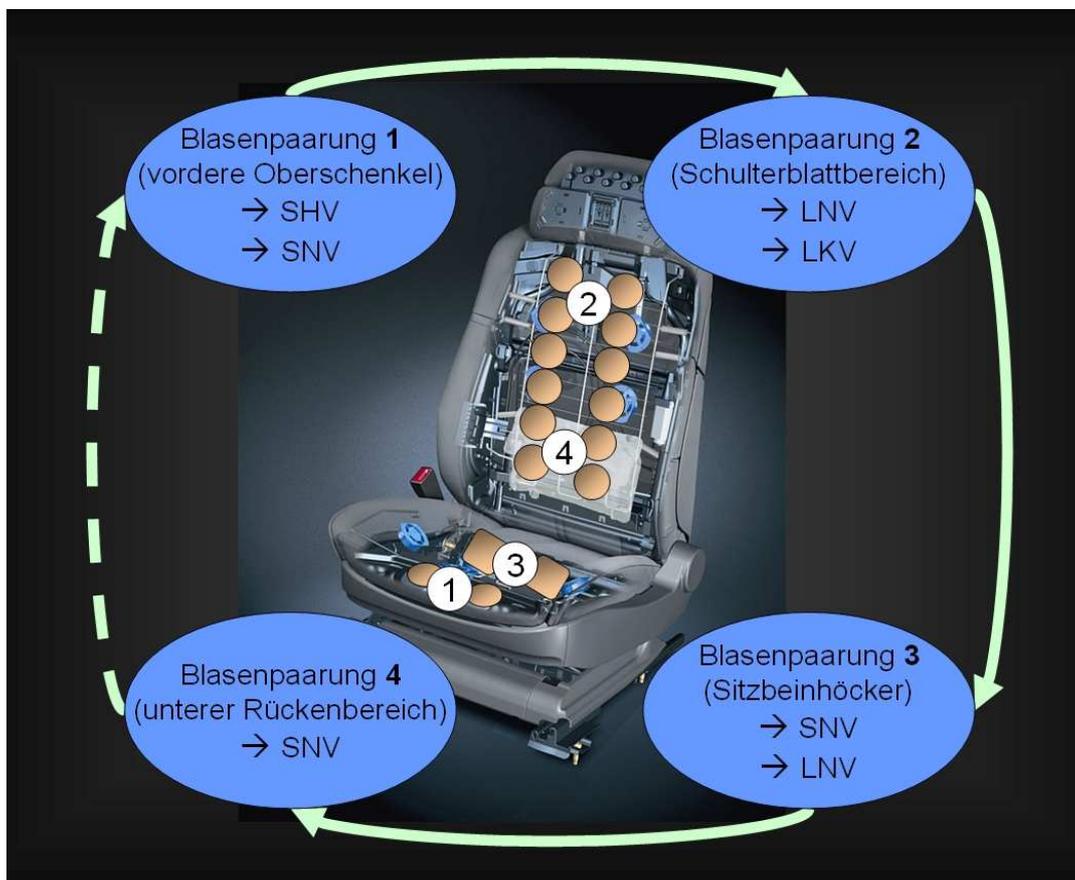


Abbildung 49: Ablauf der Überprüfung des Blasendrucks und daraus resultierende Ansteuerung der Sitzverstellmotoren

Ausgehend von einem harmonischen Verstellvorgang wird zuerst im vorderen Blasenpaar in der Sitztiefenverstellung (hier mit „1“ markiert) der Druck überprüft, so dass gemäß der idealen Sitzeinstellreihenfolge zuerst SHV und SNV verfahren. Im nächsten Schritt wird der Druck in Blasenordnung „2“ gemessen und entsprechend durch LNV und LKV korrigiert. Aufgrund der gegenseitigen Beeinflussung zwischen Sitzfläche und Lehne bedarf es einer Feinjustage. Hierbei wird der Druck bei Blasenpaar „3“, also unter den Sitzbeinhöckern, überprüft; durch SNV und LNV lässt sich hier eine signifikante Druckveränderung erreichen. Zuletzt folgt ein Abgleich der Blasenpaare „4“, bei denen durch SNV der Druck variiert werden kann.

Wurde nach diesen Einstellungsschritten die ideale Druckverteilung noch nicht erreicht, startet das Programm erneut von vorne und beginnt dabei wieder unter den vorderen Oberschenkeln. Ist hingegen in allen Pneumatikblasen der Druck auf die Soll-Vorgabe (vgl. Abbildung 43) mit einer maximalen Abweichung von +/-1% eingestellt und wird länger als drei Sekunden gehalten, wird das Programm gestoppt.

Sogar die Sitzhöhenverstellung lässt sich aufgrund der Druckveränderungen in den Blasenelementen steuern. Dieser Vorgang soll an einem Beispiel aufgezeigt werden: Sitzt ein Mensch von großer Körpergröße in einem zu hoch eingestellten Fahrzeugsitz, liegen seine Beine nicht auf der vorderen Sitzfläche auf. Sie befinden sich vielmehr in überproportional angewinkelter Stellung, so dass kein Druck auf das vordere Sitzkissen ausgeübt wird.

Die automatische Sitzkomfoteinstellung nimmt den Druckwert unter der vorderen Sitzfläche auf und startet den Regelkreis. Der Sitz wird nach unten verfahren. Aufgrund der bauartbedingten mechanischen Kopplung der Sitzhöhenverstellung verfährt diese nicht allein in senkrechter Richtung, sondern in einer leichten Kurvenbahn, so dass auch ein nicht zu vernachlässigender Anteil an Sitzneigung dabei ist. Auf diese Weise wird durch die Kombination von SHV und SNV ein höherer Druck unter den vorderen Oberschenkeln erreicht.

Somit ist die Beinauflage an der Vorderkante des Sitzkissens einer der bestimmenden Faktoren für die Einstellung der Sitzhöhe.

### **5.2.4 Umsetzung der Regelung**

Die Regelung erfolgt über einen Messrechner, der mit der Software DIAdem ausgestattet ist, die eine Datenerfassung, Visualisierung und Weiterverarbeitung von Daten ermöglicht. Mit konfigurierbaren Blöcken lässt sich im Modul DIAdem-DAC ein Schaltbild der Mess-, Steuer- und Regelaufgaben erstellen. Über Leitungen werden die Blöcke eines Schaltplans untereinander verbunden, so dass Datenfluss, Ablaufgeschwindigkeit und Abarbeitungsreihenfolge definiert sind.

Beliebige Teile eines Schaltplans können zu so genannten Unterschaltplänen zusammengefasst werden. Im übergeordneten Schaltplan (vgl. Anhang 1) erscheinen diese wie normale Funktionsblöcke, so dass der Überblick auch bei größeren Applikationen bewahrt wird.

Um mit der automatischen Sitzkomfoteinstellung starten zu können, muss ein Vordruck in den Hubelementen erzeugt werden, was eine Pumpe übernimmt. Sobald die Drucksensoren in einem Blasenpaar den Zieldruck feststellen, wird der entsprechende Ventilblock geschlossen; die Regelung verriegelt ein Ventil nach dem anderen, bis alle Blasenelemente auf den gleichen Vordruck eingestellt sind. Dann wird die Pumpe automatisch abgeschaltet. Nun sind alle Startbedingungen erfüllt.

Ein Funktionsblock der Regelung ist beispielsweise der Unterschaltplan „Relativdrücke“, in welchem aus den absoluten Blasendrücken die prozentuale Verteilung zueinander berechnet wird (vgl. Anhang 1). Ein weiterer bezieht sich auf die „Steuerung“; dieser Unterschaltplan übernimmt aufgrund der Relativdrücke die Ansteuerung der Sitzmotoren.

## 5.2.5 Bedienoberfläche

Für die Visualisierung bietet DIAdem eine modular gestaltbare Oberfläche an, wie beispielsweise in Abbildung 50 zu sehen.

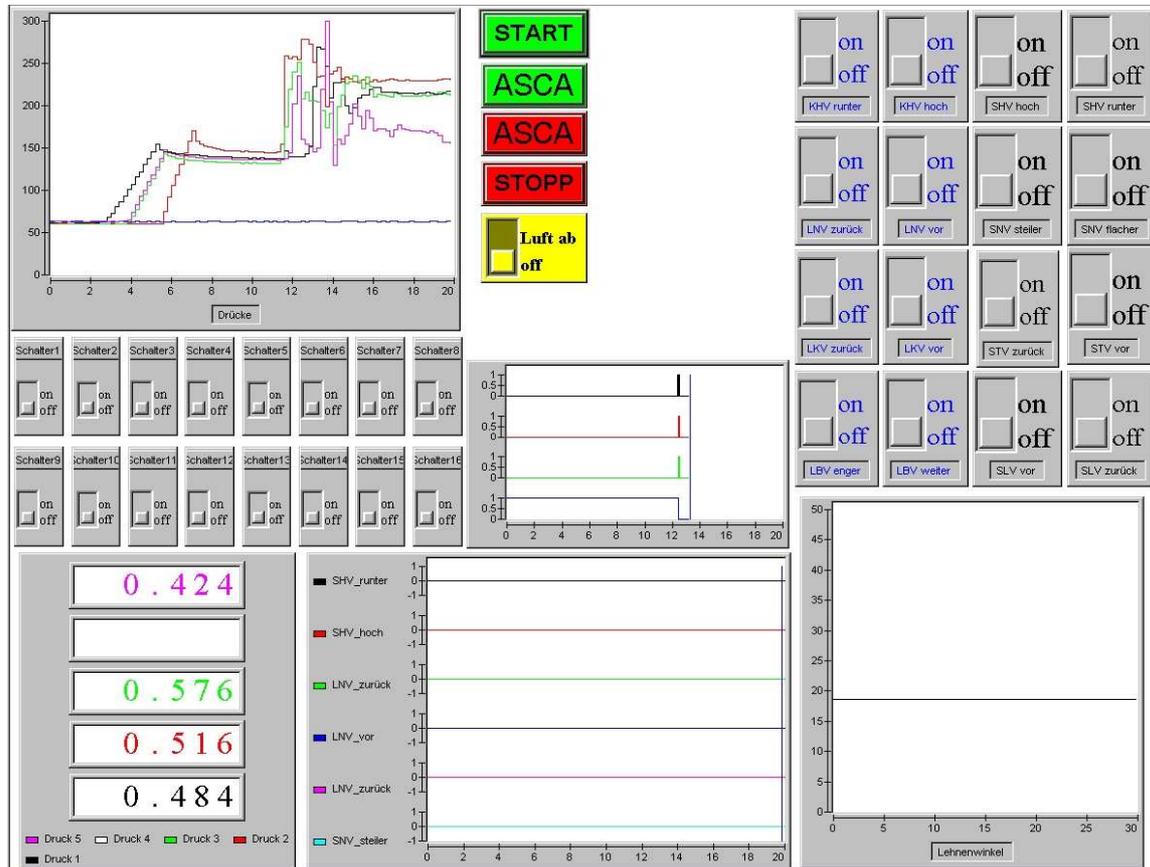


Abbildung 50: Benutzeroberfläche der automatischen Sitzkomferteinstellung

Auf der linken Seite sind alle Parameter hinsichtlich der Blasendrucke eingetragen. Im oberen Fenster ist eine graphische Darstellung der Druckverläufe angeführt. Darunter folgt eine Schalterleiste, mit der die Ventile angesteuert werden können, um die Hubelemente manuell zu be- oder zu entlüften. Weiterhin finden sich dort die prozentualen Blasendrucke, wobei die oberen zwei Zahlenwerte für die prozentuale Lastverteilung in der Lehne stehen, während die unteren beiden die prozentualen Lastwerte in der Sitzfläche angeben. In der Mitte stehen vier Buttons für den Start- und Stoppvorgang der Blasenvordrücke und der automatischen Sitzeinstellung. Zentral darunter folgt ein Fenster, in welchem die Übereinstimmung der IST-Drücke mit den SOLL-Drücken angezeigt wird. Sobald beide übereinstimmen ( $\pm 1\%$ ), wird dies durch einen Ausschlag im Graphen erkennbar. Wird diese prozentuale Druckverteilung länger als drei Sekunden konstant gehalten, stoppt die automatische Sitzkomferteinstellung, was am Abfall des blauen Graphen ablesbar wird. Im untersten mittleren Fenster wird die

Aktivierung der Sitzmotoren angezeigt, rechts daneben der Sitzlehnenneigungswinkel. Die Schaltblöcke im oberen rechten Eck der Benutzeroberfläche ermöglichen eine direkte manuelle Bedienung aller möglichen Sitzmotoren des Multifunktionssitzes, die in der Regelung implementiert sind. Die einzigen Tasten, die zur Aktivierung der automatischen Sitzkomferteinstellung getätigt werden müssen, sind der „Start“-Button und nach automatischer Justierung des Sitzes der Knopf zum Ablassen den Blasendrucks. Alle weiteren Funktionen laufen selbständig ab.

### **5.3 Statische Akzeptanzuntersuchung der automatischen Sitzkomferteinstellung**

Die so konstruierte Sitzkomferteinstellung wurde in mehreren Probandenstudien hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit getestet. Die Akzeptanzuntersuchungen gliedern sich in zwei Abschnitte: einen statischen und einen dynamischen Teil.

#### **5.3.1 Versuchsdesign**

Um eine umfassende Bewertung der automatischen Sitzkomferteinstellung zu erhalten, wurde in einem ersten Schritt eine Probandenstudie im statischen Zustand an 50 Probanden durchgeführt.

##### **5.3.1.1 Versuchsaufbau**

Die Akzeptanzuntersuchungen der idealen Sitzkomferteinstellung wurden am Realfahrzeug durchgeführt. Hierzu wurde der automatisierte Sitz auf der Fahrerseite eines 5er-BMWs (E60, 530i) eingebaut. Die entscheidende Veränderung der Sitzbedienung ist in Abbildung 51 auf dem linken Bild zu erkennen: Am Fahrzeugsitz selbst gab es nur noch einen Schalter für die Sitzlängsverstellung (schwarzer Schalter). Alle anderen Verstelleigenschaften des Multifunktionssitzes blieben zwar nach wie vor erhalten, sind aber in der Automatisierung implementiert (vorerst: SHV, SNV, LNV, LKV).

Auf der Mittelarmlehne im Fond wurde die Relaisbox platziert, während der Messrechner, die IO-Karten, SIM-VIN, SIM-Master und die Spannungswandler im Kofferraum auf einem Versuchsträgereinlegeboden aus Holz fest verbaut waren. Zur Überwachung des Sitzeinstellprogramms wurde ein Arbeitsplatz auf der Beifahrerseite im Fond eingerichtet.



Abbildung 51: Einbau der automatischen Sitzkomforteinstellung ins Versuchsfahrzeug (5er BMW - E60)

### 5.3.1.2 Erfassung der subjektiven Daten

Für die Abfrage der subjektiven Daten in Form eines Interviews war ein Fragebogen erstellt worden (s. Anhang 2). Neben Körpergröße und -gewicht wurde nach einer Gesamtbewertung des Systems der automatischen Sitzkomforteinstellung gefragt. Diese war anhand der BI-Skala (vgl. Abbildung 52) zu beurteilen, einem BMW-internen Bewertungsindex (BI). In der Produktentwicklung wird von der BMW Group ein BI-Wert von 8 angestrebt, da hier die Erwartungen des Kunden zu 100% erfüllt sind. Die Skala geht aber noch darüber hinaus, falls die Erwartungshaltung des Fahrers sogar übertroffen wird.

BI	Bedeutung für den Kunden
1	Fehler bedeutet <b>Sicherheitsrisiko</b> bzw. zulassungsrelevantes Thema
2	Es wird mit <b>rechtlichen Schritten</b> oder Veröffentlichung gedroht
3	Die <b>Werkstatt</b> wird <b>sofort</b> aufgesucht
4	Fehler führt zu einem <b>außerplanmäßigen Werkstattaufenthalt</b>
5	Fehler wird <b>beim nächsten Werkstattaufenthalt behoben</b>
6	Kunde ist <b>auf Fehler sensibilisiert</b>
7	<b>Geringe Abweichungen</b> vom Sollstand
8	Erwartungen an das Fahrzeug <b>zu 100% erfüllt</b>
9	Technische Lösungen <b>überzeugen</b>
10	Technische Lösungen <b>überraschen positiv</b>

Abbildung 52: Bewertungsindex: Im Produktaudit wird jedem Fehler ein Bewertungsindex (BI) zugeordnet. Der BI entspricht der Schwere des Fehlers, wie in unten stehender Tabelle angegeben. Im Bereich des Sitzkomforts werden BI-Skalen von BI 3 – BI 10 eingesetzt, da ein BI 1 oder BI 2 in diesem Fall nicht auftreten kann.

Nachdem die Einstellung des Sitzes mit der automatischen Sitzkomfosteinstellung erfolgt war, sollten die Probanden angeben, wie angenehm sie sitzen. Es folgten Fragen zur Zufriedenheit, zum Nutzen und zum Innovationsgrad. Zudem wurde erfragt, welches Fahrtstreckenprofil sich am besten für die gemäß der idealen Druckverteilung erzeugten Sitzposition eignen würde. Ein weiterer Punkt der Befragung bestand darin, wie eine überzeugende Implementierung eines solchen Systems im Fahrzeug aussehen könnte und ob dadurch ein Wegfall des herkömmlichen Sitzverstellungsschalters möglich wäre.

### 5.3.1.3 Versuchspersonen

Das Testkollektiv bestand aus 50 Probanden (12 Frauen und 38 Männern). Die durchschnittliche Größe der weiblichen Versuchspersonen lag bei 170 cm, die der männlichen bei 181 cm. Die Verteilung der Körpergrößen ist in Abbildung 53 dargestellt.

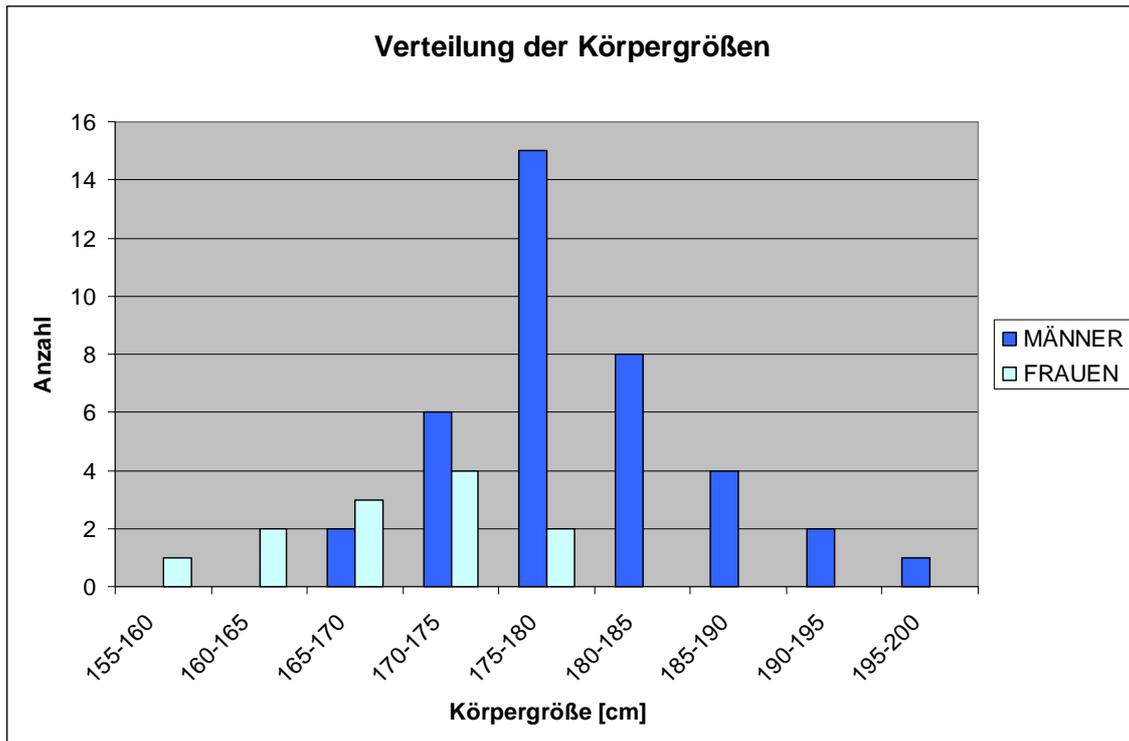


Abbildung 53: Körpergrößen der Versuchspersonen für die Versuche zur Validierung der automatischen Sitzkomferteinstellung

Das Gewicht der Personen betrug im Mittel 75 kg. Das Alter der teilnehmenden Versuchspersonen lag zum Zeitpunkt der Untersuchung zwischen 22 und 47 Jahren.<sup>16</sup>

### 5.3.2 Versuchsdurchführung

Nachdem sich die Hubelemente mit dem nötigen Messdruck befüllt hatten, nahmen die Probanden auf dem Fahrzeugsitz Platz. Daraufhin stellten sie sich die Sitzlängsverstellung gemäß ihrer Beinlänge ein. Über Mausklick am Messrechner wurde die automatische Sitzkomferteinstellung gestartet. Sobald die ideale Sitzposition erreicht war, stoppte das System und der Grunddruck in den Hubelementen wurde abgelassen. Dies führte zu einem leichten „Einsinken“ der

<sup>16</sup> An dieser Versuchsreihe nahmen ausschließlich Mitarbeiter der BMW AG teil.

Probanden in den Sitz, was durch ein Nachregeln mit der Sitzlängsverstellung ausgeglichen werden konnte.

Wenn die automatische Sitzeinstellung erfolgt war, wurden die Probanden gebeten, einen Fragebogen auszufüllen, wie im Anhang 2 aufgeführt.

Zum Schluss der Untersuchung wurde zusätzlich eine Druckmessmatte auf den ideal eingestellten Sitz gelegt, damit eine Validierung der Ergebnisse durch den Abgleich zwischen der automatisch generierten und der als ideal empfundenen Druckverteilung vorgenommen werden konnte.

### 5.3.3 Ergebnisse

Gemäß der BI-Skala (vgl. Abbildung 52) wurde die Sitzhaltung, welche über die automatische Sitzkomferteinstellung erzielt wurde, im Mittel mit 7,88 bewertet (Standardabweichung: 0,84). Diese Wertung gibt an, dass die Erwartungen an das Produkt fast zu 100% erfüllt sind.

Klarer lässt sich dieser Wert an den folgenden Bewertungen im Fragebogen festmachen. Die konkrete Befragung, ob die Versuchspersonen die automatisch generierte Sitzposition als angenehm empfinden, ergab eindeutig, dass 94% der Probanden diese im stationären Zustand als positiv wahrnahmen (vgl. Abbildung 54). Gerade einmal drei der 50 Probanden gaben an, nicht angenehm zu sitzen.

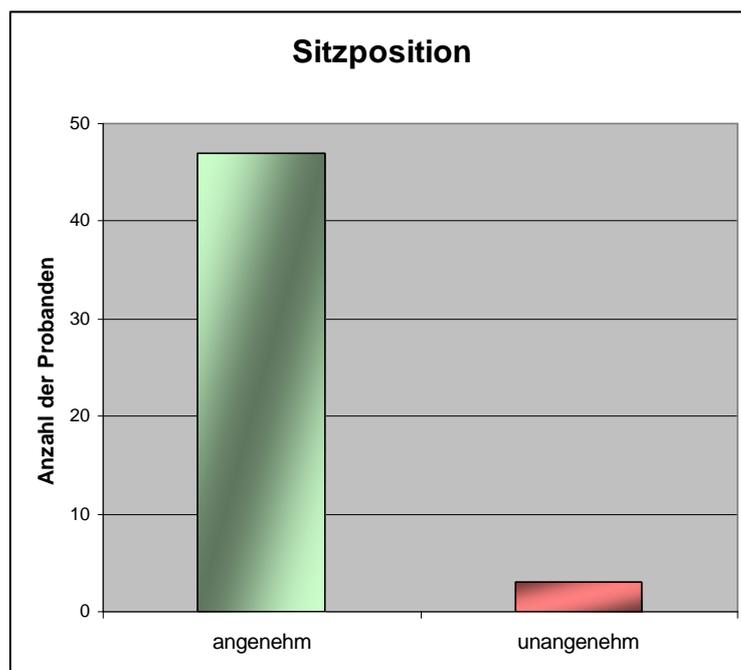


Abbildung 54: Bewertung der automatisch generierten Sitzposition

Trotz ihrer quantitativ nur geringen Verbreitung wurde den Gründen für die Unzufriedenheit mit der automatischen Sitzeinstellung nachgegangen. Um herauszufinden, ob das Antwortverhalten dieser drei Probanden im Zusammenhang mit ihren anthropometrischen Werten steht, wurden diese gezielt analysiert. Für den empfundenen Mangel bezüglich des Einstellungskomforts konnte aber kein signifikanter Zusammenhang mit Körpergröße, Gewicht oder Geschlecht gefunden werden. Die Anthropometrie der Insassen ist folglich nicht der ausschlaggebende Faktor, sondern ihre subjektiven Vorlieben.

Eine Einzelaufstellung der Mittelwerte der Aussagen der 50 Versuchspersonen für diese automatische Sitzkomferteinstellung ist in Abbildung 55 dargestellt. Alle drei Kategorien wurden dabei mit einer überdurchschnittlich positiven Wertung beurteilt. Dabei wurde die „Zufriedenheit“ mit der automatischen Sitzkomferteinstellung im Mittel positiv mit 1,86 (Standardabweichung: 0,96) bewertet, der „Nutzen“ mit 1,54 (Standardabweichung: 1,22). Den höchsten Wert erzielte der „Innovationsgrad“ mit 2,27 (Standardabweichung: 0,79).

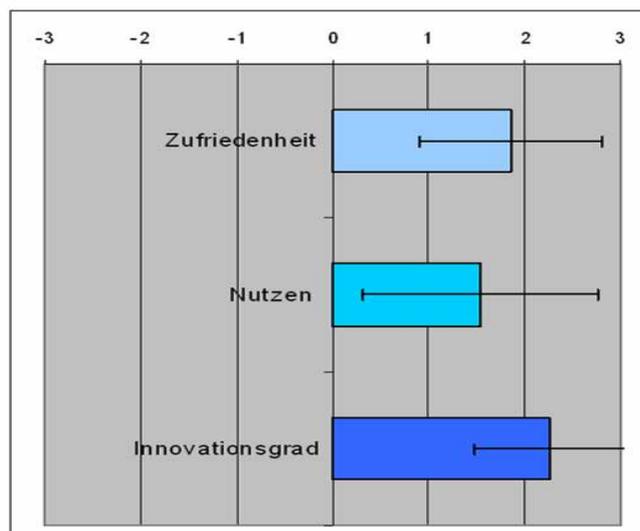


Abbildung 55: Bewertung der automatisch Sitzkomferteinstellung

Zudem wurde herausgefunden, welches Fahrtstreckenprofil sich aus Sicht der Probanden am besten für die gemäß der idealen Druckverteilung erzeugte Sitzposition eignet. 42% der Probanden gaben an, dass diese Sitzposition für sie generell ideal wäre und sie sich den Sitz exakt so einstellen würden. Weitere 40% der Versuchspersonen würden sich diese Sitzposition eher für sportliche Fahrten einstellen und sie nur für kürzere Strecken beibehalten. Die restlichen 18% der

Probanden würden diese Sitzposition für Langstreckenfahrten einnehmen, da sie die Körperhaltung als angenehm empfinden und sie als ideal geeignet für entspannte Freizeitfahrten (Cruisen) ansehen.

Ein weiterer Punkt der Untersuchung bestand in der Vorgehensweise bei der Systemaktivierung. Ein generell automatisierter Startvorgang der Sitzkomfoteinstellung wurde von 64% der Versuchspersonen abgelehnt. Darüber hinaus gaben 48 Probanden an, dass sie sich durch das System nicht bevormunden lassen möchten und noch die Möglichkeit haben wollen, selbst Korrekturen an der Sitzeinstellung vorzunehmen. 36 Versuchspersonen würden dies mit Hilfe eines herkömmlichen Sitzschalters tun, während 12 dies lieber über I-Drive ausführen würden.

Diese Aussagen lassen darauf schließen, dass die Mehrheit der Fahrer die Zusatzfunktion einer automatischen Sitzkomfoteinstellung sehr gerne annimmt, sich aber keiner Freiheiten berauben lassen möchte und daher am konventionellen, ursprünglichen Sitzverstellschalter als Zusatzfunktion festhält.

Die Einstellzeit wurde von 56% der Probanden als noch etwas zu lange angesehen. Sie spielt sich in einem Zeitraum zwischen fünf und sechzig Sekunden ab, je nachdem, wie weit die ursprüngliche Sitzeinstellung von der Idealeinstellung entfernt ist. Im Durchschnitt wurde bei der automatischen Sitzkomfoteinstellung eine Einstellzeit von 35 sec registriert. Zudem wird die Sitzeinstellzeit reduziert, allein schon deswegen, weil mehrere Sitzverstellmotoren gleichzeitig verfahren. Im Vergleich zu einer Eigenvorgabe, bei der Einstellzeiten von bis zu 3 min aufgezeichnet wurden (vgl. Reum, 2004), ist eine maximale Einstellzeit des Systems von 1 min akzeptabel, da hierbei die Einstellmöglichkeiten des Sitzes ideal ausgenutzt werden und somit eine optimale physiologische Sitzposition geschaffen wird.

Insgesamt ist für die statische Probandenstudie festzustellen, dass die automatische Sitzkomfoteinstellung auf ein äußerst positives Feedback gestoßen ist. Gerade Probanden, die im Vorfeld Beschwerden mit der Wirbelsäule haben, sprechen sich ausdrücklich für ein solches System aus. Sie sind für ein physiologisch richtiges Sitzen sehr sensibilisiert und haben ASCA eine perfekte Funktionsweise bescheinigt.

### **5.3.4 Abgleich der automatisch erzeugten Druckverteilungen zur idealen Druckverteilung**

Im Folgenden geht es um die Frage, ob die automatisch erzeugten Druckverteilungen den Zielvorgaben der idealen Druckverteilung (vgl. Abbildung 13) entsprechen. In der oben angeführten Probandenbefragung wurde die automatisch generierte Druckverteilung von 42 Personen mit dem Druckmessmattensystem (Tekscan) aufgenommen. Die Körperanlagefläche wurde gemäß der Body Map aufgegliedert, um einen Mittelwert für jeden Körperbereich über alle Versuchspersonen zu erstellen. Eine Gegenüberstellung der idealen Druckverteilung (auf der linken Seite) mit der automatisch generierten Druckverteilung (auf der rechten Seite) ist in Abbildung 56 aufgeführt. Im Bereich der Schulterblätter ergibt sich bei der automatisch erzeugten Druckverteilung ein Mittelwert von 16% (Standardabweichung: 3%), während hier die ideale Druckverteilung einen Idealwert von 18% (Standardabweichung: 4%) angibt. Nach einem t-Test können beide Ergebnisse aber nicht als unterschiedlich angesehen werden. Dies gilt gleichermaßen für die Seitenwangen, den mittleren und unteren Rückenbereich, den seitlichen Beckenkamm und das Steißbein.

Für die Sitzfläche zeigt sich folgendes Bild: Im Bereich der Sitzbeinhöckern wird durch das System ein Mittelwert von 54% mit einer Standardabweichung von 4% erreicht. Verglichen mit den Zielvorgaben der idealen Druckverteilung mit einem Mittelwert von 56% und eine Standardabweichung von 3% kann hier eine signifikante Übereinstimmung festgestellt werden. Noch besser trifft dies für den mittleren und vorderen Oberschenkelbereich zu. Automatisch generierte Werte von 21% und 6%, die im Vergleich zu 20% und 6% stehen, darf man als nahezu perfekte Kongruenz ansehen.

## Entwicklung der automatischen Sitzkomferteinstellung

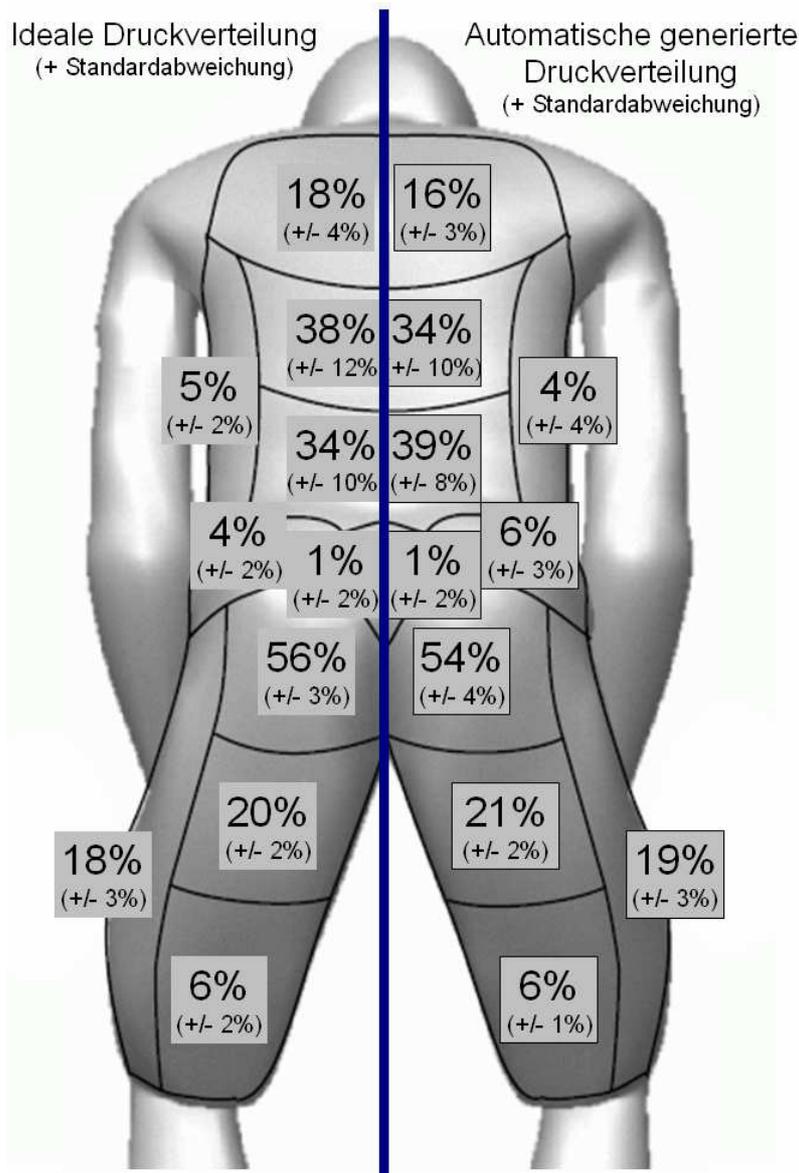


Abbildung 56: Gegenüberstellung der durch die automatisch Sitzkomferteinstellung generierten Druckverteilung (anhand von 42 Probanden) mit der idealen Druckverteilung

Es zeigt sich also deutlich, dass gerade für die Sitzfläche die Werte sehr gut übereinstimmen. Die Lastverteilungswerte liegen bei der Rückenlehne etwas weiter auseinander, und auch die Standardabweichung ist höher. Insgesamt betrachtet lässt sich aber über alle Körperbereiche ein eindeutiger Zusammenhang feststellen. Der in Kapitel 5.1.4 beschriebene Übertrag der idealen Druckverteilung der Sitzoberfläche auf die unter dem Sitzschaum liegenden Pneumatikblasen, die in diesem Fall als Drucksensoren fungieren, konnte also einwandfrei umgesetzt werden. Somit ist die Funktionstüchtigkeit der automatischen Sitzkomferteinstellung hinsichtlich der Erreichung der idealen Druckverteilung nachgewiesen.

### 5.4 Eruierungsuntersuchung der automatischen Sitzkomferteinstellung

Zusätzlich zur statischen Untersuchung wurden auch im Straßenverkehr an acht Probanden erste Eruierungsuntersuchungen der automatischen Sitzkomferteinstellungen durchgeführt. Insgesamt wurde bei dieser Untersuchung die automatische Sitzkomferteinstellung für knapp 2.000 km im Straßenverkehr erprobt. Hierdurch sollte beleuchtet werden, ob die generierte ideale Sitzeinstellung Gültigkeit für den Alltagsgebrauch besitzt und auch für längere Zeit (2-3 h) angenehm bleibt.

#### 5.4.1 Versuchsdesign

##### 5.4.1.1 Versuchsfahrzeug

Um eine aussagekräftige Beurteilung zu erhalten, sollten die Versuche in einem Fahrzeug auf der Straße unter realistischen Bedingungen stattfinden. Als Fahrzeug wurde ein 5er-BMW gewählt (vgl. Abbildung 57). Er eignet sich hervorragend, da hier wegen großer Innenraumfreiheit eine recht aufrechte, komfortable Sitzposition eingenommen werden kann. Diese Fahrzeugklasse lässt zudem eine der ausgewogensten Sitzpositionen zu – weder eine Liegeposition gemäß der Roadster-Klasse noch eine aufrechte Sitzposition gemäß der Offroad-Klasse.



Abbildung 57: Versuchsfahrzeug (5er-BMW, E60, 530i, Automatik) (Quelle: Mediapool-BMW, Stand: April 2008)

##### 5.4.1.2 Erfassung der subjektiven Daten

Zur Erfassung der subjektiven Daten bei der Untersuchung der automatischen Sitzkomferteinstellung während des Fahrbetriebs über einen längeren Zeitraum diente ein Fragebogen (vgl. Anhang 2). Um einen Eindruck über den Gesamtverlauf zu erhalten, wurden die Probanden gebeten, neben der Auflistung von Fahrstrecke und Fahrzeit jeweils nach einer halben Stunde Fahrt ihr

Gesamtdiskomfortempfinden anhand der CP50-Skala anzugeben. Zudem wurde danach gefragt, ob die automatisch generierte Sitzposition auch über die gesamte Fahrstrecke als angenehm empfunden wurde. An letzter Stelle stand die Frage, nach welcher Zeit der Proband eine eigene Verstellung des Sitzes hätte vornehmen wollen.

### 5.4.1.3 Versuchspersonen

Aufgrund der zeit- und kostenintensiven Versuchsdurchführung beschränkte man sich hier auf acht Versuchspersonen. Diese Probandengruppe deckt jedoch ein breites Spektrum ab – vom 10. Perzentil Frau bis zum 95. Perzentil Mann. Auch das klassische Maß des 50. Perzentils Mann ist zweimal vertreten.

Eine genaue Aufstellung der Körpergröße der Versuchspersonen ist in Abbildung 58 aufgeführt.

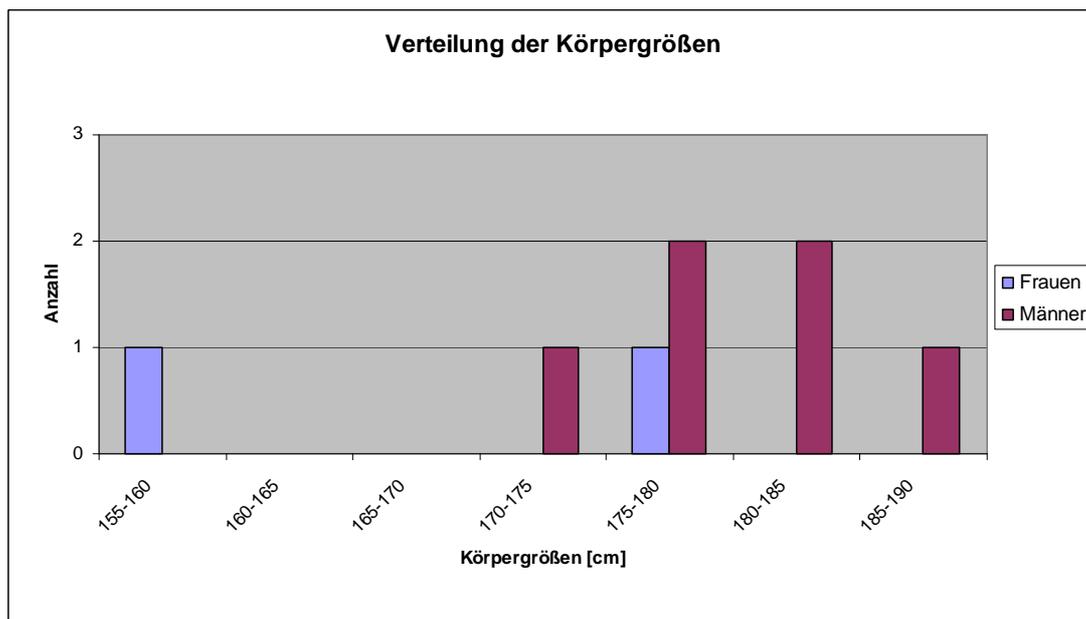


Abbildung 58: Körpergrößen der Versuchspersonen für die Versuche zur Validierung der automatischen Sitzkomferteinstellung

Das Gewicht der Personen betrug im Mittel 73 kg. Das Alter der teilnehmenden Versuchspersonen lag zum Zeitpunkt der Untersuchung zwischen 27 und 40 Jahren.<sup>17</sup>

<sup>17</sup> Auch an dieser Versuchsreihe nahmen ausschließlich Mitarbeiter aus dem Bereich der Sitzkomfortabteilung der BMW AG teil.

**5.4.2 Versuchsdurchführung**

Zu Beginn der Versuchsfahrt wurde mit Hilfe des Versuchsleiters das System der automatischen Sitzkomferteinstellung gestartet. Nach erfolgter idealer Sitzpositionierung wurde das System heruntergefahren, so dass keine nachträgliche Verstellung des Sitzes möglich war. Um eine aussagekräftige Beurteilung zu erhalten, mussten die Probanden mindestens zwei Stunden ohne Zwischenstopp im Versuchsfahrzeug unterwegs sein (vgl. Estermann, 1999 und Gyi & Porter, 1999). Die geplante Fahrzeit sollte zwei Stunden und 200 km nicht unterschreiten, wobei die Wahl der Strecke dem Fahrer freigestellt wurde. Zu Beginn und zu jeder weiteren halben Stunde waren die Probanden angehalten, einen Diskomfortwert bezüglich des Gesamtdiskomfortempfindens abzugeben (vgl. Anhang 2).

**5.4.3 Ergebnisse**

Für den dynamischen Teil der Untersuchung der automatischen Sitzkomferteinstellung waren gemäß der CP50-Skala Wertungen von „sehr geringer Diskomfort“ bis „sehr starker Diskomfort“ möglich (vgl. Abbildung 59).

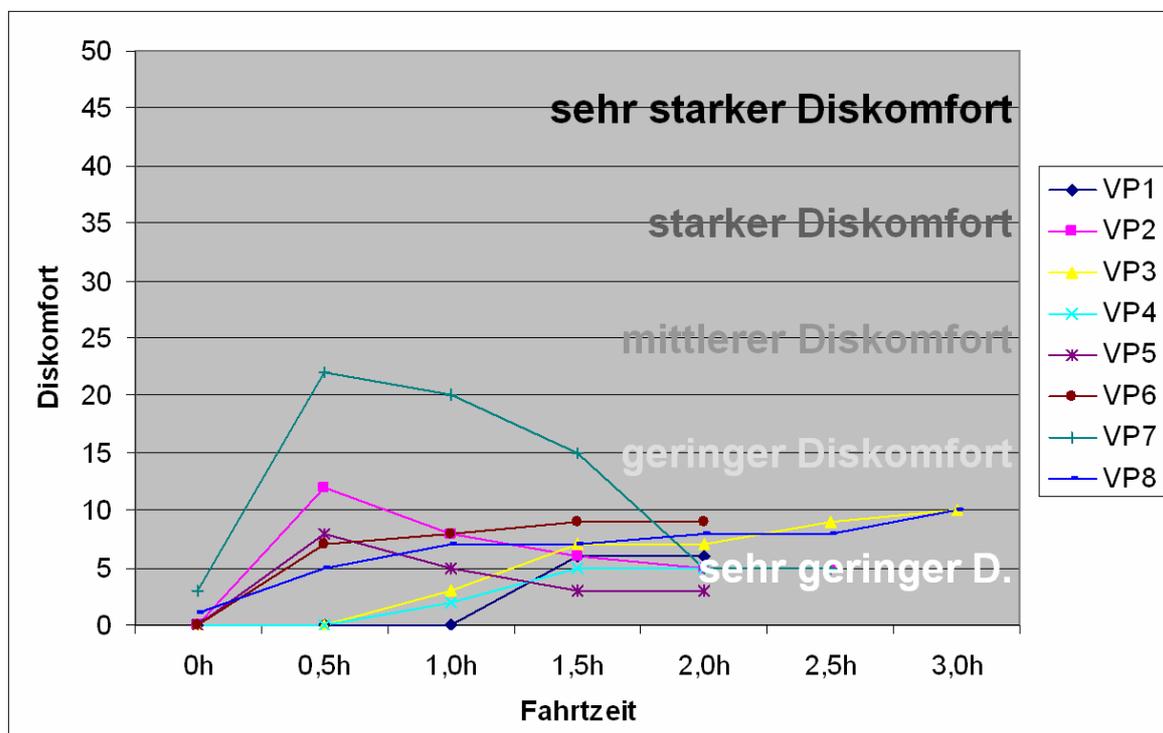


Abbildung 59: Ergebnisse der Langzeituntersuchung im Fahrbetrieb

Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass der Großteil der Bewertungen zwischen 0 und 10 auf der Diskomfortskala liegt, welche den Bereich von „kein“ und „sehr geringer Diskomfort“ aufspannen. Sechs der acht Probanden empfanden zu Beginn der Fahrt nach der automatischen Sitzkomfoteinstellung keinerlei Sitzdiskomfort. Nur zwei Versuchspersonen gaben einen minimalen Gesamtdiskomfort an (VP2 & VP7). Nach zwei- bis dreistündiger Fahrt mit der automatischen Sitzkomfoteinstellung lagen alle Bewertungen im Bereich „sehr geringer Diskomfort“.

Prinzipiell lassen sich in dieser Eruiierungsuntersuchung zwei Tendenzen feststellen:

Bei fünf der Probanden stieg der Diskomfort minimal über die Zeit an (vgl. Esnouf, 1998); er wurde aber nie höher als „sehr geringer Diskomfort“ eingestuft (vgl. Fernandez & Poonawala, 1998). Insbesondere Versuchspersonen, die eine Vorgeschichte in Hinblick auf Rückenleiden mitbrachten und bezüglich der Sitzeinstellung sensibilisiert waren, empfanden die automatische Sitzeinstellung als äußerst funktionsgenau. Diese Probanden berichteten, dass die automatisch generierte Sitzposition exakt der entspreche, die sie sich selbst als Rücken schonend einstellen würden.

Bei drei der Versuchspersonen (VP2/VP5/VP7) verstärkte sich das Diskomfortempfinden zwischen dem Start der Fahrt und der ersten Wertung nach einer halben Stunde deutlich; es fiel danach aber wieder ab und mündete spätestens nach zwei Stunden Fahrt in eine Bewertung von „sehr geringem Diskomfort“.

Ein möglicher Grund für das vorübergehende Diskomfortempfinden kann sein, dass in den ersten 10-30 min der Wunsch entsteht, sich den Sitz gewohnheitsbedingt nachzustellen (vgl. Beermann, 2003), da sich in diesem Zeitraum bekanntlich die Sitzhaltung leicht verändert und dadurch ein erstes Unwohlsein aufkommen kann. Objektiv ist die automatisch generierte Sitzeinstellung aber nach wie vor ideal, solange man sich wieder in seine Ausgangssitzposition begibt. Da der Wunsch nach einer Nachstellung (vgl. Reum 2004) ohne Ein- und Ausstieg aus dem Fahrzeug in diesem Prototypenstand bislang nicht möglich ist, wird dieses Unwohlsein aufgrund der fest eingestellten Sitzkonfiguration überhöht wahrgenommen. Dies beruht darauf, dass eine Eigeneinstellung nicht durchführbar ist, was subjektiv einer Bevormundung gleichkommt. Nach einiger Zeit (ab 30 min) nimmt das Diskomfortempfinden aber deutlich ab, da hier die Langzeitkomfortwirkung des Druckverteilungsmodells nach Mergl (2006) zum Greifen kommt. Eine Sitzposition, die in den ersten

Minuten beim Einsitzen gemäß der idealen Druckverteilung eingestellt wird, bleibt auch noch nach dreistündiger Fahrdauer komfortabel.

Eine weitere mögliche Ursache, die von einer Probandin angeführt wurde, ist eine leicht schiefe Sitzposition, die aufgrund eines Versatzes zwischen Sitz und Lenkrad besteht und als geringer Diskomfort wahrgenommen wurde.

Festzuhalten bleibt, dass in keinem der aufgezeigten Fälle eine Diskomforterhöhung über die Zeit tatsächlich durch eine Fehleinstellung entstanden ist. Der Prototyp der automatischen Sitzeinstellung hat also den ersten Praxistest bestanden.

### **6 Entwicklungsperspektiven**

Im Folgenden sollen Möglichkeiten und Potentiale für die Weiterentwicklung der automatischen Sitzkomforteinstellung aufgezeigt werden.

#### **6.1 Ausblick für serientaugliche Anwendung**

Damit der entwickelte Prototyp in Serie gehen kann, stellen sich noch verschiedene Aufgaben.

##### **6.1.1 Miniaturisierung**

Der im Prototyp verwendete Aufbau einer automatischen Sitzkomforteinstellung (siehe Kapitel 6.2) ist in dieser Form nicht für eine serientaugliche Anwendung nutzbar, da er zu viel Platz im Fahrzeuginnenraum ausfüllt. Daher besteht der erste Schritt für einen serientauglichen Einsatz in einer Miniaturisierung der Mess- und Regelelektronik. Der jetzige Aufbau (vgl. Abbildung 51) war ein erster Lösungsansatz, um eine direkte Ansteuerung über das Sitzsteuergerät zu umgehen. Zukünftig könnten die Relaisbox, der Messrechner mit Bildschirm, die IO-Karten und die Spannungswandler verschwinden, wenn direkt auf die im Serienfahrzeug vorhandenen Rechner und Bedienoberflächen zugegriffen würde. Idealerweise bietet sich hier eine Implementierung dieses Regelalgorithmus zur automatischen Sitzkomforteinstellung ins Sitzsteuergerät an. Eine Ansteuerung, die über eine Verknüpfung zum I-Drive ermöglicht werden sollte, würde einen erheblichen Schritt zur Miniaturisierung des Systems beitragen.

##### **6.1.2 Gestaltungsregeln**

Für eine serientaugliche Anwendung im Fahrzeug ist es außerdem wichtig, auf einige grundlegende Gestaltungsregeln zu achten.

Aufgrund der Ergebnisse aus den Fragebögen (vgl. Anhang 2) muss der herkömmliche Sitzverstellungsschalter bestehen bleiben. Ein Wegfall würde zu Irritationen und gleichsam zu einer Bevormundung der Insassen führen, was sich zugleich in einer unterbewussten Komforteinbuße widerspiegeln würde.

Ein weiterer entscheidender Faktor, der sich bei den Befragungen ergeben hat, ist, dass eine Mehrheit der Probanden keine automatische Aktivierung wünscht, sondern das System bewusst selbst starten will.

Dies hat vermutlich zwei Gründe: Zum einen möchte der Fahrer immer Herr über das Geschehen sein und die Einstellung des Sitzes nicht gänzlich einer

Fremdsteuerung überlassen. Zum anderen stellt sich die Frage, wozu bei jedem Einsitzen von Neuem eine automatische Einstellung vorgenommen werden sollte, da die ergonomischen Parameter des Fahrers doch konstant sind. Nur wenn ein anderer Fahrer auf dem Fahrer- oder Beifahrersitz Platz nimmt, ist eine erneute Anpassung sinnvoll.

Diese Gestaltungsregeln könnten für das Serienmodell ohne Schwierigkeiten berücksichtigt werden.

Konkret wäre folgender Ablauf beim Einstellvorgang denkbar (vgl. Abbildung 60): Der Fahrer nimmt im Fahrzeug Platz. In den ersten Sekunden erscheint auf dem zentralen Bildschirm automatisch eine Meldung: „Wünschen Sie eine automatische Sitzkomforteinstellung?“ Wenn dies durch Drücken des I-Drive-Buttons bestätigt wird, stellt sich der Sitz individuell ideal ein. Wird der Knopf innerhalb von zehn Sekunden nicht gedrückt, verschwindet die Nachricht wieder vom Monitor; es wird keine Funktion ausgeführt.

Eine Alternative wäre, dass die automatische Sitzkomforteinstellung in der I-Drive-Steuerung unter dem Oberbegriff „Sitz“ hinterlegt ist. Sie ließe sich dann durch gezieltes Anwählen dieser Funktion starten.



Abbildung 60: Mögliche Umsetzung in der Bedienoberfläche des I-Drives

Da extreme Sitzpositionen, die nicht unbedingt komforttauglich, sondern stark durch individuelle Vorlieben bedingt sind, muss ein Sitzverstellungsschalter erhalten bleiben. So ist z.B. eine Fahrposition, bei der der Fahrer sehr dicht gedrängt hinter dem Lenkrad sitzt, um auch bei extremen Lenkbewegungen den Schulterkontakt zur Lehne nicht zu verlieren, in der automatischen Sitzeinstellung nicht vorgesehen, da diese in erster Linie auf den Komfortaspekt, auch für längere Fahrten, abzielt. Auch eine Schlafposition mit völlig flach gestellter Rückenlehne, wie es beispielsweise für eine Rast an einer Autobahnraststätte günstig ist, muss dem Insassen ermöglicht werden.

### **6.1.3 Weitere Ausbaustufen**

Ausgehend von den beschriebenen Erfolgen könnte man in einer zukünftigen Ausbaustufe noch mehr Verstellungsmöglichkeiten in die Regelung implementieren und dadurch automatisieren, z.B. eine Lehnenbreiten- oder Sitztiefenverstellung. Auch eine Kopfstützentiefenverstellung könnte, mit einem pneumatischen System ausgestattet, automatisiert werden. Eine noch etwas weiter gehende Vision würde eine optische Erkennung der Insassen ermöglichen und könnte so gezielt die Sitzlängsverstellung automatisch ansteuern. Somit könnte eine komplette Sitzautomatisierung erzielt werden.

Ein weiterer Ansatzpunkt, der sich aus den Versuchen mit dem Realaufbau gezeigt hat, ist die Konzeptidee, den Sitz durch Druckbe- oder -entlastung zu steuern. So könnte beispielsweise durch Abstemmen gegen das Lenkrad der Druck in der Rückenlehne erhöht werden, so dass diese nach hinten wegfahren würde. Dieser Vorgang funktioniert ebenso umgekehrt. Eine solche Funktion könnte in Zukunft einen Sitzverstellungsschalter überflüssig machen.

Welche Weiterentwicklungen am ASCA vorgenommen werden, ist letztlich wohl ganz wesentlich vom Kundenstamm des Fahrzeugherstellers abhängig. Der entwickelte Prototyp stellt aber in jedem Fall ein nach vielen Seiten ausbaufähiges System dar.

### 6.2 Übertragbarkeit von Fahrer- auf Beifahrerseite

Eine entscheidende Frage stellt sich im Hinblick auf die Übertragbarkeit der idealen Druckverteilung auf weitere Sitzplätze im Fahrzeug, speziell den Beifahrerplatz.

Ein entscheidender Unterschied zwischen den Körperhaltungen auf dem Fahrer- und auf dem Beifahrersitz besteht darin, dass die Fahrerhaltung bedingt durch die feste Position der Hände am Lenkrad und der Füße auf der Pedalerie eine Zwangshaltung ist, während auf der Beifahrerseite eine zwanglosere Körperhaltung eingenommen werden kann. Dadurch, dass der Beifahrer seine Hände und Arme nicht über das Lenkrad abstützen kann, wird außerdem weniger Last in den Schulterblattbereich des oberen Rückens abgeleitet.

Es bleibt also die Untersuchungsfrage bestehen, ob eine automatische Beifahrersitzkomforteinstellung anders ausgeführt sein muss als die Fahrerkomforteinstellung und ob ein Beifahrersitz anders genutzt wird als der Fahrersitz.

#### 6.2.1 *Beifahrerkörperhaltungen nach Zhang*

Welche Körperhaltungen auf der Beifahrerseite eingenommen werden, überprüfte Zhang (2004) mittels einer Video-Observierung an einer Mautstelle (Michigan Department of Transportation and Oakland Road Commission). Dabei wurde eine Probandenanzahl von 1344 Beifahrern herangezogen.<sup>18</sup>

Die Ergebnisse dieser großen Stichprobenanzahl sind in Abbildung 61 aufgeführt.

---

<sup>18</sup> Eine Auswertung der unteren Extremitäten war nicht möglich, da dieser Bereich von der Kamera nicht einsehbar war.

## Entwicklungsperspektiven

---

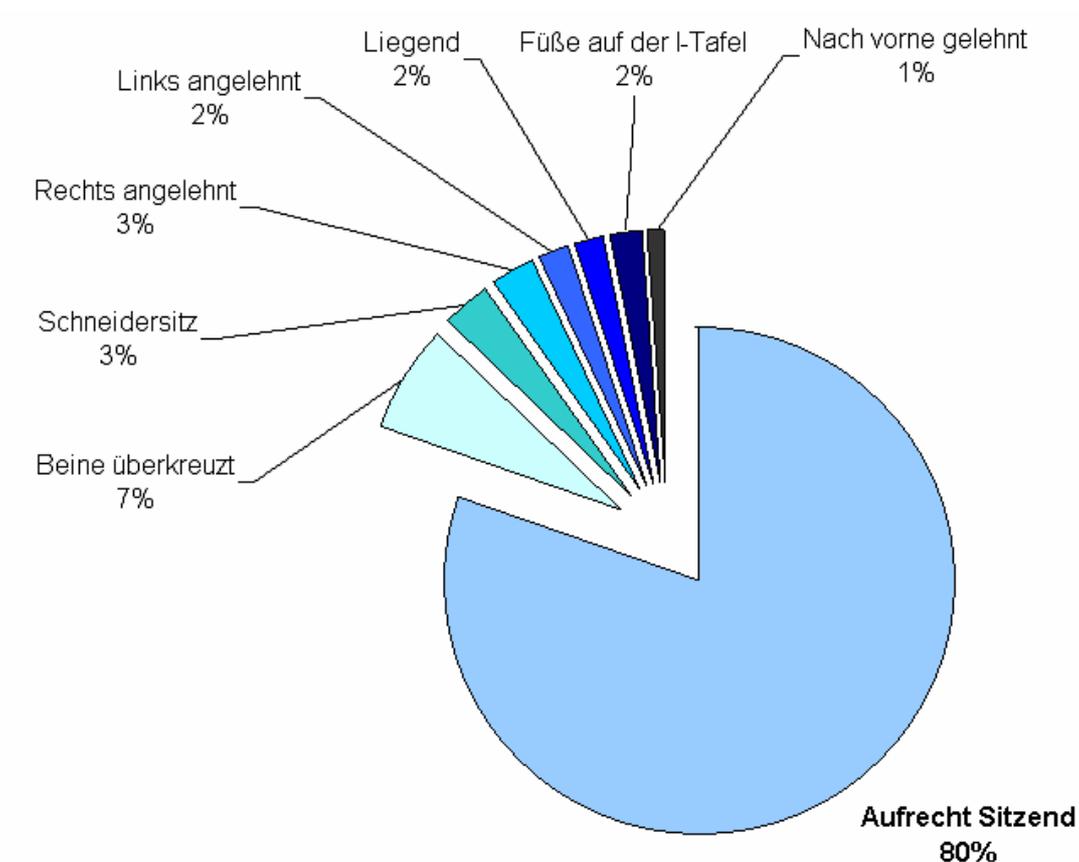


Abbildung 61: Körperhaltungen von 1344 Beifahrern

Diese Studie zeigt klar, dass ein Großteil aller Beifahrer (80%) aufrecht sitzt, während nur 5% der Untersuchten außermittig Platz nehmen (nach links/rechts gelehnt). Der Beifahrer sitzt also in gleicher Körperhaltung wie der Fahrer, der zwangsläufig durch die Fahraufgabe eine aufrechte Position einnimmt.

Für den Sitzentwickler könnte dies bedeuten, dass Fahrer- und Beifahrersitz gleich ausgeführt werden müssen.

Kritisch muss hinterfragt werden, ob diese Observierung an einer Mautstation überhaupt aussagekräftig ist: Hier nämlich kommt das Fahrzeug zum Stillstand, was möglicherweise zur Folge hat, dass sich der Beifahrer verstärkt aufrichtet. Daher soll eine Folgeuntersuchung dieses Problem klären.

### 6.2.2 Überprüfung durch Feldstudie

Hierzu wurde eine Untersuchung mit über 130 observierten Autofahrern auf der Autobahn A8 (Richtung: Salzburg - München) auf Höhe „Aschheim“ vorgenommen. Die Studie wurde 2006 während der Urlaubszeit (August) durchgeführt, so dass davon ausgegangen werden kann, dass sich an dieser Observierungsstelle die meisten Fahrzeuge aus Österreich oder anderen Urlaubsdomizilen auf der Rückreise befanden und die Insassen mindestens zwei Stunden unterwegs waren.

Die Untersuchung erbrachte das in Abbildung 62 dargestellte Ergebnis.

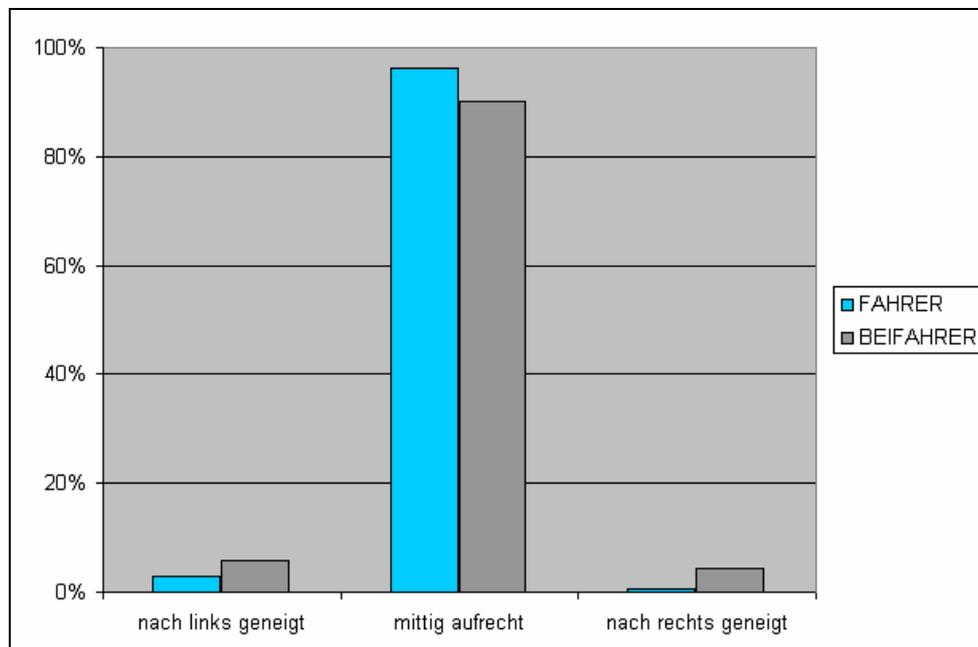


Abbildung 62: Körperhaltungen von Fahrer zu Beifahrer im Vergleich

Klar lässt sich erkennen, dass 96,3% der Fahrer mittig hinter dem Lenkrad sitzen, während nur 90% der Beifahrer mittig sitzen. 3% der Fahrer sind zum Seitenfenster gelehnt, während 4,3% der Beifahrer zum Fenster gelehnt sitzen. Zur Mittelkonsole neigen sich 0,7% der Fahrer und 5,7% der Beifahrer.

Kritisch muss bei beiden Observierungen allerdings rückgefragt werden, was Wirkung und was Ursache war. D.h. es ist konkret die Frage zu stellen, ob die Beifahrer möglicherweise deswegen so aufrecht im Sitz positioniert sind, weil sie aufgrund der konstruktiven Gestaltung des Sitzes gar keine andere Wahl haben.

### **6.2.3 Ergebnisse und Diskussion**

Beide Studien zeigen, dass eine große Mehrheit (> 80%) der Beifahrer aufrecht im Sitz Platz nimmt. Alle anderen Körperhaltungen werden mit nur so geringer Häufigkeit eingenommen, dass sie vernachlässigt werden können. Man darf also davon ausgehen, dass sich an der idealen Druckverteilung zwischen Fahrer- und Beifahrersitz auf der Sitzfläche so gut wie nichts ändern wird. Für den Rückenbereich allerdings kann keine derart klare Aussage getroffen werden: Da in Fahrerhaltung die Füße auf der Pedalerie und die Hände am Lenkrad einen festen Platz einnehmen, in Beifahrerhaltung aber nicht, erreicht der Beifahrer eine geringere Last im Schulterblattbereich des oberen Rückens als der Fahrer. In Nachfolguntersuchungen müsste daher das Augenmerk auf die Rückenlehne gelegt werden, da hier Abweichungen zwischen Fahrer- und Beifahrerseite sehr wahrscheinlich sind.

Generell kann aber davon ausgegangen werden, dass ein automatisches Sitzeinstellsystem für die Beifahrerseite ähnlich gut funktionieren würde und auf ähnlich positives Feedback seitens der Insassen stoßen dürfte.

### 7 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es, dem Fahrer eine Automatisierung der Sitzeinstellung zur Seite zu stellen, um die Komplexität eines vielfach verstellbaren Fahrzeugsitzes zu beherrschen, ohne die geschaffenen Verstellmöglichkeiten zu reduzieren.

Dabei war die Klärung einer komfortablen Sitzposition für Kurz- und Langzeit von großer Bedeutung. Der optische Eindruck spielt für das Komfortempfinden eine große Rolle (vgl. Knoll, 2006), tritt aber bei längerer Dauer in den Hintergrund. Den Großteil der Sitzkomfortbewertung macht dann der „Erleidensaspekt“ – der Diskomfort – aus. Mergl hat hierzu ein Modell zur Prognostizierung des Sitzdiskomforts entwickelt, das sowohl für Kurz- als auch für Langzeit validiert worden ist. Ein messbarer, objektiver Wert stand aber bislang noch aus.

Im Rahmen der vorliegenden Studie ist eine medizinische Validierung der idealen Druckverteilung mittels intradiskaler Druckmessung erfolgt. Durch einen endoskopischen Eingriff konnte diese Untersuchung am lebenden Menschen durchgeführt werden. Dabei wurden zwei flexible Druckaufnehmer in den Gallertkern der Bandscheiben im unteren Rückenbereich implantiert, die bei Bandscheibenleiden am häufigsten betroffen sind. Erstmals in der ergonomischen Forschung wurde eine In-vivo-Bandscheibendruckmessung für unterschiedliche Sitzeinstellungen im Fahrzeug durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungsreihe bestätigen die theoretischen Annahmen: Bei einer Sitzeinstellung gemäß der idealen Druckverteilung stellt sich der mit Abstand geringste Bandscheibendruck ein. Dieser ist ein Indikator für die Muskelspannung, die zu einem Großteil ausschlaggebend für die Rückenschmerzen ist.

Auf dieser Basis konnte die technische Umsetzung der medizinischen Erkenntnisse in die Konstruktion einer Apparatur zur automatischen Einstellung des Sitzes nach physiologischen Gesichtspunkten erfolgen. Durch den Aufbau einer automatischen Sitzkomforteinstellung konnte eine Anwendung des Modells der idealen Druckverteilung geschaffen werden. Das System reduziert die Komplexität des Einstellungsvorgangs, ohne die Einstellungsmöglichkeiten zu beeinträchtigen, und schafft gleichzeitig eine optimale physiologische Sitzposition.

Umfangreiche statische Probandenstudie und erste Eruiierungsuntersuchungen im Alltagsgebrauch haben gezeigt, dass ASCA akzeptiert und von über 95% der Versuchspersonen als sehr gut befunden wird. Äußerst bejahende Aussagen von Probanden – insbesondere jener mit Bandscheibenvorfällen und anderen Rückenleiden – bestätigen deutlich diesen positiven Eindruck. Zudem haben erste

Eruierungsuntersuchungen gezeigt, dass bei längerer Fahrzeit (2-3h) die Diskomfortempfindung sehr gering bleibt oder bei manchen Probanden gar zurückgeht. In allen Fällen ermöglicht die automatische Sitzkomfoteinstellung statisch wie dynamisch ein Höchstmaß an Sitzkomfort.

Ein weiterer Vorteil ist die Vereinfachung der Sitzeinstellung: Es bedarf nur noch einer Eigenvorgabe der Sitzlängsverstellung; der Rest der Sitzeinstellung wird durch ideale Ausschöpfung aller Möglichkeiten von der Automatisierung übernommen. Dies führt zu einer deutlichen Bedienkomfortsteigerung, da hier keine Fehlbedienung mehr möglich ist. Zudem wird die Sitzeinstellzeit reduziert, weil das System schneller regelt, als der Mensch dies vermag, und dabei mehrere Sitzverstellmotoren gleichzeitig verfahren können.

Das Konzept der automatischen Sitzkomfoteinstellung, das auf der idealen Druckverteilung basiert, bietet Sitzkomfort auf höchstem Niveau, was sich an zahlreicher Probandenzahl herausgestellt hat. Dadurch konnte mit dieser Arbeit der Kreis der Objektivierung des Sitzkomforts geschlossen werden.

## 8 Literatur

- Beermann, F.            Sitze im Automobil. Euro-Forum-Konferenz, Recaro GmbH & Co. KG, Stuttgart 2003
- Bortz, J.                Lehrbuch der Statistik für Sozialwissenschaftler - Zweite, vollständig neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo 1985
- Brinckmann, P.        Vergleich der Belastung der Wirbelsäule im Sitzen und Stehen, ergo mechanics, Interdisziplinärer Kongress Wirbelsäulenforschung, S. 52-67, 2004
- Bubb, H.                Skriptum zur Vorlesung Produktergonomie, Lehrstuhl für Ergonomie der TU München, 2003
- Bubb, H.                Quality of Work and Products in Enterprise of the Future, Product Ergonomics, pp.3-6, ergonomia Verlag oHG, Stuttgart 2003
- Bubb, H.                Ergonomie und Sitzgestaltung, ergo mechanics, Interdisziplinärer Kongress Wirbelsäulenforschung, S. 120-137, 2004
- Bubb, H.                Komfortabel Sitzen, Konstruiert und bewertet mit RAMSIS, Lehrstuhl für Ergonomie der TU München, Ramsis User Conference, Stuttgart 2007
- Bubb, H.; Estermann, S.
- Influence of Forces on Comfort Feeling in Vehicles, SAE Digital Human Modeling Conference 2000, SAE No. 2000-01-2171, 2000

Bubb, H.; Kluth, K.; Rausch, H.; Strasser, H.

Quality of Work and Products in Enterprise of the Future, Proceedings of the Annual Spring Conference of the GfA on the Occasion of the 50<sup>th</sup> Anniversary of the Foundation of the Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (GfA) and the XVII Annual Conference of the International Society for Occupational Ergonomics & Safety (ISOES), ergonomia Verlag oHG, Stuttgart 2003

Caimi, M.

Bandscheibenverhältnisse unter Lebensbedingungen (in vivo), Bei Alltagsbelastungen und unter Therapieverhältnissen, TONUS, Information der Gesellschaft für Medizinische Kräftigungstherapie (GMKT), Nr. 6, März 1999

Corlett, E.N.; Bishop, R.P.

A technique for assessing postural discomfort, Ergonomics, Vol. 19, No. 2, pp. 175-182, 1976

Desmet, P.M.A.

'Emotion through expression; designing mobile telephones with an emotional fit'. Report of Modeling the Evaluation Structure of KANSEI, 3, 103-110. Tsukuba: University of Tsukuba, 2000

Desmet, P.M.A.; Hekkert, P.; Jacobs, J.J.

When a car makes you smile: Development and application of an instrument to measure product emotions. In: S.J. Hoch & R.J. Meyer (Eds.), Advances in Consumer Research (vol. 27, pp. 111-117). Provo, UT: Association for Consumer Research, 2000

Desmet, P.M.A.; Overbeeke, C.J.; Tax, S.J.E.T.

Designing products with added emotional value; development and application of an approach for research through design. The Design Journal, 4(1), pp. 32-47, 2001

Desmet, P.M.A.; Hekkert, P.

The basis of product emotions. In: W. Green & P. Jordan (Eds.). Pleasure with products, beyond usability (pp. 60-68). London: Taylor & Francis, 2002

## Literatur

---

- Diesing, P. Prüf- und Bewertungsmethoden für Antidekubitus-Systeme, Dissertation an der Technischen Universität Berlin, 2006
- Ebe, K.; Griffin, M.J.  
Qualitative models of seat discomfort including static and dynamic factors, *Ergonomics*, Vol. 43, No. 6, pp. 771-790, 2000
- Ebe, K.; Griffin, M.J.  
Quantitative prediction of overall seat discomfort, *Ergonomics*, Vol. 43, No. 6, pp. 791-806, 2000
- Ebe, K.; Griffin, M.J.  
Factors affecting static seat cushion comfort, *Ergonomics*, Vol. 44, No. 10, pp. 901-921, 2001
- Ecke, J. Wissenschaftliche Illustrationen für Biologie, Medizin, Anatomie, Technik, Zeichnungen, Grafik, Illustration, München 2007
- Esnouf, A.; Porter, M.  
Old methods new chairs. Evaluating six of the latest ergonomics chairs for the modern office. Hanson (Hrsg.): *Contemporary Ergonomics*, Taylor & Friends, S. 140-144, 1998
- Estermann, S. Komfortmodellierung für den 3D-Softdummy RAMSIS unter realen Fahrbedingungen, Dissertation am Lehrstuhl für Ergonomie der TU München 1999
- Fernandez, J.E.; Poonawala, M.F.  
How long should it take to evaluate seats subjectively?, *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 22, No. 6, pp. 483-487, 1998

## Literatur

---

Flügel, B.; Greil, H.; Sommer, K.

Anthropologischer Atlas. Alters- und Geschlechtsvariabilität des Menschen – Grundlagen und Daten, ISBN 3925831002, Minerva – Edition Wissen 1986

Franz, M.

The Influence of a Massage Car Seat on Comfort Experience Measured by EMG, SAE Conference 2008, SAE No. 2008-01-0889, 2008

Goossens, R.H.M.; Teeuw, R.; Snijders, C.J.

Sensitivity for pressure difference on the ischial tuberosity, Ergonomics, Vol. 48, No. 7, pp. 895-902, 2005

Greiff, H.

Seat Comfort Studies with EMG. Automotive Seating Review, pp. 38-42, 1994

Gyi, D.E.; Porter, J.M.

Interface pressure and the prediction of car seat discomfort, Applied Ergonomics, Vol. 30, pp. 99-107, 1999

Hartung, J.

Objektivierung des statischen Sitzkomforts auf Fahrzeugsitzen durch die Kontaktkräfte zwischen Mensch und Sitz, Dissertation am Lehrstuhl für Ergonomie der TU München, 2006

Hartung, J.; Mergl, C.; Bubb, H.

Reliability of pressure measurement on car seats, SAE Digital Human Modeling Conference 2004, SAE No. 2004-01-2167, 2004

Hartung, J.; Schlicht, T.; Bubb, H.

Sensitivity of human pressure feelings while sitting, SAE Conference 2004, SAE No. 2004-01-2140, 2004

## Literatur

---

- Helander, M.G. Forget about ergonomics in chair design? Focus on the aesthetics and comfort!, *Ergonomics*, Vol. 46, Nos. 13/14, pp. 1306-1319, 2003
- Helander, M.G.; Tham, M.P.  
Hedonomics – affective human factors design, *Ergonomics*, Vol. 46, Nos. 13/14, pp. 1269-1272, 2003
- Helander, M.G.; Zhang, L.  
Field studies of comfort and discomfort in sitting, *Ergonomics*, Vol. 40, pp. 895-915, 1997
- Kapandji, I.A. Funktionelle Anatomie der Gelenke, Band 3 – Rumpf und Wirbelsäule, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart 1985
- Kempfert, O. Arbeitsplatz Auto (Wirtschaftspsychologie Band 7), Peter Lang GmbH, Frankfurt am Main 1999, ISBN 3-631-34804-5
- Kendall, F.P.; McCreary, E.K.; Provance P.G.  
Muskeln, Funktionen und Tests, 4. Auflage, Urban & Fischer Verlag, München Jena 2001
- Klein, W. Biometrische Zusammenhänge zwischen Körperhaltung und Sitzanordnung für Fahrer und Fahrgäste im Personenwagen, Eine Studie des Einflusses unterschiedlicher Sitzhöhe auf Veränderungen der Körperhaltung und deren praktische Anwendung, Fortschrittbericht der VDI Zeitschriften, Reihe 12, Nr. 23, 1973
- Klendauer, M. Versuch der Objektivierung des Diskomfortempfindens bei Sitzen durch die Kontaktkräfte zwischen Mensch und Sitz, Studienarbeit am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München, 2004

## Literatur

---

- Knoll, C.M. Einfluss des visuellen Urteils auf den physisch erlebten Komfort am Beispiel von Sitzen. Ein Beitrag zu dem Verhältnis von Ergonomie und Design, Dissertation am Lehrstuhl für Ergonomie der TU München, 2006
- Kolich, M.; White, P.L.  
Reliability and validity of a long term survey for automobile seat comfort, International Journal Vehicle Design, Vol. 34, No. 2, 2004
- Krenn, M. Versuch der Objektivierung des Diskomfortempfindens im Rücken beim Sitzen durch die Kontaktkräfte zwischen Mensch und Sitz, Semesterarbeit am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München, 2004
- Krist, R. Modellierung des Sitzkomforts, eine experimentelle Studie. Dissertation an der Katholischen Universität Eichstätt 1993
- Kruse, R. Perzeptionsadäquate Parametrisierung von objektiven Sitzdruckverteilungen beim Menschen, Diplomarbeit im Studiengang Marine Umweltwissenschaften an der Universität Oldenburg 2001
- Kubalek-Schröder, S.; Dehler, F.  
Funktionsabhängige Beschwerdebilder des Bewegungssystems. Brügger-Therapie nach dem Murnauer Konzept. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2004
- Kurtz, P.; Sievers, G.; Schlütter, B.  
Anforderungen an Sitzkomfort und Assistenzsysteme bei Fahrersitzen, Gesellschaft für Arbeitswissenschaft Press, 571-574, Dortmund 2006
- de Looze, M.P.; Krause, F.; Reijneveld, K.; Vink, P.  
Seat appearance and sitting comfort, International Ergonomics Association, Seoul 2003

## Literatur

---

de Looze, M.P.; Kuijt-Evers, L.F.M.; van Dieen, J.

Sitting comfort and discomfort and the relationships with objective measures, *Ergonomics*, Vol. 46, No. 10, pp. 985-997, 2003

Lorenz, T. Ermittlung von Anlagekomfortbereichen für Kopf, Nacken und Schulter unter Berücksichtigung der physiologischen Anforderungen der Insassen im Gesamtfahrzeug, Diplomarbeit am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München, 2008

Lutz, H.; Wendt, W. Taschenbuch der Regelungstechnik, 4., korrigierte Auflage, ISBN 3-8171-1668-3, Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main, 2002

Mangen, C. Prognose des Langzeitkomforts im Auto aus den Kontaktkräften zwischen Mensch und Sitz, Studienarbeit am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München, 2004

Mergl, C. Quality of Work and Products in Enterprise of the Future, Method and Apparatus for Predicting Seat Discomfort, pp. 119-122, *ergonomia Verlag oHG*, Stuttgart 2003

Mergl, C. Entwicklung eines Modells zur Optimierung des Sitzkomforts, Abschlussbericht im Auftrag der BMW Group, München 2005

Mergl, C. Entwicklung eines Verfahrens zur Optimierung des Sitzkomforts auf Automobilsitzen, Dissertation am Lehrstuhl für Ergonomie der TU München, Herbert Utz Verlag, München 2006

Mergl, C.; Führlinger, L.; Bubb, H.

Eine experimentelle Studie zur Objektivierung des Ansitzkomforts, Produkt- und Produktions-Ergonomie – Aufgabe für Entwickler und Planer, 54. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft, S. 177-180, München 2008

## Literatur

---

Mergl, C.; Klendauer, M.; Mangen, C.; Bubb, H.

Predicting Long Term Riding Comfort in Cars by Contact Forces between Human and Seat, SAE Conference 2005, SAE No. 2005-01-2690, 2005

Nachemson, A. The load on lumbar disks in different positions of the body, *Clinical Orthopaedics and Related Research* (45): 107-22, 1966

Nachemson, A. Towards a better understanding of low-back pain: A review of the mechanics of the lumbar disc, *Rheumatology and Rehabilitation*, 14, pp. 129-143, 1975

Nachemson, A.; Elfstrom, G.

Intravital dynamic pressure measurements in lumbar discs. A study of common movements, maneuvers and exercises. *Scandinavian Journal of Rehabilitation Medicine*, Supplement 1: 1-40, 1970

Nachemson, A.; Morris J.M.

In Vivo Measurements of Intradiscal Pressure. *J Bone Joint Surg [Am]* 46-A (5): 1077-1092, 1964

Neidlinger-Wilke, C. Die Bandscheibe aus biologischer Sicht, *ergo mechanics, Interdisziplinärer Kongress Wirbelsäulenforschung*, S. 68-77, 2004

Nordin, M. Zusammenhang zwischen Sitzen und arbeitsbedingten Rückenschmerzen, *ergo mechanics, Interdisziplinärer Kongress Wirbelsäulenforschung*, S. 10-35, 2004

Oudenhuijzen, A.; Tan, K.

The relationship between seat pressure and comfort, SAE Conference 2003, SAE no 2003-01-2213, 2003

## Literatur

---

Oudenhuijzen, A.; Tan, K.

The relationship between comfort and knee angles, SAE Conference 2004, SAE no 2004-01-2144, 2004

Rasmussen, J.

Muscle relaxation and shear force reduction may be conflicting: A Computational Model of Seating, SAE Digital Human Modeling Conference 2007, SAE No. 2007-01-2456, 2007

Reum, E.

Untersuchungen zur Gestaltung von Assistenzsystemen zur ergonomischen Sitzeinstellung in Kraftfahrzeugen, Diplomarbeit an der Technischen Universität Ilmenau, 2004

Russell, J.A.

A circumplex model of affect. Journal of Personality and Social Psychology, Vol. 39, pp. 1161-1178

Sato, K., Kikuchi, S., Yonezawa, T.

In vivo intradiscal pressure measurement in healthy individuals and in patients with ongoing back problems, SPINE, Volume 24 (23), pp. 2468-74, 1999

Schmidtke, H.

Ergonomie, 3. Auflage, ISBN 3-446-16440-5, Carl Hanser Verlag München 1993

Schmidtke, H.

Handbuch der Ergonomie, 2. Auflage, ISBN 3-927038-70-9, Herausgegeben von Bundeswehr für Wehrtechnik und Beschaffung, Koblenz 1989

Shen, W.; Parsons, K.C.

Validity and reliability of rating scales for seated pressure discomfort, International Journal of Industrial Ergonomics, Vol. 20, pp. 441-461, 1997

Takahashi, I.

Mechanical Load of the Lumbar Spine during Forward Bending Motion of the Trunk – A Biomechanical Study, SPINE, Volume 31, Number 1, pp. 18-23, 2006

## Literatur

---

- Tittel, K. Beschreibende und funktionelle Anatomie des Menschen, 12. Auflage, Urban & Fischer, Jena Stuttgart 1994
- Verver, M. Numerical tools for comfort analyses of automotive seating, ISBN 90-386-2855-2, Eindhoven University Press 2004
- Villalba, J. Untersuchung der Möglichkeit einer adaptiven Sitzeinstellung auf Grundlage einer videobasierten Personenvermessung, konstruktive Diplomarbeit am Lehrstuhl für Ergonomie der TU München, München 2006
- Vink, P. Comfort, Antrittsrede an der TU Delft, ISBN: 90-6743-912-6, 2002
- Vink, P. Comfort and Design, Principles and Good Practice, CRC Press, ISBN: 0-8493-2830-6, 2005
- White, A.A.; Panjabi, M.M.  
Clinical biomechanics of the spine, J.P. Lippincott Company, Philadelphia Toronto 1978
- Wilke, H.J. Möglichkeiten zur Bestimmung der Wirbelsäulenbelastung und Konsequenzen für die Empfehlungen für das Sitzen, ergo mechanics, Interdisziplinärer Kongress Wirbelsäulenforschung, S. 78-103, 2004
- Wilke, H.J.; Neef, P.; Caimi, M.; Hoogland, T.; Claes, L.E.  
New in vivo measurements of pressures in the intervertebral disc in daily life, Spine, Vol. 24, No. 8, pp. 755-762, 1999
- Winkel, J.; Jorgensen, K.  
Evaluation of foot swelling and lower-limb temperatures in relation to leg activity during long-term seated office work, Ergonomics, Vol. 29, No. 2, pp. 313-28, 1986

Zacher, I.; Bubb, H.

Strength Based Discomfort Model of Posture and Movement, SAE Digital Human Modeling Conference 2004, SAE No. 2004-01-2139, 2004

Zenk, R.; Mergl, C.; Hartung, J.; Sabbah, O.; Bubb, H.

Objectifying the Comfort of Car Seats, SAE Conference 2006, SAE No. 2006-01-1299, 2006

Zenk, R.; Mergl, C.; Hartung, J.; Bubb, H.

Predicting overall seating discomfort based on body area ratings, SAE Conference 2007, SAE No. 2007-01-0346, 2007

Zenk, R.; Franz, M.; Bubb, H.

Spine load in the context of automotive seating, SAE Digital Human Modeling Conference 2007, SAE No. 2007-01-2485, 2007

Zenk, R.; Franz, M.; Bubb, H.

Emocard – An Approach to bring more Emotion in the Comfort Concept, SAE Conference 2008, SAE No. 2008-01-0890, 2008

Zhang, L.; Helander, M.G.; Drury, C.G.

Identifying Factors of Comfort and Discomfort in Sitting, Human Factors, Vol. 38, No. 3, pp. 377-389, 1996

Zhang, L.; Chen, L.; Vertiz, A.; Balci, R.

Survey of Front Passenger Posture Usage in Passenger Vehicles, SAE Conference 2004, SAE No. 2004-01-0845, 2004

9 Anhang

Anhang 1: Abbildungen

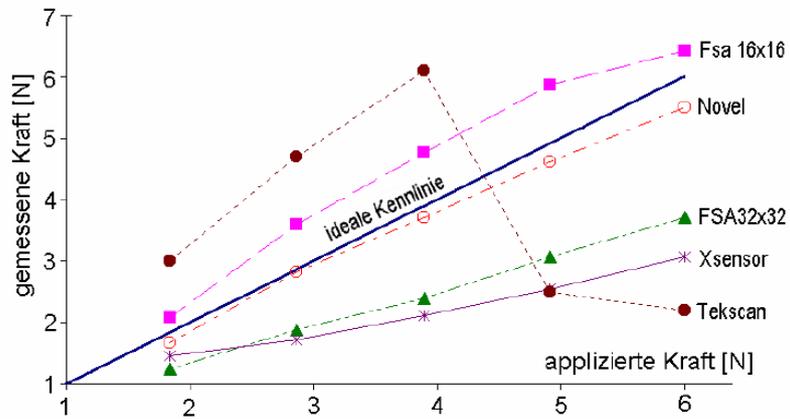


Abbildung 63: Linearitäten der Druckmesssysteme FSA, Novel, Tekscan und Xsensor (Kruise, 2001)

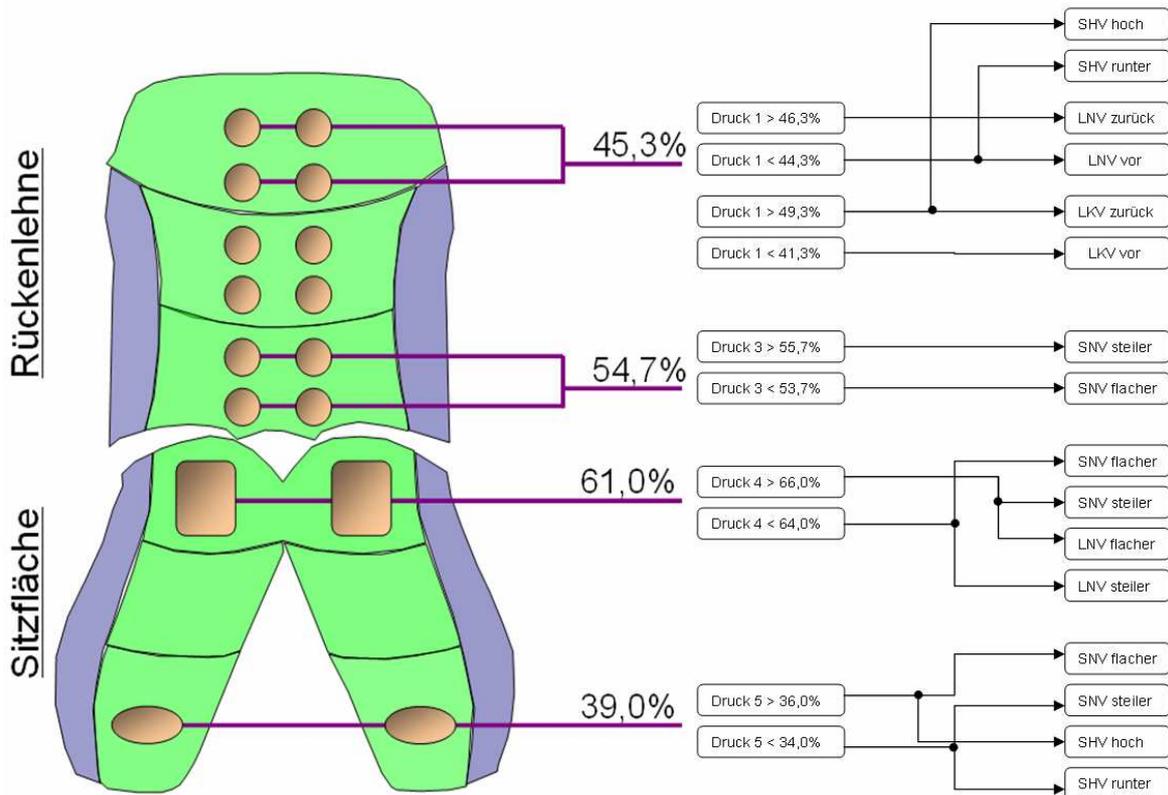


Abbildung 64: Zielwerte der „idealen“ Druckverteilung überführt auf Sitzkonstellation (E65); Idealdruck in den Druck-/Sensorblasen und Aktion der Sitzmotoren bei Abweichung vom Idealbereich

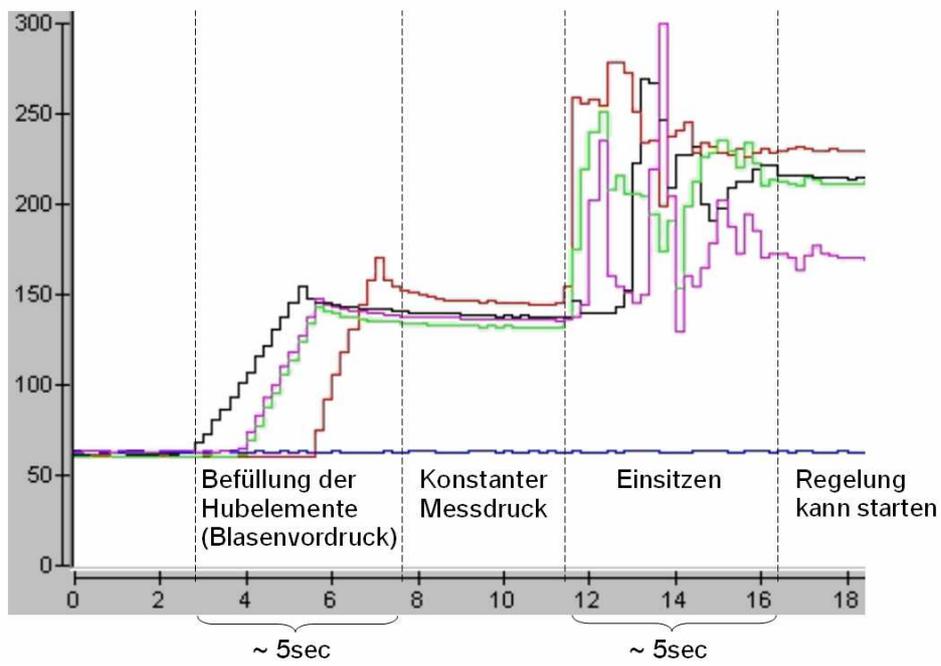


Abbildung 65: Startvorgang der automatischen Sitzkomferteinstellung: Befüllung der Hubelemente und Einsitzen in Prototypensitz

## Anhang

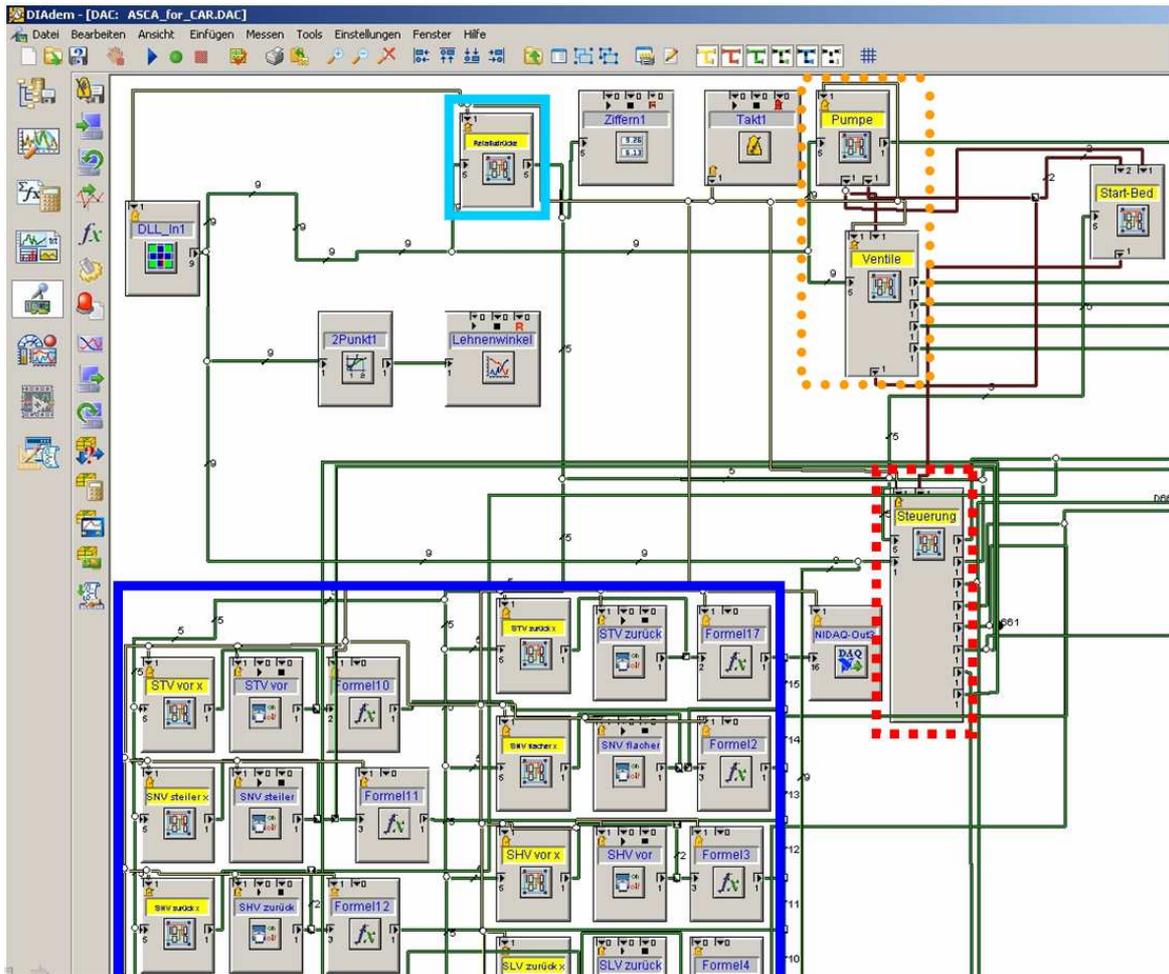


Abbildung 66: Übergeordneter Schaltplan in DIAdem-DAC;

Unterschaltpläne:

„Steuerung gesamt“ – rot

„Relativdrücke“ – türkis

„Ventilsteuerung“ – orange

„Ansteuerung der Sitzmotoren“ – blau

# Anhang

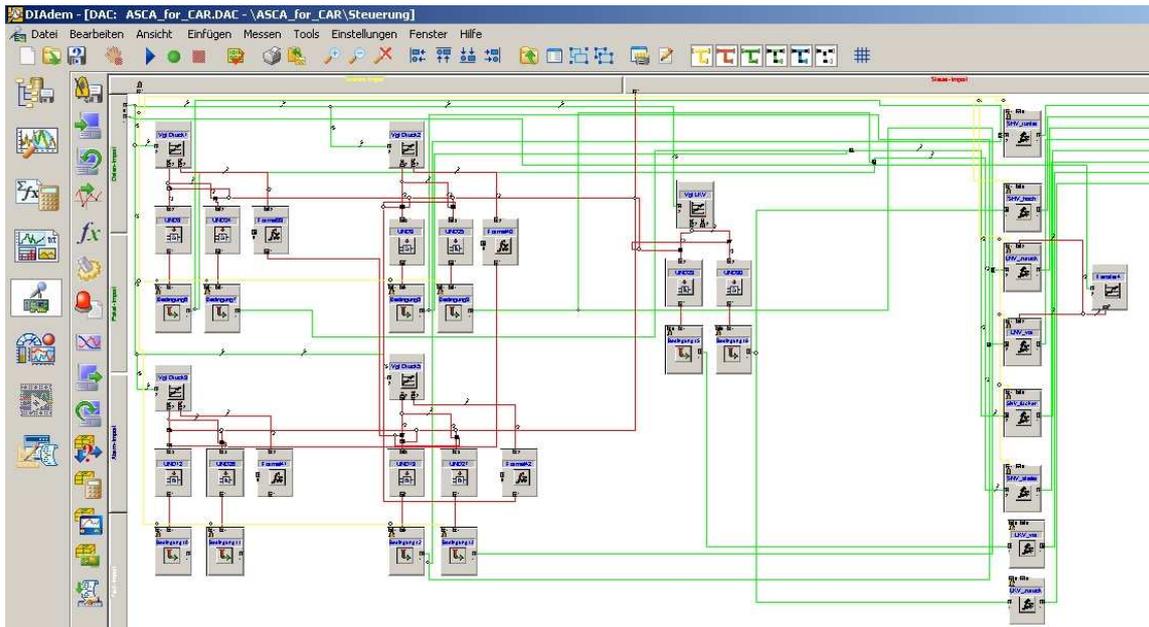


Abbildung 67: Unterschlupplan „Steuerung gesamt“

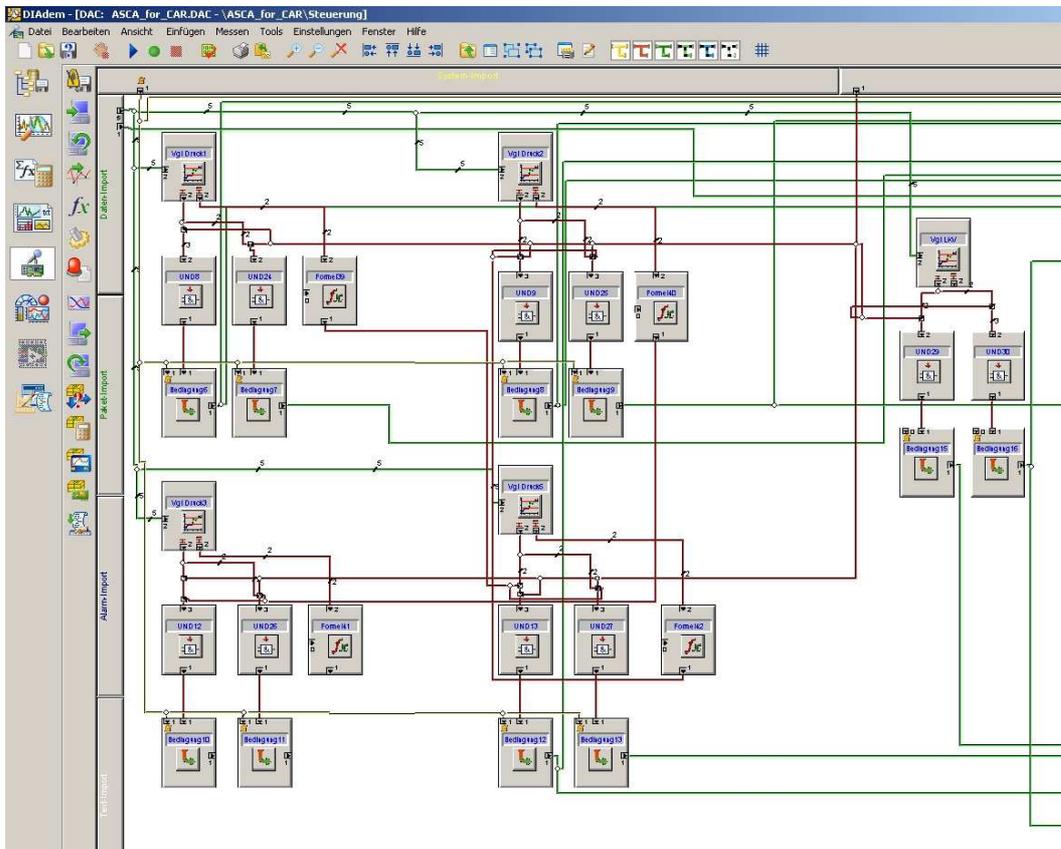


Abbildung 68: Unterschlupplan „Steuerung“

# Anhang

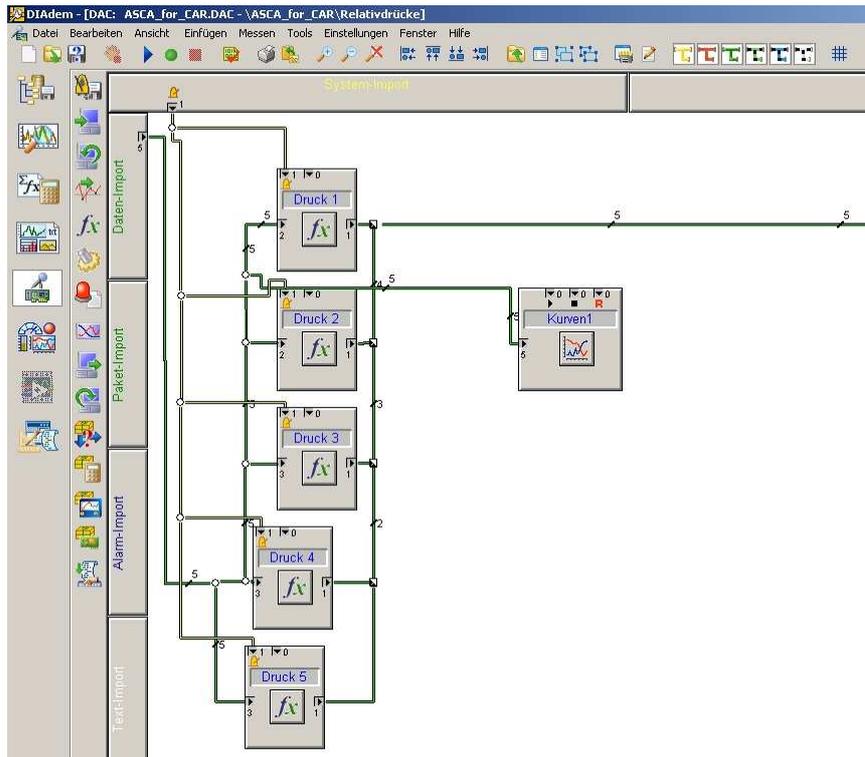


Abbildung 69: Unterschlupfplan „Relativdrücke“

## Anhang

### Anhang 2: Fragebögen

EK-53, Raphael Zenk  
Tel.: 13750

**ASCA**

Stand: 30.04.2008

<b>Sitzversion</b>	Automatische Sitzkomforteinstellung	<b>Fahrzeug</b>	Ser. V515007
<b>Name</b>		<b>Datum</b>	
<b>Körpermaße</b>	____ cm; ____ kg	<input type="checkbox"/> Frau <input type="checkbox"/> Herr	<b>Alter</b> ____ Jahre
<b>Beleidung</b>	<input type="checkbox"/> Jeans <input type="checkbox"/> T-Shirt	<input type="checkbox"/> dünne Hose <input type="checkbox"/> Hemd	<input type="checkbox"/> Pullover <input type="checkbox"/> _____

Beurteilung	Begründung									
<b>Ansitzkomfort</b> (nach autom. Einstellung) <table style="display: inline-table; border: 1px solid black;"> <tr> <td style="border: none;">BI</td> <td style="border: none;">3</td> <td style="border: none;">4</td> <td style="border: none;">5</td> <td style="border: none;">6</td> <td style="border: none;">7</td> <td style="border: none;">8</td> <td style="border: none;">9</td> <td style="border: none;">10</td> </tr> </table>	BI	3	4	5	6	7	8	9	10	
BI	3	4	5	6	7	8	9	10		
<b>Empfinden Sie diese Sitzposition als angenehm?</b>	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein									

<b>Zufriedenheit</b>	sehr unzufrieden	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	sehr zufrieden
----------------------	------------------	---	----------------

<b>Nutzen</b>	sehr unpraktisch	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	sehr praktisch
---------------	------------------	---	----------------

<b>Einstellzeit</b>	zu kurz	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	zu lang
---------------------	---------	---	---------

<b>Diese Sitzposition wäre gut nutzbar für ...</b> (Mehrfachantworten möglich)	<input type="checkbox"/> Kurzstrecke <input type="checkbox"/> sportliche Fahrweise <input type="checkbox"/> Langstrecke <input type="checkbox"/> cruisen	<input type="checkbox"/> Allgemein gültig <input type="checkbox"/> _____
---	---	---

<b>Würde Ihnen eine Sitzeinstellung allein über ASCA genügen?</b>	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	
---	---	--

<b>Würden Sie zusätzlich zu ASCA eine Sitzverstellung wünschen?</b>	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	bei Ja: <input type="checkbox"/> herkömml. Sitzschalter <input type="checkbox"/> I-Drive
---	---	---

<b>Soll die Aktivierung der ASCA bei Einstieg automatisch erfolgen?</b>	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	
---	---	--

<b>Möchten Sie immer wieder auf diese Einstellung zurückstellen können</b> (gemäß einer UhDo-Taste)?	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	
--	---	--

<b>Innovationsgrad</b>	sehr konservativ	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	sehr innovativ
------------------------	------------------	---	----------------

<b>Was mir noch aufgefallen ist:</b>	
--------------------------------------	--

EK-501, Raphael Zenk  
Tel.: 13750

Stand: 07.04.2008

**ASCA (= Automatische Sitzkomfortanpassung)**

<b>Fahrzeug</b>	E60; V515007		<b>Fahrtstrecke</b>	_____ h; _____ km	<b>Datum</b>	
<b>Name</b>			<b>Alter</b>	_____ Jahre	<b>Körpermaße</b>	_____ cm; _____ kg
<b>Bekleidung</b>	<input type="checkbox"/> Jeans <input type="checkbox"/> T-Shirt	<input type="checkbox"/> dünne Hose <input type="checkbox"/> Hemd	<input type="checkbox"/> Pullover			

**!!! WICHTIG !!! FAHRZEIT MIND. 2 STUNDEN !!! WICHTIG !!!**

Bitte ankreuzen - jede 1/2 Stunde!

Start	kein Diskomfort	sehr geringer Diskomfort	geringer Diskomfort	mittlerer Diskomfort	starker Diskomfort	sehr starker Diskomfort
0	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	11 12 13 14 15 16 17 18 19 20	21 22 23 24 25 26 27 28 29 30	31 32 33 34 35 36 37 38 39 40	41 42 43 44 45 46 47 48 49 50	
0,5h	kein Diskomfort	sehr geringer Diskomfort	geringer Diskomfort	mittlerer Diskomfort	starker Diskomfort	sehr starker Diskomfort
1,0h	kein Diskomfort	sehr geringer Diskomfort	geringer Diskomfort	mittlerer Diskomfort	starker Diskomfort	sehr starker Diskomfort
1,5h	kein Diskomfort	sehr geringer Diskomfort	geringer Diskomfort	mittlerer Diskomfort	starker Diskomfort	sehr starker Diskomfort
2,0h	kein Diskomfort	sehr geringer Diskomfort	geringer Diskomfort	mittlerer Diskomfort	starker Diskomfort	sehr starker Diskomfort
2,5h	kein Diskomfort	sehr geringer Diskomfort	geringer Diskomfort	mittlerer Diskomfort	starker Diskomfort	sehr starker Diskomfort
3,0h	kein Diskomfort	sehr geringer Diskomfort	geringer Diskomfort	mittlerer Diskomfort	starker Diskomfort	sehr starker Diskomfort

<b>Empfinden Sie diese Sitzposition über die gesamte Fahrzeit als angenehm?</b>	<input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein	<b>Nach wieviel Minuten hätten Sie gerne eine Veränderung der Sitzeinstellung vorgenommen?</b>		<b>Welche?</b>
---	--	--	---	----------------

<b>Sonstiges:</b>	
-------------------	--

### **Anhang 3: Vorgehen zur Sitzeinstellung**

#### **1. BMW**

Die richtige Sitzeinstellung aus „Sitzen mit Komfort“, 1998 BMW AG, München/Deutschland, Bestell-Nummer 8 27 1501 10, Seite 6 -13:

Die richtige Einstellung

Wir empfehlen Ihnen zur individuellen Sitzeinstellung folgende Reihenfolge:

##### **1. Sitzlängseinstellung**

Beim Betätigen des Gaspedals und beim Durchtreten des Kupplungspedals soll das Knie leicht angewinkelt sein.

##### **2. Sitzhöhe**

Stellen Sie die Sitzfläche möglichst hoch ein. Eine hohe Sitzfläche ermöglicht Ihnen ein bestmögliches Sichtfeld nach allen Seiten und auf die Instrumente.

##### **3. Sitzneigung**

Stellen Sie die Sitzfläche vorne nach oben, bis Sie ein leichtes Aufliegen ihrer Oberschenkel an der Sitzvorderkante spüren. Dadurch wird ein ungewolltes Rutschen nach vorne verhindert.

##### **4. Rückenlehnenneigung**

Neigen Sie die Rückenlehne nach hinten bis der Winkel zwischen Sitzfläche und Rückenlehne mehr als 90 Grad beträgt (empfehlenswert 100-110 Grad).

Die Rückenlehnenneigung soll nur so flach eingestellt werden, dass das Sichtfeld nicht eingeschränkt wird.

##### **5. Lehnenoberteil**

Neigen Sie das Oberteil der Rückenlehne so weit nach vorne bis sie im Schulterbereich Kontakt spüren. Der Schulterkontakt zur Lehne soll beim Lenken nicht verloren gehen.

Die Einstellung des Lehnenoberteils ermöglicht eine etwas stärker geneigte Rückenlehne bei optimaler Rundumsicht. Bei einer etwas stärker geneigten Rückenlehne öffnet sich der Winkel zwischen Oberschenkel und Oberkörper.

Dies führt zu einer Entspannung des Bauchraumes und Entlastung der Wirbelsäule.

#### **6. Lenkrad (Höhe und Tiefe)**

Stellen Sie das Lenkrad so ein, dass Sie es mit leicht angewinkelten Armen erreichen ohne dass die Schultern den Kontakt zur Rückenlehne verlieren. Die Instrumente dürfen dabei nicht verdeckt werden.

#### **7. Lordosenstütze (Ausprägung und Höhe)**

Die Lordosenstütze soll so weit nach vorne gestellt werden, bis ein sanfter Druck im unteren Wirbelsäulenbereich spürbar wird.

Das Becken soll von der Lordosenstütze abgestützt werden.

Passen Sie dann die Höhe der Unterstützung so an, dass die natürliche Wirbelsäulenform am besten nachgeahmt wird.

#### **8. Kopfstütze**

Die Kopfstütze sollte möglichst hoch eingestellt werden.

**Es empfiehlt sich, nach einer gewissen Fahrstrecke die vorgenommenen Einstellungen nochmals zu überprüfen!**

## 2. RECARO

8 Punkte zum richtigen Sitzen (Quelle: [www.recaro.de](http://www.recaro.de)):



Das Gesäß so dicht wie möglich an die Sitzlehne rücken. Der Sitzabstand zu den Pedalen wird so eingestellt, dass das Bein bei durchgetretenen Pedalen leicht angewinkelt ist.



Die Schultern so dicht wie möglich an die Sitzlehne rücken. Die Rückenlehnenneigung so ausrichten, dass das Lenkrad mit leicht angewinkelten Armen gut erreicht wird. Beim Drehen des Lenkrads muss der Schulterkontakt erhalten bleiben.



Die Sitzhöhe so hoch wie möglich fixieren. Dadurch wird ein nach allen Seiten und auf alle Anzeige-Instrumente freies Sichtfeld gewährleistet.



Die Sitzflächenneigung so ausrichten, dass die Pedale leicht durchgetreten werden können. Die Oberschenkel sollen leicht aufliegen, ohne Druck auf das Sitzkissen. Überprüfen Sie vor dem Start die Rückenlehnenneigung.



Die Sitzflächenverlängerung so einstellen, dass die Oberschenkel bis kurz vor dem Knie aufliegen. Faustregel: zwei bis drei Finger Freiraum zwischen Sitzkante und Kniekehle.



Wenn die Lendenwirbelsäule in ihrer natürlichen Form unterstützt wird, ist der Sitz richtig eingestellt.



Die Seitenführungen des Sitzes sollten so nah am Körper liegen, dass der Oberkörper ohne Beengung angenehm seitlich unterstützt wird.



Die Kopfstützenoberkante wenn möglich genauso hoch wie die obere Kopfkante einstellen. Neigung: Der Abstand zum Kopf sollte ca. 2 cm betragen.