

Technische Universität München

Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik

Zeitlich und regional aufgelöstes industrielles Lastflexibilisierungspotenzial als Beitrag zur Integration Erneuerbarer Energien

Anna-Maria Gruber

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Rolf Witzmann

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Ulrich Wagner

2. Prof. Dr.-Ing. Harald Bradke

Die Dissertation wurde am 09.06.2017 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
am 04.09.2017 angenommen.

Kurzfassung

Die Integration Erneuerbarer Energien erfordert eine stärkere Flexibilität auf der Erzeugungsseite. Ergänzend können auch die Flexibilitäten des industriellen Stromverbrauchs genutzt werden.

Im Fokus der Arbeit stehen die Potenzialermittlung für stromintensive Prozesse und Querschnittstechnologien auf regionaler Ebene sowie die Bestimmung der Kosten für Erschließung und Betrieb der Lastflexibilisierung. Entscheidend für eine Bewertung des Beitrags industrieller Flexibilitäten zu verschiedenen Einsatzoptionen ist die Bestimmung technischer und ökonomischer Kennwerte. Zur Quantifizierung dieser Kennwerte für stromintensive Prozesse und Querschnittstechnologien werden verschiedene Methoden entwickelt. Relevante Parameter sind beispielsweise Abrufdauer, Abrufhäufigkeit oder Investitionen für die Erschließung der Flexibilität. Die zukünftige Entwicklung der Potenziale und Kosten bis zum Jahr 2030 wird unter Berücksichtigung verschiedener Einflussfaktoren, wie beispielsweise der Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen, der Änderung von Produktionsverfahren oder der Hybridisierung der Wärmeerzeugung, abgebildet.

Der Beitrag industrieller Flexibilitäten auf regionaler Ebene wird anschließend für die Einsatzoption Engpassmanagement dargestellt. In einem Anwendungsfall wird gezeigt, wie hoch die Minderung von Redispatch- oder Einspeisemanagementmaßnahmen durch die Nutzung der Flexibilitäten sein kann.

Abstract

The integration of renewable energies requires more flexibility on electricity generation side. Alternatively, industrial flexibilities can support the integration.

This work focusses on the investigation of potentials on a regional level for electricity-intensive processes and cross-sectional technologies and also the determination of costs for implementation and operation of load flexibility. The determination of technical and economical parameters is crucial for an assessment of the contribution of industrial flexibilities to different usage options. Different methods are developed to quantify these parameters for electricity-intensive processes and cross-sectional technologies. Relevant parameters are, for example, duration and frequency of an activation or investments for the implementation of flexibility.

For the future development of potentials and costs until 2030, the realization of energy efficiency measures, changes in production methods or hybridization of heat generation are taken into account.

Subsequently, the contribution of industrial flexibilities on regional level is shown for the usage option congestion management. In an use case the decrease of redispatch- and feed-in management measures by using industrial flexibilities is quantified.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	vii
Abkürzungen, Formelzeichen und Indizes	ix
1 Einleitung.....	1
2 Untersuchungsgegenstand.....	3
2.1 Stand der Wissenschaft	3
2.2 Forschungsfragen	4
3 Grundlagen.....	7
3.1 Rahmenbedingungen.....	8
3.2 Vermarktungsmöglichkeiten.....	8
4 Methodik	13
4.1 Stromintensive Prozesse	17
4.1.1 Geeignete Anlagen	17
4.1.2 Technisches Potenzial.....	18
4.1.3 Zeitliche Verfügbarkeit	22
4.1.4 Räumliche Verfügbarkeit	22
4.1.5 Kosten.....	23
4.1.6 Zukünftige Entwicklung.....	33
4.2 Querschnittstechnologien	34
4.2.1 Geeignete Anlagen	34
4.2.2 Akzeptiertes Potenzial	35
4.2.3 Zeitliche Verfügbarkeit	44
4.2.4 Räumliche Verfügbarkeit	45
4.2.5 Kosten.....	47
4.2.6 Zukünftige Entwicklung.....	48
4.3 Beitrag industrieller Flexibilitäten zum Engpassmanagement	51
5 Zeitlich und regional aufgelöstes Lastflexibilisierungspotenzial	53
5.1 Stromintensive Prozesse	53
5.1.1 Geeignete Anlagen	53
5.1.2 Technisches Potenzial.....	55
5.1.3 Zeitliche Verfügbarkeit	60
5.1.4 Räumliche Verfügbarkeit	64
5.1.5 Kosten.....	69

5.1.6	Zukünftige Entwicklung.....	77
5.2	Querschnittstechnologien	85
5.2.1	Geeignete Anlagen	85
5.2.2	Akzeptiertes Potenzial	89
5.2.3	Zeitliche Verfügbarkeit	95
5.2.4	Räumliche Verfügbarkeit	104
5.2.5	Kosten.....	107
5.2.6	Zukünftige Entwicklung.....	114
6	Anwendungsfall Engpassmanagement	121
6.1	Redispatch	121
6.1.1	Beitrag stromintensiver Prozesse	125
6.1.2	Beitrag von Querschnittstechnologien	126
6.2	Einspeisemanagement	128
6.2.1	Beitrag stromintensiver Prozesse	130
6.2.2	Beitrag von Querschnittstechnologien	131
7	Zusammenfassung und Fazit.....	133
8	Weiterer Forschungsbedarf	135
9	Anhang.....	137
10	Literaturverzeichnis.....	139

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	<i>Betriebliches Lastmanagement in den 1980er Jahren</i>	3
Abbildung 3-1:	<i>Möglichkeiten zur Beeinflussung des Verbraucherlastgangs</i>	7
Abbildung 4-1:	<i>Methodik und Ergebnisse zur Potenzial- und Kostenermittlung industrieller Lastflexibilisierung</i>	14
Abbildung 4-2:	<i>Abgrenzung der Potenzialbegriffe</i>	15
Abbildung 4-3:	<i>Stromverbrauch und Stromintensität ausgewählter Branchen im Jahr 2010</i>	17
Abbildung 4-4:	<i>Methodik zur Lastverschiebe-Potenzialermittlung bei stromintensiven Prozessen</i>	19
Abbildung 4-5:	<i>Ableitung der regionalen Verteilung des Lastverschiebepotenzials bei stromintensiven Prozessen</i>	23
Abbildung 4-6:	<i>Mögliche Einflüsse auf den mittleren jährlichen Wirkungsgrad durch Flexibilisierung von Anlagen</i>	25
Abbildung 4-7:	<i>Vereinfachter Zusammenhang der Kosten, des Preises und der Gewinnmarge für industrielle Produkte</i>	28
Abbildung 4-8:	<i>Strombezug eines Unternehmens mit stromintensiven Prozessen und anfallende Kosten</i>	30
Abbildung 4-9:	<i>Strombezug eines Unternehmens mit stromintensiven Prozessen und anfallende Kosten im Fall eines Abrufs von Flexibilität</i>	31
Abbildung 4-10:	<i>Struktur der Kosten und Erlöse, Deckungsbeitrag und Opportunitätskosten</i>	31
Abbildung 4-11:	<i>Methodik zur Ermittlung des akzeptierten Lastflexibilisierungspotenzials industrieller Querschnittstechnologien</i>	36
Abbildung 4-12:	<i>Detaillierte Methodik zur Ermittlung des akzeptierten Lastflexibilisierungspotenzials von Querschnittstechnologien je Branchengruppe</i>	37
Abbildung 4-13:	<i>Aufteilung des Stromverbrauchs nach Anwendungsarten am Beispiel des Maschinen- und Fahrzeugbaus für das Jahr 2012</i>	39
Abbildung 4-14:	<i>Mittlere Last in Abhängigkeit des Betriebszustands am Beispiel eines Tageslastgangs eines Unternehmens</i>	40
Abbildung 4-15:	<i>Exemplarische Einteilung der Jahresdauerlinie in verschiedene Betriebszustände</i>	41
Abbildung 4-16:	<i>Stromverbrauch der Industrie nach Bundesländern und Branchengruppen für das Jahr 2012</i>	46
Abbildung 4-17:	<i>Methodik zur Ermittlung der Auswirkungen von Energieeffizienzmaßnahmen auf das Lastflexibilisierungspotenzial von Querschnittstechnologien</i>	49
Abbildung 4-18:	<i>Methodik zur Ermittlung des Elektrifizierungspotenzials brennstoffbasierter Prozesswärmeerzeugung</i>	50
Abbildung 5-1:	<i>Typischer Lastverlauf eines Lichtbogenofens während einer Einkorbcharge</i>	58
Abbildung 5-2:	<i>Regionales positives Lastflexibilisierungspotenzial der Primäraluminiumelektrolyse in der Nichteisen-Metallerzeugung (links) sowie der Elektrolichtbogenöfen in der Metallerzeugung (rechts)</i>	64

Abbildung 5-3:	<i>Häufigkeitsverteilung der positiven Leistungsbereitstellung von Lichtbogenöfen je Standort.....</i>	65
Abbildung 5-4:	<i>Häufigkeitsverteilung der positiven Leistungsbereitstellung von Roh- und Zementmühlen je Standort</i>	66
Abbildung 5-5:	<i>Regionales positives Lastflexibilisierungspotenzial der Roh- und Zementmühlen (links) in der Zementindustrie sowie der Holzschleifer und Refiner in der Papierindustrie (rechts).....</i>	67
Abbildung 5-6:	<i>Regionales positives Lastflexibilisierungspotenzial der Chlor-Alkali-Elektrolyse in der Chemieindustrie (links) sowie aller betrachteten stromintensiven Prozesse (rechts)</i>	68
Abbildung 5-7:	<i>Regionales negatives Lastflexibilisierungspotenzial aller betrachteten stromintensiven Prozesse</i>	69
Abbildung 5-8:	<i>Opportunitätskosten stromintensiver Prozesse in Abhängigkeit der Kostenstruktur</i>	72
Abbildung 5-9:	<i>Veränderung des jährlichen Gesamtwirkungsgrades der Aluminium- und Chlorelektrolyse sowie des Elektrolichtbogenofens bei Vermarktung positiver Leistung.....</i>	75
Abbildung 5-10:	<i>Veränderung des jährlichen Gesamtwirkungsgrades der Aluminium- und Chlorelektrolyse sowie des Elektrolichtbogenofens bei Vermarktung negativer Leistung</i>	76
Abbildung 5-11:	<i>Produktionsentwicklung bis 2030</i>	78
Abbildung 5-12:	<i>Entwicklung des spez. Stromeinsatzes bis 2030.....</i>	79
Abbildung 5-13:	<i>Endenergieverbrauch zur Prozesswärmeerzeugung im Ist-Zustand und durch Elektrifizierung bzw. Hybridisierung.....</i>	84
Abbildung 5-14:	<i>Ergebnisse der Interviews: Nennung der zur Lastflexibilisierung geeigneten Querschnittstechnologien</i>	88
Abbildung 5-15:	<i>Aufteilung des Stromverbrauchs nach Anwendungsarten am Beispiel des Maschinen- und Fahrzeugbaus</i>	90
Abbildung 5-16:	<i>Aufteilung des Stromverbrauchs nach Anwendungsarten am Beispiel des Maschinen- und Fahrzeugbaus nach /ISI-03 13/ und der Auswertung der FfE-Daten</i>	90
Abbildung 5-17:	<i>Installierte Leistung je Branche und Querschnittstechnologie bezogen auf den Gesamtstromverbrauch</i>	91
Abbildung 5-18:	<i>Mittlere Last der Druckluftkompressoren bezogen auf die installierte Leistung in Abhängigkeit des Betriebszustands am Beispiel des Maschinen- und Fahrzeugbaus</i>	92
Abbildung 5-19:	<i>Mögliche Lasterhöhung und –reduktion je Querschnittstechnologie, bezogen auf die Nennleistung (Normalbetrieb)</i>	93
Abbildung 5-20:	<i>Positives Lastflexibilisierungspotenzial von QST ohne Zeitbezug (Normalbetrieb).....</i>	94
Abbildung 5-21:	<i>Negatives Lastflexibilisierungspotenzial von QST ohne Zeitbezug (Normalbetrieb).....</i>	94
Abbildung 5-22:	<i>Maximale Abrufdauer für Lastflexibilisierungsmaßnahmen: Antworten der Befragung in /FFE-09 13/</i>	95
Abbildung 5-23:	<i>Angaben der befragten Unternehmen zur Abschaltdauer bei Querschnittstechnologien</i>	96
Abbildung 5-24:	<i>Abschaltbare Leistung durch Flexibilisierung von Querschnittstechnologien in Deutschland (Normalbetrieb) in Abhängigkeit der Abrufdauer – akzeptiertes Potenzial</i>	98

Abbildung 5-25: <i>Zuschaltbare Leistung durch Flexibilisierung von Querschnittstechnologien in Deutschland (Normalbetrieb) in Abhängigkeit der Abrufdauer – akzeptiertes Potenzial</i>	99
Abbildung 5-26: <i>Mittlere Last bezogen auf die installierte Leistung in Abhängigkeit des Betriebszustands je Querschnittstechnologie (dargestellt ist jeweils der Mittelwert über alle Branchen)</i>	101
Abbildung 5-27: <i>Abschaltbare Leistung durch Flexibilisierung von Querschnittstechnologien in Deutschland (reduzierter Betrieb) in Abhängigkeit der Abrufdauer – akzeptiertes Potenzial</i>	102
Abbildung 5-28: <i>Abschaltbare Leistung durch Flexibilisierung von Querschnittstechnologien in Deutschland (Sonntagnachmittag) in Abhängigkeit der Abrufdauer – akzeptiertes Potenzial</i>	102
Abbildung 5-29: <i>Zuschaltbare Leistung durch Flexibilisierung von Querschnittstechnologien in Deutschland (reduzierter Betrieb) in Abhängigkeit der Abrufdauer – akzeptiertes Potenzial</i>	103
Abbildung 5-30: <i>Zuschaltbare Leistung durch Flexibilisierung von Querschnittstechnologien in Deutschland (Sonntagnachmittag) in Abhängigkeit der Abrufdauer – akzeptiertes Potenzial</i>	103
Abbildung 5-31: <i>Maximal abschaltbares Potenzial bei Querschnittstechnologien über eine Stunde am Werktag</i>	105
Abbildung 5-32: <i>Maximal zuschaltbares Potenzial bei Querschnittstechnologien über eine Stunde am Werktag</i>	106
Abbildung 5-33: <i>Investitionen für die Erschließung der Flexibilität von Querschnittstechnologien (Befragung von Unternehmen mit stromintensiven Prozessen und Querschnittstechnologien)</i>	107
Abbildung 5-34: <i>Abschätzung der Investitionen für die Erschließung</i>	108
Abbildung 5-35: <i>Ausschnitt aus den spezifischen Investitionen für die Erschließung der Flexibilität von Querschnittstechnologien in Abhängigkeit der Anzahl an Anlagen</i>	108
Abbildung 5-36: <i>Quantifizierung der jährlichen fixen Betriebskosten (vor allem Personalkosten)</i>	109
Abbildung 5-37: <i>Veränderung des Gesamtwirkungsgrades von Ventilatoren, Pumpen und Druckluftkompressoren bei Vermarktung positiver Leistung</i>	112
Abbildung 5-38: <i>Veränderung des Gesamtwirkungsgrades von Pumpen und Druckluftkompressoren bei Vermarktung negativer Leistung</i>	113
Abbildung 5-39: <i>Endenergieverbrauch zur Raumwärme- und Warmwassererzeugung im Ist-Zustand und durch Elektrifizierung bzw. Hybridisierung</i>	118
Abbildung 6-1: <i>Gemeldete Redispatch-Einsätze der Übertragungsnetzbetreiber in Deutschland im Jahr 2015</i>	122
Abbildung 6-2: <i>Häufigkeitsverteilung der Dauer (oben) sowie der mittleren Leistung (unten) je Redispatch-Einsatz im Jahr 2015</i>	123
Abbildung 6-3: <i>Redispatcharbeit in Deutschland je Kraftwerk für das Jahr 2015 und positives Lastverschiebepotenzial stromintensiver Prozesse</i>	124
Abbildung 6-4: <i>Beispielhafte Reduzierung eines positiven Redispatchabrufes durch Flexibilisierung stromintensiver Prozesse in der dena-Netzregion 72</i>	125
Abbildung 6-5: <i>Beispielhafte Reduzierung eines positiven Redispatchabrufes durch Flexibilisierung industrieller Querschnittstechnologien in der dena-Netzregion 72</i>	127

Abbildung 6-6:	<i>Häufigkeitsverteilung der Dauer (oben) sowie mittleren Leistung (unten) je Einspeisemanagementeinsatz im Jahr 2015.....</i>	129
Abbildung 6-7:	<i>Netzgebiete mit regional verortbaren Einspeisemanagementmaßnahmen und Ausfallarbeit durch Einspeisemanagement im Jahr 2015</i>	130
Abbildung 9-1:	<i>dena-Netzregionen</i>	137

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	<i>Vermarktungsmöglichkeiten industrieller Flexibilitäten</i>	10
Tabelle 4-1:	<i>Flexibilisierbare Systemkomponenten stromintensiver Einzelprozesse</i>	18
Tabelle 4-2:	<i>Kostenarten für Erschließung und Betrieb von Lastflexibilisierungsmaßnahmen in der Industrie</i>	24
Tabelle 4-3:	<i>Betriebszustände von Anlagen bei der Vermarktung von Flexibilität</i>	25
Tabelle 4-4:	<i>Variation von Vorhaltezeit und jährlicher Abrufdauer</i>	26
Tabelle 4-5:	<i>Flexibilisierbare Systemkomponenten von Querschnittstechnologien</i>	34
Tabelle 4-6:	<i>Zuordnung von Wirtschaftszweigen zu Branchengruppen</i>	38
Tabelle 5-1:	<i>Stromintensive Prozesse: verwendete Parameter für die Potenzialermittlung</i>	56
Tabelle 5-2:	<i>Flexibilisierbarer Anteil stromintensiver Prozesse bezogen auf die mittlere Last</i>	57
Tabelle 5-3:	<i>Positives und negatives Lastflexibilisierungspotenzial stromintensiver Prozesse im Falle der Lastverschiebung für das Jahr 2012</i>	58
Tabelle 5-4:	<i>Positives Lastflexibilisierungspotenzial stromintensiver Prozesse im Falle eines Produktionsausfalles für das Jahr 2012</i>	60
Tabelle 5-5:	<i>Auszug aus der Literatur zu variablen Kosten stromintensiver Prozesse</i> ..	70
Tabelle 5-6:	<i>Typische Betriebsweise stromintensiver Prozesse und Änderung der Betriebsweise bei Vermarktung von Flexibilität</i>	73
Tabelle 5-7:	<i>Spezifischer Stromverbrauch und mittlere Leistungsaufnahme eines beispielhaften stromintensiven Prozesses im typischen Betriebsfall</i>	74
Tabelle 5-8:	<i>Variable Kosten stromintensiver Prozesse durch Wirkungsgradverschlechterung bei einem Abruf (Produktionsmenge entspricht der typischen Produktionsmenge einer Stunde)</i>	77
Tabelle 5-9:	<i>Entwicklung des Lastflexibilisierungspotenzials stromintensiver Prozesse bei Lastverschiebung bis 2030</i>	80
Tabelle 5-10:	<i>Entwicklung des positiven Lastflexibilisierungspotenzials stromintensiver Prozesse bei Produktionsausfall bis 2030</i>	80
Tabelle 5-11:	<i>Elektrothermische Verfahren sowie deren Eignung hinsichtlich Flexibilisierung - Teil 1</i>	82
Tabelle 5-12:	<i>Elektrothermische Verfahren sowie deren Eignung hinsichtlich Flexibilisierung - Teil 2</i>	83
Tabelle 5-13:	<i>Leistung und Energie zur Kälteerzeugung in der Industrie</i>	86
Tabelle 5-14:	<i>Mittlere Abrufdauer je Querschnittstechnologie bei Erbringung positiver oder negativer Leistung</i>	97
Tabelle 5-15:	<i>Mittlere Sperrzeit je Querschnittstechnologie bei Erbringung positiver oder negativer Leistung</i>	100
Tabelle 5-16:	<i>Typische Betriebsweise von Querschnittstechnologien und Änderung der Betriebsweise bei Vermarktung von Flexibilität</i>	110
Tabelle 5-17:	<i>Volumenstrom und Leistungsaufnahme im typischen Betriebsfall sowie bei Lastflexibilisierung ausgewählter Querschnittstechnologien</i>	111
Tabelle 5-18:	<i>Variable Kosten von Querschnittstechnologien durch Wirkungsgradverschlechterung bei einem Abruf (Produktionsmenge entspricht der typischen Produktionsmenge einer Stunde)</i>	114

Tabelle 5-19:	<i>Stromverbrauch nach Realisierung verschiedener Energieeffizienzmaßnahmen je Querschnittstechnologie bis 2020.....</i>	114
Tabelle 5-20:	<i>Einfluss von Energieeffizienzmaßnahmen auf die maximale Leistungsaufnahme einer ungeregelten Anlage</i>	115
Tabelle 5-21:	<i>Veränderung des Lastflexibilisierungspotenzials durch Energieeffizienzmaßnahmen bis 2030</i>	116
Tabelle 5-22:	<i>Lastflexibilisierungspotenzial von Querschnittstechnologien in Deutschland bis 2030 (Normalbetrieb)</i>	117
Tabelle 5-23:	<i>Entwicklung der spezifischen Investitionen bis 2030.....</i>	119
Tabelle 6-1:	<i>Reduzierung des Redispatchaufkommens durch Flexibilisierung stromintensiver Prozesse</i>	126
Tabelle 6-2:	<i>Reduzierung des Redispatchaufkommens durch Flexibilisierung industrieller Querschnittstechnologien.....</i>	128
Tabelle 6-3:	<i>Reduzierung des Einspeisemanagementaufkommens durch Flexibilisierung stromintensiver Prozesse</i>	131
Tabelle 6-4:	<i>Reduzierung des Einspeisemanagementaufkommens durch Flexibilisierung industrieller Querschnittstechnologien.....</i>	132

Abkürzungen, Formelzeichen und Indizes

Δ	Delta	KKM	Kompressionskältemaschine
a	Jahr	Kr	Kraftübertragung
AbLaV	Verordnung zu abschaltbaren Lasten	KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
abruf	Abruf	LEEN	Lernende Energieeffizienz-Netzwerke
AKM	Absorptionskältemaschine	m	Menge
AP2	Veränderter Arbeitspunkt durch Flexibilitätsvermarktung	ma	Material
b	Betriebszustand	max	maximal
BS	Betriebsstunden	mech	mechanisch
BWS	Bruttowertschöpfung	min	minimal
c	zusätzliche Kostenanteile für Strom (Steuern, Abgaben, Umlagen)	n	Anzahl Unternehmen
d	Anteil der Gewinnmarge	nach	Nachholen
DB	Deckungsbeitrag	NB	Normalbetrieb
dena	Deutsche Energieagentur	NEA	Netzersatzanlage
E	spezifischer Energieverbrauch	neg	negativ
e	Energieverbrauch	NT	Niedertarif
EDV	Elektronische Datenverarbeitung	\emptyset	mittlere
EEX	European Energy Exchange	OK	Opportunitätskosten
eex	Großhandelspreis Strom	P	Leistung
el	elektrisch	pos	positiv
en	Energie (ohne Strom)	Pr	Preis
E-Potenzial	Elektrifizierungspotenzial	prod	produziert
EVU	Energieversorgungsunternehmen	proz	gesamter Produktionsprozess
f	Auslastung (mittlere Last bezogen auf installierte Leistung)	QST	Querschnittstechnologie
FfE e.V.	Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.	RB	reduzierter Betrieb
FfE GmbH	Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH	s	stromintensiver Prozess
fix	fix	SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
flex	flexibilisierbar	StromNEV	Stromnetzentgeltverordnung
G	Gewinnmarge	t	Zeit
ges	gesamt	TMP	Thermo Mechanical Pulp
GL	Grundlast	u	installierte Leistung bezogen auf den Gesamtstromverbrauch
h	Stunden	USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
i	Branche	v	variabel
inst	installiert	vor	Vorhalten
j	Unternehmen	y	Auslastungsfaktor
K	Kosten	z	flexibilisierbarer Anteil
k	Anteil	η	Wirkungsgrad
Kap	Kapazität	\dot{V}	Volumenstrom

1 Einleitung

Durch den stetig zunehmenden Ausbau der Erneuerbaren Energien steigt der fluktuierende Anteil an der Stromerzeugung. Die Bedarfsdeckung erfolgte bis vor einigen Jahren vor allem durch konventionelle Kraftwerke, welche ihre Erzeugungsleistung dem schwankenden Verbrauch anpassten. Die volatilere Erzeugung führt nun zu erhöhten Anforderungen an die Flexibilität auf der Erzeugungsseite.

Eine weitere Möglichkeit, die fluktuierende Erzeugung besser zu integrieren, kann der Ausbau diverser Funktionaler Speichertechnologien¹ sein. Ein Beispiel hierfür ist unter anderem die flexible Betriebsweise von Verbrauchern. Im Haushaltsbereich sind einige Geräte bereits mit einer intelligenten Steuerung ausgerüstet, um beispielsweise auf flexible Stromtarife reagieren zu können. Im Vergleich dazu existieren in der Industrie Verbraucher mit deutlich höheren Leistungen, die ebenfalls für eine flexible Betriebsweise genutzt werden können. Allerdings ist bisher nicht eindeutig geklärt, welche industrielle Flexibilitäten in welchem Umfang genutzt werden können. Dazu bedarf es zunächst einer Identifikation und Auswahl geeigneter Anlagen. Diese müssen anschließend anhand verschiedener technischer und ökonomischer Aspekte parametrisiert werden. Anhand dieser Kriterien können mögliche Anwendungsfälle bzw. Einsatzoptionen der Flexibilitäten untersucht werden.

Die Arbeit beinhaltet daher zum einen die Entwicklung von Methoden zur Potenzialermittlung bei stromintensiven Prozessen und Querschnittstechnologien². Berücksichtigung finden dabei verschiedene Parameter, wie beispielsweise Abrufdauer, Abrufhäufigkeit sowie tageszeitliche, typtagesabhängige und saisonale Unterschiede. Eine Besonderheit ist die regionale Darstellung der Potenziale auf Landkreisebene. Zum anderen werden Methoden zur Bestimmung der Kosten für die Erschließung und Vermarktung von Flexibilität erarbeitet. Damit ist es im Anschluss möglich, eine wirtschaftliche Betrachtung durchzuführen und die industrielle Lastflexibilisierung so mit Alternativen zu vergleichen. Abschließend wird der mögliche Beitrag industrieller Flexibilitäten zu einer Einsatzoption quantifiziert.

¹ „Alle gezielten Modifikationen der Leistungsgänge von Stromverbrauch und zunächst unflexibler Stromerzeugung zur Anpassung von Nachfrage und Erzeugung können als Funktionale Energiespeicher verstanden werden. Die Differenz zwischen unflexiblen und flexibilisiertem Leistungsgang entspricht einer Be- bzw. Entladung des Funktionalen Energiespeichers.“ /FFE-04 16/.

² „Als Querschnittstechnologien bezeichnet man jene Technologien, deren Anwendung sich nicht auf einen bestimmten Wirtschaftszweig beschränkt, sondern die über alle Branchen hinweg zum Einsatz kommen. So gehören z.B. Pumpen, Kompressoren, Verdichter und Ventilatoren zu den Querschnittstechnologien, da ihre Anwendungsbereiche branchen- und technologieübergreifend sind.“ /FFE-38 11/.

2 Untersuchungsgegenstand

Im Fokus der Arbeit stehen industrielle Anlagen, welche ihre Leistung aufgrund externer Signale kurzfristig verändern und so gegebenenfalls einen Beitrag dazu leisten können, den Verbrauch besser an die fluktuierende Erzeugung anzupassen.

Einführend beinhaltet der Stand der Wissenschaft generelle Möglichkeiten der Lastflexibilisierung, darüber hinaus wird zusammengefasst, inwiefern das Thema bereits in wissenschaftlichen Studien untersucht wurde und wo noch Forschungsbedarf besteht. Auf dieser Basis werden Forschungsfragen formuliert, welche im Rahmen der Arbeit beantwortet werden.

2.1 Stand der Wissenschaft

Das Lastmanagement im klassischen Sinne war bereits in den 80er Jahren des 20. Jahrhunderts bekannt und wurde in der Industrie zur Spitzenlastglättung eingesetzt. Dazu wurden einzelne Verbraucher zu Spitzenlastzeiten abgeschaltet und in Zeiten mit geringerer Last verschoben (vgl. **Abbildung 2-1**). Ziel war damals vor allem die betriebsinterne Optimierung bzw. Stromkostensenkung. Eine Verringerung der Spitzenlast hatte eine Reduzierung der Strombezugskosten zur Folge, da für die Berechnung des Leistungspreises nur die maximal bezogene Leistung zugrunde gelegt wurde.

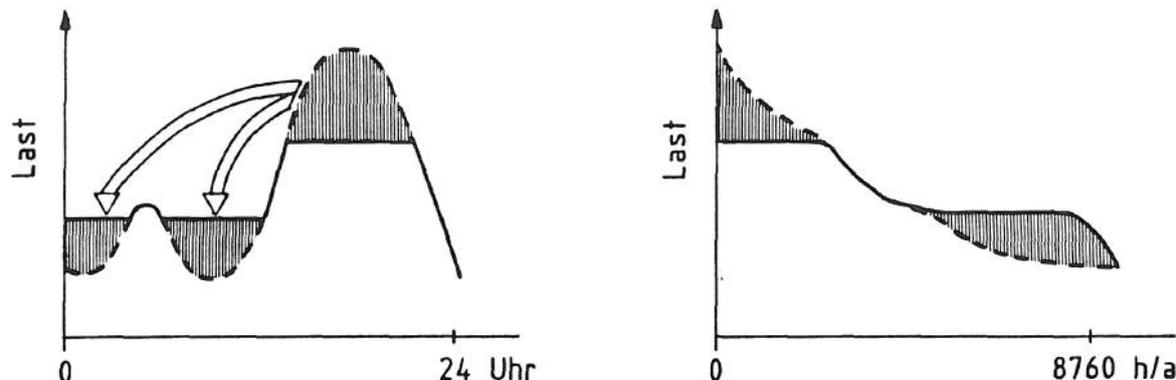


Abbildung 2-1: *Betriebliches Lastmanagement in den 1980er Jahren /FFE-01 89/*

Das betriebliche Lastmanagement wird auch heute noch in einigen Unternehmen praktiziert, da sich die grundsätzlichen Rahmenbedingungen der Stromtarife nicht verändert haben. Es werden weiterhin ein Leistungspreis für die Leistungsvorhaltung sowie ein Arbeitspreis für die bezogene Energiemenge bezahlt.

Eine weitere Möglichkeit, die Stromkosten möglichst gering zu halten, bietet die atypische oder intensive Netznutzung nach §19 StromNEV (Stromnetzentgeltverordnung). Erfüllt das Unternehmen die Bedingungen einer der beiden Varianten, muss ein deutlich geringeres Netzentgelt bezahlt werden. Während die intensive Netznutzung nur von Betrieben mit mindestens 7.000 Vollbenutzungsstunden beantragt werden kann, muss bei der atypischen Netznutzung der Leistungsbezug in den vom

Netzbetreiber festgelegten Hochlastzeitfenstern um einen definierten Betrag, abhängig von der Netzebene und der Jahreshöchstlast, reduziert werden /STROMNEV-01 13/. Um im Hochlastzeitfenster unterhalb des Schwellenwerts zu bleiben, werden Anlagen teilweise flexibel betrieben.

Während der Fokus bisher überwiegend auf der innerbetrieblichen Optimierung bzw. Kostensenkung lag, gibt es bereits einzelne Betriebe, welche ihre flexibilisierbaren Anlagen auch für Systemdienstleistungen zur Verfügung stellen. Beispielsweise werden vermehrt industrielle Flexibilitäten auf dem Regelleistungsmarkt angeboten. Dies dient aus Systemsicht der Frequenzhaltung, aus Betriebssicht werden durch die Vorhaltung und den Abruf der Anlagen Erlöse generiert. In Deutschland werden derzeit überwiegend stromintensive Prozesse für die Vermarktung genutzt, eine Flexibilisierung von Querschnittstechnologien bieten nur wenige Unternehmen an.

In verschiedenen Untersuchungen und Studien, wie beispielsweise /ETH-01 07/, /DENA-07 10/, /TUD-03 12/ oder /VDE-01 12/, wurde das Lastflexibilisierungspotenzial stromintensiver Prozesse bereits ermittelt, jedoch unterscheiden sich die Ergebnisse teilweise deutlich voneinander. Gründe hierfür sind beispielsweise die Verwendung diverser Potenzialbegriffe (theoretisch, technisch, wirtschaftlich, akzeptiert oder realisiert), unterschiedliche Methoden zur Potenzialermittlung, variierende Flexibilitätsfaktoren oder verschiedene Gesamtstromverbräuche je Produkt. Dies hat zum einen verschieden hohe flexibilisierbare Leistungen zur Folge, zum anderen unterscheiden sich die tatsächlich nutzbaren Energiemengen aufgrund der angesetzten Abrufdauer und –häufigkeit ebenfalls teilweise erheblich.

Begriffsdefinition

Die im Folgenden im Zusammenhang mit industriellen Anlagen verwendeten Begriffe „(Last-)Flexibilisierung“ und „Flexibilität“ werden synonym verwendet und beschreiben die Veränderung der Last eines Verbrauchers als Reaktion auf ein externes Signal. Der Begriff „flexibilisierbar“ implementiert die Möglichkeit einer Veränderung der Last. In beiden Fällen ist eine Erschließung der Flexibilität und somit das Schaltbarmachen der Anlagen zu diesem Zeitpunkt bereits erfolgt.

2.2 Forschungsfragen

Einleitend wurde bereits der Wandel von einer an den Verbrauch angepassten zu einer je nach Wetterlage fluktuierenden Stromerzeugung beschrieben. Eine der einfachsten Möglichkeiten, Erzeugung und Verbrauch möglichst in Einklang zu bringen, ist die Anpassung der Last an die Erzeugung. Das betriebliche Lastmanagement ist, wie bereits erwähnt, in einigen Unternehmen bereits etabliert und kann nun um eine externe Ansteuerung erweitert werden. Dadurch wird es industriellen Verbrauchern ermöglicht, auf externe Signale zu reagieren. Allerdings wurde bisher nicht untersucht, wie hoch ein möglicher Beitrag dieser Anlagen sein kann. Daher ergibt sich für diese Arbeit folgende zentrale Forschungsfrage:

- Welchen konkreten Beitrag können industrielle Flexibilitäten zur verstärkten Integration Erneuerbarer Energien leisten?

Obwohl für stromintensive Prozesse bereits Potenzialermittlungen existieren, unterscheiden sich diese zum Teil deutlich voneinander. Zudem wurden bisher nur Gesamtpotenziale für Deutschland insgesamt ausgewiesen. Eine regionale Betrachtung fand bisher nicht statt.

Des Weiteren ist nicht bekannt, wie hoch das Potenzial im Bereich der Querschnittstechnologien ist und welche Anlagen für eine Flexibilisierung tatsächlich geeignet sind. Daher werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit folgende vier Aspekte im Detail untersucht:

- Welche Technologien stehen für industrielles Lastmanagement in welchen Regionen zur Verfügung?
- Welches sind die relevanten technischen und ökonomischen Kennwerte der einzelnen Technologien?
- Für welche Anwendungsfälle können die jeweiligen Technologien geeignet sein?
- Wie hoch ist der mögliche Beitrag industrieller Flexibilitäten auf regionaler Ebene?

3 Grundlagen

Unter dem Begriff Lastflexibilisierung bzw. Demand Response wird „....eine kurzfristige und planbare Veränderung der Verbraucherlast als Reaktion auf Preissignale im Markt oder auf eine Aktivierung im Rahmen einer vertraglichen Leistungsreserve...“ verstanden. „Diese Marktpreise oder Leistungsabrufe werden durch ungeplante, unregelmäßige oder extreme energiewirtschaftliche Ereignisse ausgelöst.“ /FFE-42 10/

Die Änderung der Verbraucherlast kann durch Zu- oder Abschaltung einzelner Verbraucher oder Erzeugungsanlagen bzw. die Erhöhung oder Reduzierung derer Leistung erfolgen. Die Abschaltung oder Leistungsreduzierung von Verbrauchern bzw. das Zuschalten oder die Leistungserhöhung von Erzeugungsanlagen wird im Folgenden als positive Leistungserbringung bezeichnet. Dementsprechend gelten die Abschaltung oder Leistungsreduzierung von Erzeugungsanlagen bzw. die Zuschaltung oder Leistungserhöhung von Verbrauchern als negative Leistungserbringung.

Im Folgenden werden drei Möglichkeiten der Flexibilisierung beschrieben. Oftmals erfolgt bei der Flexibilisierung ein reines Verschieben der Last. Das bedeutet, dass bei einer Abschaltung einer Anlage oder der Reduzierung des Leistungsbezugs ein Nachholbedarf entsteht. Eine vorzeitige Zuschaltung einer Anlage oder deren Leistungserhöhung hat in diesem Fall die spätere Abschaltung oder Reduzierung des Leistungsbezugs zur Folge (vgl. **Abbildung 3-1** linke Darstellung).

In einigen Fällen wird die Leistung nur abgesenkt und es besteht kein Nachholbedarf (mittlere Darstellung). Diese Leistungsreduzierung kann jedoch unter Umständen mit Komforteinbußen, z.B. durch Reduzierung der Luftwechselrate bei Lüftungsanlagen, verbunden sein. Bei Produktionsanlagen besteht bei längeren und häufigeren Abrufen positiver Leistung die Möglichkeit, dass nicht die gesamte, geplante Produktionsmenge erzeugt werden kann, was ggf. zu einem Produktionsausfall führt.

Eine reine Lasterhöhung, wie in **Abbildung 3-1** rechts ersichtlich, ist mit einer Mehrproduktion an Ware (Produkt) oder eines Mediums (bspw. Beleuchtungsstärke, Wärme, Kälte oder Druckluft) verbunden. Diese Lasterhöhung ohne anschließende Absenkung wird nicht als Möglichkeit zur Flexibilisierung eingestuft, sofern durch die Überproduktion kein entsprechender Mehrwert durch den erhöhten Stromverbrauch generiert wird.

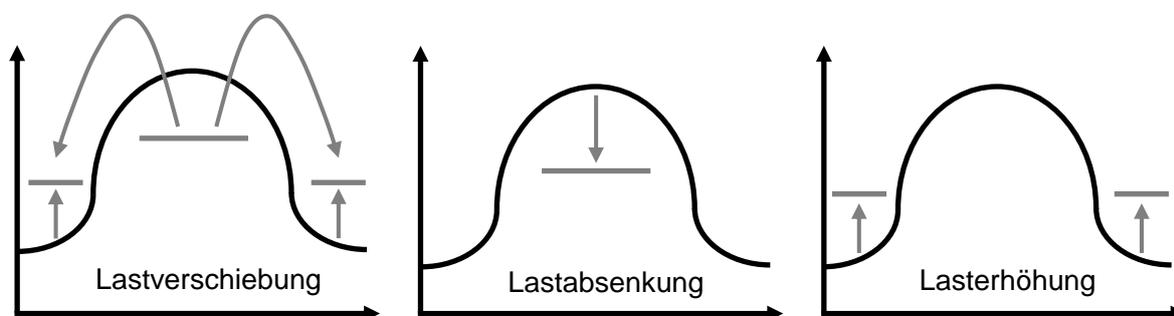


Abbildung 3-1: Möglichkeiten zur Beeinflussung des Verbraucherlastgangs in Anlehnung an /WOB-01 05/

3.1 Rahmenbedingungen

Eine Flexibilisierung von Verbrauchern oder Erzeugungsanlagen in der Industrie ist nicht ohne Einschränkungen möglich. Das primäre Ziel von Unternehmen ist die Produktion von Waren und Gütern, welche nicht eingeschränkt werden soll. Die Lastflexibilisierung führt zu einem Sekundärnutzen und soll nur aktiviert werden, wenn das primäre Ziel nicht beeinflusst wird. Im Folgenden werden Rahmenbedingungen definiert, welche erfüllt sein müssen, um die Flexibilität nutzen zu können.

- Durch die veränderte Fahrweise der Anlage darf kein Produktionsausfall entstehen. Auch darf keine Beeinflussung der Produktionsleistung bzw. der Produktqualität stattfinden.
- Kommt es am Ende eines definierten Zeitraumes doch zu einem Produktionsausfall bzw. zu einer Minderproduktion, muss dies bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durch den Ansatz von Opportunitätskosten durch die entgangenen Erlöse ausgeglichen werden.
- Die Flexibilisierung von Anlagen muss einen Mehrwert generieren. Werden beispielsweise Geräte zugeschaltet, müssen diese eine Speichermöglichkeit aufweisen. Beispielsweise ist eine reine Erhöhung der Beleuchtungsstärke oder der Luftwechselrate ohne Speicherwirkung nicht zulässig, da dadurch lediglich ein Mehrverbrauch generiert wird.
- Bewertung von Effizienzmaßnahmen: Führt die Änderung des Betriebspunkts einer Anlage dauerhaft zu einer spezifischen Verbrauchsminderung, wird dies als Effizienzmaßnahme angesehen und nicht als zusätzliche Flexibilität gewertet.

3.2 Vermarktungsmöglichkeiten

Industrielle Verbraucher und Erzeugungsanlagen können für verschiedene Vermarktungsmöglichkeiten genutzt werden. Bei der innerbetrieblichen Optimierung steht die Kostenreduzierung des Unternehmens im Fokus, während durch externe Signale hervorgerufene Laständerungen systemdienlich³ sind. Im folgenden Abschnitt ist dargestellt, welche Vermarktungsmöglichkeiten aus Unternehmens- sowie aus Systemsicht bestehen.

(Spitzen-)Lastmanagement

Wie bereits eingangs beschrieben, werden flexibilisierbare Anlagen innerbetrieblich dazu eingesetzt, Spitzenlasten zu vermeiden bzw. zu reduzieren, um den Leistungspreis möglichst gering zu halten. Zudem können diese Maschinen⁴ dazu eingesetzt werden, das Lastprofil so anzupassen, dass individuelle Netznutzungsentgelte beantragt werden können. Dazu muss eine atypische oder intensive Netznutzung erzielt werden, wie in Abschnitt 2.1 beschrieben. Die Verschiebung einzelner Verbraucher in Niedertarifzeiten (NT-Zeit) ist heute nicht mehr sehr verbreitet, da Verträge mit Hoch- und Niedertarif-Unterscheidung nicht mehr üblich sind.

³ Ein systemdienlicher Einsatz bedeutet, einen Beitrag zur Erfüllung des energiewirtschaftlichen Zieldreiecks, bestehend aus Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit, zu leisten.

⁴ Der Begriff Maschine wird im Rahmen der Arbeit analog zu Anlagen verwendet.

Spotmarkt (Day-Ahead, Intraday)

Eine Flexibilisierung aufgrund äußerer Signale erfolgt beispielsweise, wenn industrielle Lasten in Abhängigkeit der Preise an den Spotmärkten Day-Ahead und Intraday zu- und abgeschaltet werden.

Da die Anforderungen für die Teilnahme am Spotmarkt im Vergleich zu anderen Vermarktungsmöglichkeiten gering sind, ist eine Teilnahme sowohl für Prozesse als auch für Querschnittstechnologien an diesen Märkten einfach.

Beispielsweise können Produktionsprozesse mit hohen Lasten teilweise in Zeiten mit günstigeren Preisen verschoben werden, wie es in der Vergangenheit z.B. in der Zementherstellung der Fall war. Als Beispiel bei Querschnittstechnologien kann die nächtliche Beladung von Kältespeichern mittels Kältemaschinen genannt werden.

Regelleistungsmarkt

Werden flexibilisierbare Anlagen vermarktet, nehmen diese derzeit nahezu ausschließlich an den Regelleistungsmärkten teil. Meist sind es stromintensive Anlagen, welche sich für eine Teilnahme präqualifiziert haben. Je nach Höhe der schaltbaren Leistung werden sie allein oder in einem Pool⁵ vermarktet. Vereinzelt werden auch Querschnittstechnologien am Regelleistungsmarkt angeboten. Der größte Teil der Anlagen liefert Sekundärregelleistung oder Minutenreserve. Nur in Ausnahmefällen erfüllen einzelne Verbraucher die Anforderungen an die Bereitstellung von Primärregelleistung. Die Vermarktungsstrategie ist je nach Anlage unterschiedlich. Während bei stromintensiven Prozessen die Anzahl an Abrufen tendenziell möglichst gering gehalten wird, um die Produktion nicht zu beeinflussen, können Querschnittstechnologien in der Regel häufiger abgerufen werden, da durch deren Aktivierung in der Regel keine direkte Beeinträchtigung der Produktion entsteht.

Engpassmanagement (Redispatch⁶, Einspeisemanagement⁷)

Durch flexibilisierbare Verbraucher oder Erzeugungsanlagen kann auch ein Beitrag zur lokalen Netzentlastung bzw. zum Engpassmanagement geleistet werden. Liegt in einer Netzregion ein kritischer Zustand vor, können Redispatch und im Anschluss daran Einspeisemanagement Abhilfe schaffen. Als Alternative zu Redispatch mit Kraftwerken oder Einspeisemanagement bei Erneuerbare Energien Anlagen können auch

⁵ Um Sekundärregelleistung oder Minutenreserve direkt am Regelleistungsmarkt anbieten zu können, bedarf es einer schaltbaren Leistung von mindestens 5 MW. Bei einer geringeren flexibilisierbaren Leistung besteht die Möglichkeit, an einem Pool teilzunehmen /BNETZA-02 11/. Die Vermarktung übernimmt in diesem Fall ein Energieversorgungsunternehmen (EVU) oder ein Demand Response Dienstleister.

⁶ Bei Redispatchmaßnahmen handelt es sich meist um präventive Eingriffe des Übertragungsnetzbetreibers in die Erzeugungsleistung von Kraftwerken mit dem Ziel, Leitungsabschnitte vor einer Überlast zu schützen und die Versorgungssicherheit nicht zu beeinträchtigen. „Durch das Redispatch werden nun Erzeugungsanlagen in dem kritischen Zeitfenster auf der einen Seite des Netzengpasses herunter- und auf der anderen Seite hochgefahren. (...) Der Eingriff kann sowohl zur Vorbeugung als auch zur Behebung von Leistungsüberlastungen erfolgen.“ /FFE-37 13/

⁷ Einspeisemanagement ist die letzte proaktive Maßnahme des Netzbetreibers im Rahmen des Engpassmanagements. Hierbei werden Erneuerbare Energien Anlagen ab einer Leistung von mehr als 100 kW (bei Photovoltaik über 30 kW) in drei Schritten (60 %, 30 %, 0 % der Leistung /BDEW-05 08/) zwangsabgeregelt, wenn die Gefahr einer Netzüberlastung besteht, wodurch ein Engpass bei der Versorgungssicherheit entstehen würde. Das Engpassmanagement kann auch als reaktive Maßnahmen eingesetzt werden.

flexibilisierbare industrielle Anlagen eingesetzt werden. Befinden sich beispielsweise stromintensive Prozesse oder Querschnittstechnologien mit ausreichend hohen flexibilisierbaren Leistungen in unmittelbarer Nähe des Engpasses, können diese den Bedarf an Redispatch oder Einspeisemanagement aktiv verringern.

Bilanzkreisausgleich

Industrielle Flexibilitäten können außerdem für den Bilanzkreisausgleich genutzt werden. Die Anforderungen an die Flexibilitäten sind hier geringer als bei der Teilnahme am Regelleistungsmarkt, da keine Präqualifikation, keine Echtzeit-Messung oder aufwendige Kommunikationstechnologien erforderlich sind /DENA-07 10/.

Verordnung zu abschaltbaren Lasten (AbLaV)

Die Verordnung über Vereinbarungen zu abschaltbaren Lasten (AbLaV) wurde im Dezember 2012 verabschiedet. Sie dient ebenfalls zur Reduzierung von Netzengpässen bzw. zur Netzfrequenzstabilisierung und ergänzt somit das Netzengpassmanagement und den Regelleistungsmarkt. Seit der ersten Ausschreibung im Juli 2013 wurde die Mindestangebotsleistung an einem Netzknoten im Hoch- oder Höchstspannungsnetz bereits von 50 MW in einer Novellierung auf 5 MW abgesenkt, wobei Poolbildung erlaubt ist /BUN-02 12/, /ÜNB-02 16/.

Aufgrund der Tatsache, dass die Teilnahmebedingungen für Unternehmen mit geringeren Leistungen deutlich erleichtert wurden, ist zu erwarten, dass diese Vermarktungsmöglichkeit in Zukunft von mehr Betrieben genutzt wird.

Tabelle 3-1 fasst die beschriebenen Einsatzmöglichkeiten der Lastflexibilisierung in der Industrie zusammen.

Tabelle 3-1: *Vermarktungsmöglichkeiten industrieller Flexibilitäten*

Vermarktungsmöglichkeit	Stromintensive Prozesse	Querschnittstechnologien
Betriebliches Spitzenlastmanagement	Vermarktung	Vermarktung
Regelleistungsmarkt (Minutenreserve)	Vermarktung	Vereinzelt
Regelleistungsmarkt (Sekundärregelleistung)	Vermarktung	Vereinzelt
Engpassmanagement (Redispatch, Einspeisemanagement)	Möglich, jedoch bisher nicht genutzt	Möglich, jedoch bisher nicht genutzt
Bilanzkreisausgleich	Möglich, jedoch bisher nicht genutzt	Möglich, jedoch bisher nicht genutzt
Spotmarkt (Day-Ahead)	Vermarktung	Möglich, jedoch bisher nicht genutzt
Spotmarkt (Intraday)	Vermarktung	Möglich, jedoch bisher nicht genutzt
Verordnung zu abschaltbaren Lasten	Vermarktung	Möglich, jedoch bisher nicht genutzt

Bereits heute werden stromintensive Prozesse wie auch Querschnittstechnologien für das betriebliche Spitzenlastmanagement eingesetzt, teilweise werden die Anlagen auch für die atypische oder intensive Netznutzung herangezogen. Ein Teil der genannten stromintensiven Prozesse nimmt bereits aktiv am Regelleistungsmarkt (Minutenreserve, Sekundärregelleistung) oder am Spotmarkt teil. Vereinzelt werden auch Querschnittstechnologien über einen Pool am Regelleistungsmarkt angeboten.

Zukünftig besteht zudem die Möglichkeit, stromintensive Anlagen wie auch Querschnittstechnologien für den Bilanzkreisausgleich oder das Engpassmanagement zu

nutzen. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Beitrag industrieller Flexibilität auf regionaler Ebene untersucht, anschließend kann eine Aussage hinsichtlich des Beitrags zum Engpassmanagement getätigt werden.

Für ein überbetriebliches⁸ Lastmanagement werden bisher nur vereinzelt Anlagen der Querschnittstechnologien eingesetzt. Befragungen im Rahmen von /FFE-09 13/ und /DENA-01 16/ haben allerdings ergeben, dass technische Restriktionen, wie Mindestleistung, Abrufdauer oder -häufigkeit nicht allein die Hemmnisse für eine verstärkte Teilnahme am Regelleistungsmarkt oder Spotmarkt darstellen. Beispielsweise wird von vielen Unternehmen die Schaltung durch einen Externen noch kritisch gesehen. Aufgrund einer zunehmenden Anzahl an Berichten von Firmen mit positiven Erfahrungen zur Schaltung durch eine übergeordnete Stelle ist davon auszugehen, dass dieses Hemmnis zukünftig deutlich reduziert wird. Darüber hinaus kann durch Pooling von Anlagen die am Regelleistungsmarkt oder in der Verordnung für abschaltbare Lasten mittels Querschnittstechnologien angebotene Leistung noch deutlich erhöht werden. Einzelne Anlagen mit kurzen Abrufzeiten können durch das Pooling in einem Verbund verschiedener Verbraucher und Erzeugungsanlagen eine deutlich längere gesamte Abrufzeit erreichen, indem nacheinander verschiedene flexible Lasten angesteuert werden. Querschnittstechnologien werden bisher überwiegend am Markt für Minutenreserve eingesetzt, einzelne dieser Maschinen werden bereits für die Vermarktung von Sekundärregelleistung genutzt. Es ist daher davon auszugehen, dass Querschnittstechnologien zukünftig vermehrt Sekundärregelleistung anbieten, da dort noch höhere Erlöse erzielbar sind. Die Erlöse im Rahmen der AbLaV wurden zwar durch die Novellierung deutlich reduziert, aber auch hier ist zu erwarten, dass Querschnittstechnologien Teil eines Pools werden. Eine Vermarktung am Spotmarkt (Intraday, Day-Ahead) wird bereits heute praktiziert, diese wird in Zukunft zunehmen.

⁸ Als überbetriebliches Lastmanagement werden Lastflexibilisierungsmaßnahmen bezeichnet, die aufgrund eines äußeren Signals getätigt werden.

4 Methodik

Primäres Ziel der Arbeit ist die Beantwortung der Forschungsfrage *Welchen konkreten Beitrag können industrielle Flexibilitäten zur verstärkten Integration Erneuerbarer Energien leisten?* Um den Beitrag industrieller Flexibilitäten zu einer verstärkten Integration Erneuerbarer Energien quantifizieren zu können, bedarf es der Erhebung technischer und ökonomischer Kennwerte für stromintensive Prozesse und Querschnittstechnologien. Im Bereich der Einsatzoptionen wird ein Abgleich der technischen Kennwerte mit den technischen Daten der Einsatzoption Engpassmanagement vorgenommen. Hierfür wird eine Betrachtung des industriellen Lastmanagements auf Landkreisebene durchgeführt.

In **Abbildung 4-1** sind die einzelnen Arbeitsschritte zur Beantwortung der Forschungsfrage dargestellt. Die Kernelemente bilden die Methodenermittlungen zur Potenzial- und Kostenbestimmung für stromintensive Prozesse und Querschnittstechnologien (vgl. Block „Industrielle Flexibilitäten“ in **Abbildung 4-1** links). Anhand von Analysen und Auswertungen statistischer Daten sowie Unternehmensdaten kombiniert mit der Befragung von Unternehmen werden als Ergebnisse die Lastflexibilisierungspotenziale ausgewiesen. Da jedoch unterschiedliche Potenziale erhoben werden, erfolgt in einem der Methodikbeschreibung angehängten kurzen Exkurs eine Erläuterung der verschiedenen Potenzialbegriffe. Um auch die Kosten bewerten zu können, wird zu deren Erhebung eine Methodik erarbeitet. Auch hier werden zum einen vorhandene Daten aus Unternehmen sowie statistische Daten und Literaturangaben analysiert und ausgewertet. Zur Validierung werden wiederum Unternehmensbefragungen durchgeführt. Auf der Kostenseite werden zudem Wechselwirkungen zwischen Flexibilität und Energieeffizienz untersucht und bewertet. Sowohl bei der technischen Potenzialermittlung als auch bei der Kostenbestimmung wird deren zukünftige Entwicklung bis zum Jahr 2030 anhand statistischer Daten untersucht. Dazu werden Einflussfaktoren identifiziert und deren Wirkung bewertet. Dieser Teil der Methodik wird in den Kapiteln 4.1 und 4.2 beschrieben.

In Kapitel 3.2 Vermarktungsmöglichkeiten wurden bereits verschiedene Einsatzoptionen für industrielle Flexibilitäten beschrieben. Eine Vermarktung der Flexibilität am Regelleistungsmarkt, in der Verordnung zu abschaltbaren Lasten oder am Spotmarkt ist vor allem bei stromintensiven Betrieben bereits üblich, bei Querschnittstechnologien noch im Aufbau. Daher wird hier von einer Betrachtung dieser Einsatzoptionen abgesehen. Des Weiteren stellte sich heraus, dass das Engpassmanagement eine weitere Option für industrielle Flexibilitäten im Vergleich zu den bisher genutzten Vermarktungsmöglichkeiten wäre. Diese Einsatzoption wird im Folgenden ebenfalls anhand technischer und wirtschaftlicher Kriterien analysiert (vgl. Block „Einsatzoptionen“ in **Abbildung 4-1** rechts sowie Kapitel 4.3 der Methodik). Ein Abgleich der technischen Kennwerte der Flexibilitäten und der technischen Daten des Engpassmanagements in einem Anwendungsfall liefert schließlich Ergebnisse hinsichtlich des regionalen Beitrags industrieller Flexibilitäten (vgl. Zusammenführung industrieller Flexibilitäten und Einsatzoption in **Abbildung 4-1** unten). Es wird eine Methodik entwickelt, die es erlaubt, industrielle Flexibilitäten zur Minderung des Engpassmanagements einzusetzen. Hierbei werden sowohl Flexibilitätspotenziale als

auch Maßnahmen des Engpassmanagements im zeitlichen Verlauf dargestellt. Für industrielle Verbraucher werden zudem die zuvor erhobenen technischen Rahmenbedingungen der einzelnen Anlagen zugrunde gelegt. Ein Vergleich der zeitlichen Abläufe dieser Maßnahmen stellt dar, zu welchen Zeiten Flexibilitäten in welchem Maße genutzt werden können. Anhand einer wirtschaftlichen Bewertung mit Gegenüberstellung der Kosten kann bewertet werden, ob die Nutzung industrieller Anlagen auch aus ökonomischer Sicht sinnvoll ist.

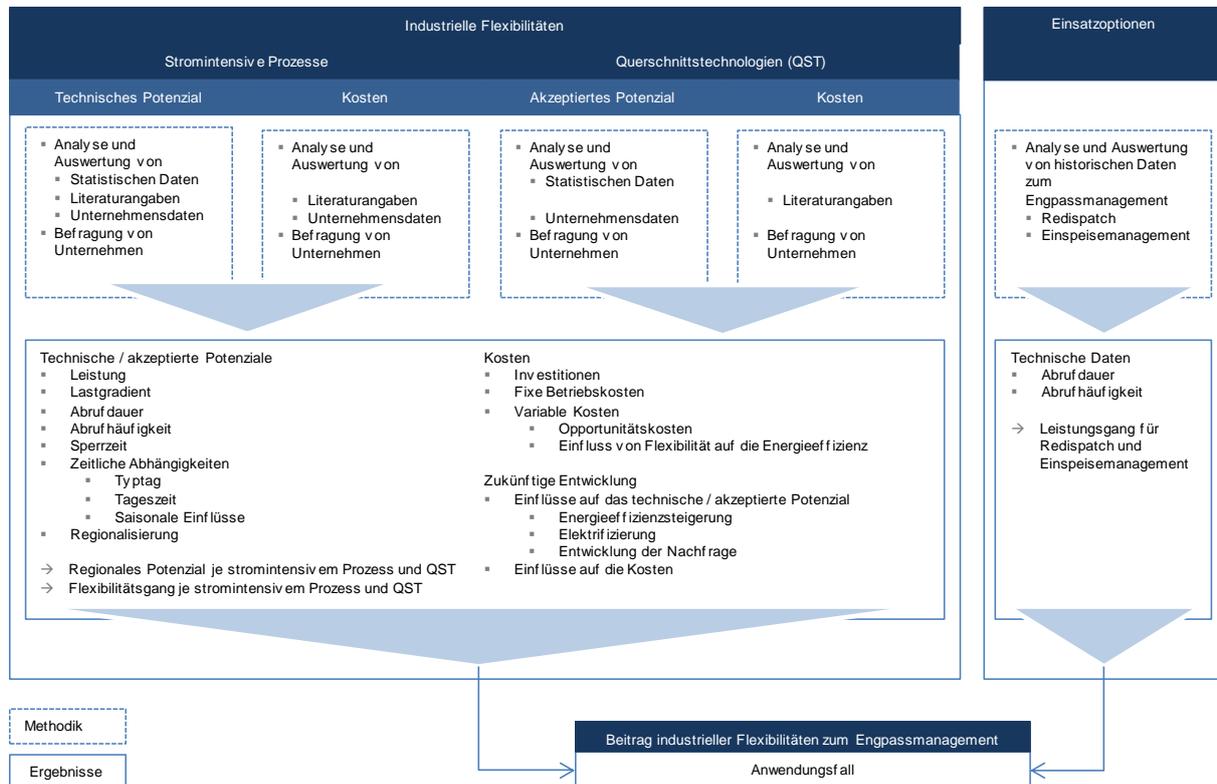


Abbildung 4-1: *Methodik und Ergebnisse zur Potenzial- und Kostenermittlung industrieller Lastflexibilisierung*

Unternehmensbefragung

Zur Ermittlung von technischen und wirtschaftlichen Kennwerten wird unter anderem ein Fragebogen entwickelt, welcher im Rahmen von Unternehmensbefragungen gefüllt wird. Die Abfrage dieser Daten erfolgt sowohl für Querschnittstechnologien als auch für stromintensive Prozesse. Diese Erkenntnisse fließen in die in Kapitel 5 dargestellten Ergebnisse hinsichtlich der technischen Potenziale und der Kosten für Erschließung und Betrieb der Lastflexibilisierung mit ein. Für diese Arbeit wurde in insgesamt 27 Betrieben eine detaillierte Befragung zum Thema Lastflexibilisierung durchgeführt. Weitere Befragungen aus anderen Projekten der FFE GmbH sowie aus anderen Studien dienen als Validierung der Angaben der Interviewpartner. In fünf der befragten Unternehmen sind stromintensive Prozesse vorhanden, wobei diese Betriebe alle bereits in der Vermarktung (Regelleistungsmarkt, AbLaV) aktiv sind. Im Gegensatz dazu weisen die Firmen mit nicht stromintensiven Prozessen deutlich weniger Erfahrung im Bereich der Vermarktung auf. Von den 22 Befragten bieten derzeit nur sechs Betriebe flexibilisierbare Lasten oder Erzeugungsanlagen an.

Darüber hinaus stammen wesentliche Erkenntnisse hinsichtlich Betriebsweise, vorhandener Leistungen und Flexibilität aus den Energieeffizienzberatungen im Rahmen der Lernenden Energieeffizienz-Netzwerke (LEEN) der FFE GmbH /FFE-31 14/. Die einzelnen Erkenntnisse aus den Befragungen sind in Kapitel 5 dargestellt.

Definition von Potenzialbegriffen

Vor Beginn der Potenzialermittlung werden die fünf verschiedenen Potenzialbegriffe aus **Abbildung 4-2** erläutert, welche auf den Ausführungen in /FFE-05 17/ basieren. Dies erleichtert die Einordnung der im Anschluss ausgewiesenen Potenziale.

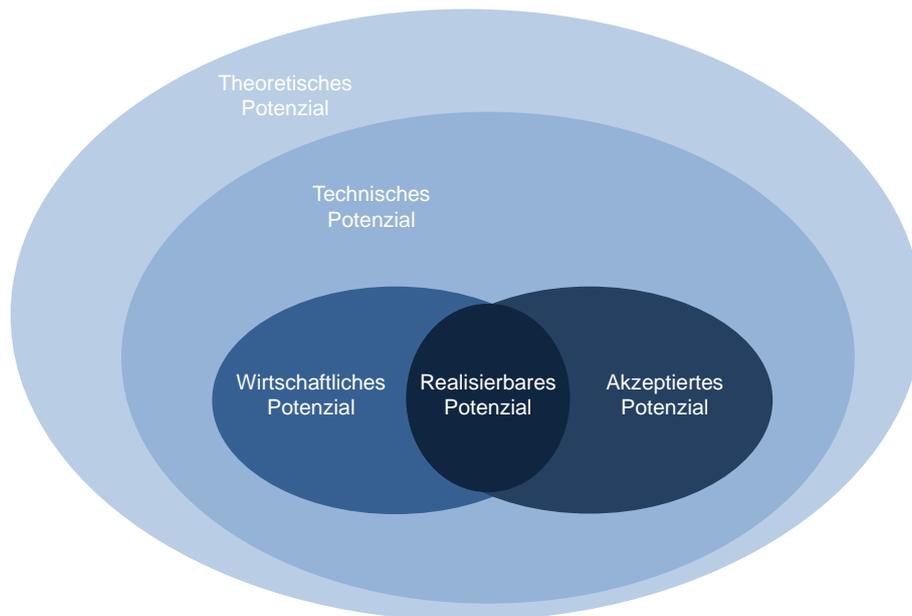


Abbildung 4-2: Abgrenzung der Potenzialbegriffe in Anlehnung an /FFE-05 17/

Das theoretische Potenzial berücksichtigt keine technischen Restriktionen. Es kann nach /FFE-05 17/ aus der installierten Leistung einer Anlage sowie deren Last zu einem entsprechendem Zeitpunkt abgeleitet werden. Das positive Potenzial entspricht der aktuellen Last einer Anlage, das negative Potenzial der Differenz zwischen installierter Leistung und aktueller Last /FFE-05 17/.

Für das technische Potenzial kommen sicherheits- und anlagenrelevante Restriktionen zum Tragen. Dazu werden Prozess- oder Anlagenspezifikationen, wie beispielsweise die maximale Abrufdauer oder die Sperrzeit sowie Daten zu Materialspeichern abgefragt /FFE-05 17/. Es entspricht dem aus technischer Sicht zu- oder abschaltbaren Potenzial.

Das wirtschaftliche Potenzial stellt eine Teilmenge des technischen Potenzials dar. Eine wirtschaftliche Nutzung eines Potenzials ergibt sich, wenn die Erlöse durch eine Vermarktung der Flexibilität die anfallenden Kosten übersteigen /FFE-05 17/. Zu den Erlösen können auch Einsparungen bei den Stromkosten zählen. Die Kosten setzen sich aus Investitionen, fixen und variablen Betriebskosten zusammen. Bei einem Produktionsausfall müssen zusätzlich die Opportunitätskosten einkalkuliert werden.

Das hier als akzeptiertes Potenzial bezeichnete Potenzial entspricht nach /FFE-05 17/ dem praktischen Potenzial. Dies ist ebenfalls eine Teilmenge des technischen Potenzials, allerdings werden hier unternehmensinterne, regulatorische und administrative Hemmnisse einbezogen. „Hierzu zählen beispielsweise tarifrechtliche Bestimmungen,

welche einer Anpassung der Produktion entgegenstehen können. Des Weiteren werden Ressourcenverfügbarkeit sowie Planbarkeit bzw. Prognosesicherheit der Laständerung berücksichtigt. Unter Ressourcen sind hierbei die Verfügbarkeit von Mitarbeitern und das Vorhandensein von Rohstoffen im Prozess vorgelagerten Speicher zu verstehen.“
/FFE-05 17/

Das letztendlich realisierbare Potenzial ergibt sich aus der Schnittmenge des wirtschaftlichen und des akzeptierten Potenzials. Dort fließen zum einen wirtschaftliche Aspekte ein, zum anderen werden nur die aus Unternehmenssicht akzeptierten Anlagen für eine Flexibilisierung genutzt /FFE-05 17/.

Für die Quantifizierung des wirtschaftlichen Potenzials bedarf es weiterer Kenngrößen, um die Kosten vollständig abbilden zu können. Hierzu zählen beispielsweise Ausstattungsgrad der Anlage mit Steuerungstechnik oder Alter der Anlage. Da diese Daten sehr heterogen sind und diese jedoch einen wesentlichen Einfluss auf das Potenzial haben, bedarf es weiterer Untersuchungen, um eine regionale Darstellung des wirtschaftlichen Potenzials zu ermöglichen. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher für Querschnittstechnologien das akzeptierte Potenzial, welches aus Unternehmenssicht nutzbar ist, ausgewiesen.

4.1 Stromintensive Prozesse

Zunächst wird die Vorgehensweise zur technischen Potenzialermittlung erläutert, darauf aufbauend wird auf die Kostenerhebung eingegangen. Sowohl für die Potenzial- als auch die Kostenermittlung werden im Anschluss die Einflussfaktoren auf die zukünftige Entwicklung analysiert.

4.1.1 Geeignete Anlagen

Im ersten Schritt werden für eine flexible Betriebsweise geeignete industrielle Prozesse identifiziert. Dazu werden die Studien /DENA-07 10/, /ETH-01 07/, /FFE-09 13/, /TUD-03 12/, /UNIKA-01 05/ und /VDE-01 12/ herangezogen, in welchen bereits Prozesse und Produktionsanlagen auf deren flexible Fahrweise untersucht wurden. Die folgenden Ausführungen basieren auf der in /FFE-49 16/ durchgeführten Literaturrecherche.

Der Fokus der genannten Studien lag bisher auf Prozessen, deren Kennzahl „Stromintensität“ in MWh/Mio. € Bruttowertschöpfung einen besonders hohen Wert aufweist. Dies korreliert in den meisten Fällen auch mit einem hohen Anteil am Gesamtstromverbrauch aller Branchen. Diesen Prozessen ist gemein, dass deren Anlagen eine flexibilisierbare Leistung von mehreren Hundert kW bis zu mehreren Hundert MW aufweisen. Diese Leistungen sind im Vergleich zu anderen industriellen Anlagen als hoch einzustufen. In **Abbildung 4-3** sind der absolute Stromverbrauch sowie die Stromintensität der einzelnen Branchen dargestellt. Eine hohe Stromintensität sowie einen hohen Anteil am Gesamtstromverbrauch weisen beispielsweise die Branchen Metallerzeugung und -bearbeitung, Papier und Pappe, Chemie sowie Glas, Keramik, Steine und Erden auf.

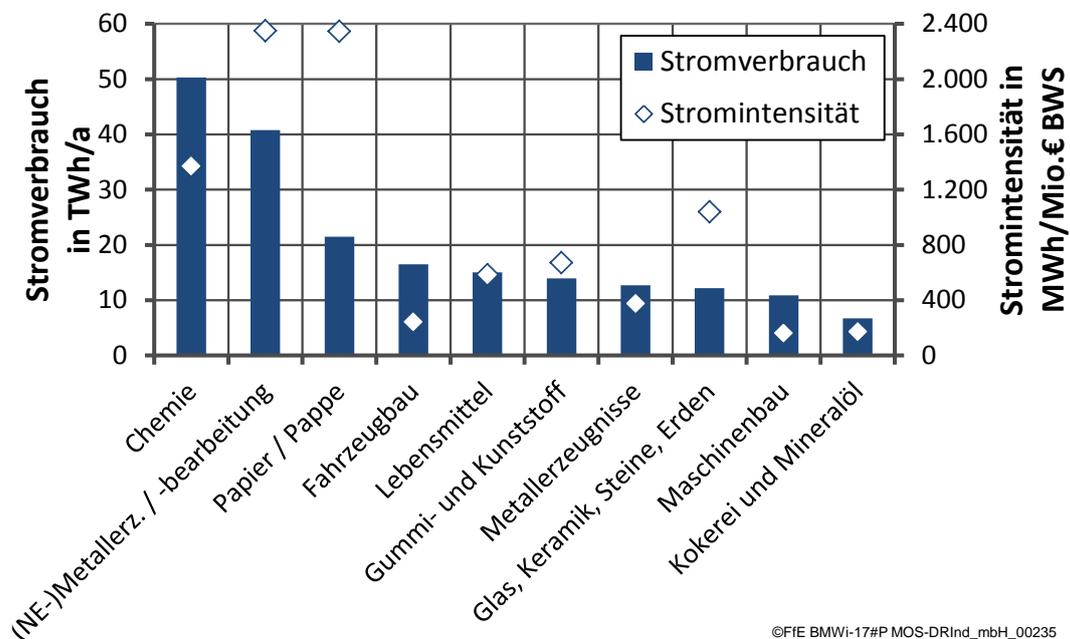


Abbildung 4-3: *Stromverbrauch und Stromintensität ausgewählter Branchen im Jahr 2010 /FFE-27 13/*

Tabelle 4-1 beinhaltet eine Zusammenfassung der stromintensiven Einzelprozesse, welche in /DENA-07 10/, /ETH-01 07/, /FFE-09 13/, /TUD-03 12/, /UNIKA-01 05/ und

/VDE-01 12/ als für eine flexible Betriebsweise geeignet ausgewiesen werden. Dargestellt wird die jeweils flexibilisierbare Anlage eines Produktionsschritts oder Verfahrens.

Tabelle 4-1: *Flexibilisierbare Systemkomponenten stromintensiver Einzelprozesse nach /DENA-07 10/, /ETH-01 07/, /FFE-09 13/, /TUD-03 12/, /UNIKA-01 05/ und /VDE-01 12/*

Branche (Klassifizierung nach WZ 2008*)	Verfahren / Produktionsschritt	Flexibilisierbare Anlagen bzw. Komponenten des Systems
Metallerzeugung und -bearbeitung	Aluminiumelektrolyse	Aluminiumelektrolysezellen
Metallerzeugung und -bearbeitung	Elektrostahlherstellung	Lichtbogenofen
Metallerzeugung und -bearbeitung	Schmelzen von Gusswerkstoffen	Induktionstiegelofen
Metallerzeugung und -bearbeitung	Kupfer- / Zinkelektrolyse	Elektrolyse (elektrolytische Veredelung von Kupfer und Zink)
Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus	Holzstoffherstellung	Holzschleifer, Refiner (TMP-Verfahren**)
Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus	Altpapier- / Zellstoffauflösung	Pulper
Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus	Papierherstellung	Papiermaschine
Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden	Klinker- und Zementherstellung	Roh- und Zementmühlen
Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden	Glasschmelzen	Elektrische Zusatzbeheizung des Wannens (Glasschmelzen)
Herstellung von chemischen Erzeugnissen	Chlorelektrolyse	Chlorelektrolysezellen
Herstellung von chemischen Erzeugnissen	Luftzerlegung	Kompressoren für Verdichtung der Luft

* Klassifikation der Wirtschaftszweige nach /DESTATIS-07 08/

**Thermomechanische Holzstoffherstellung

Im Rahmen der Arbeit werden die in den oben genannten Studien identifizierten Anlagen nochmals auf deren flexible Betriebsweise geprüft, bevor sie einer Detailanalyse unterzogen werden. Zudem werden bei Bedarf weitere stromintensive Prozesse in die Betrachtung aufgenommen, sofern es sich um standardisierte Prozesse handelt, welche an mehreren Standorten eingesetzt werden. Von einer Analyse von Sonderprozessen wird an dieser Stelle abgesehen.

4.1.2 Technisches Potenzial

Nach Bestimmung der relevantesten stromintensiven Prozesse wird deren Lastflexibilisierungspotenzial ermittelt. Für die Berechnung der Potenziale wird zwischen einer reinen Lastverschiebung und dem Produktionsausfall unterschieden (vgl. Kapitel 3). Bei der Lastverschiebung ist es möglich, die während der Abschaltung oder dem reduzierten Betrieb entstandenen Produktionseinbußen zu einem späteren Zeitpunkt nachzuholen. Die folgende Methodik basiert auf der Zusammenfassung in /FFE-49 16/ und wird im Rahmen dieser Arbeit im Detail beschrieben.

Flexibilisierbare Leistung – Lastverschiebung

Das Lastverschiebepotenzial stromintensiver Prozesse wird für Deutschland mit Hilfe einer Bottom up-Analyse quantifiziert. Die Methodik ist in **Abbildung 4-4** schematisch dargestellt.

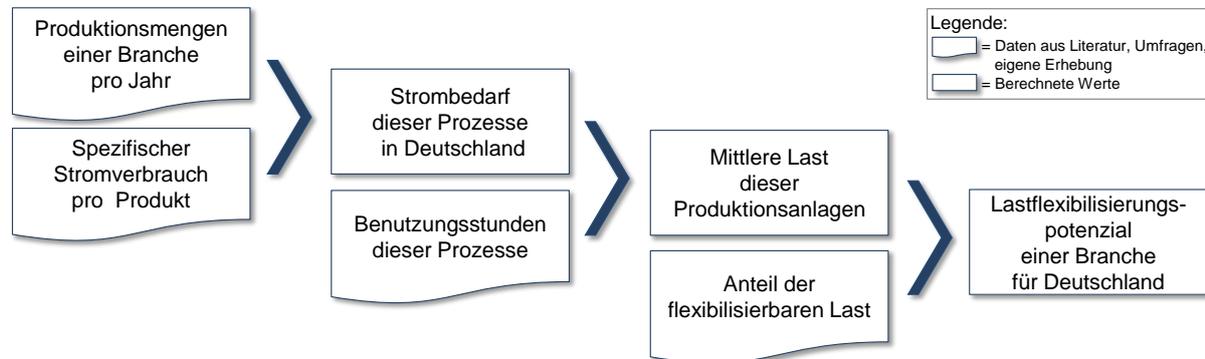


Abbildung 4-4: Methodik zur Lastverschiebe-Potenzialermittlung bei stromintensiven Prozessen /FFE-01 14/

Als Eingangsgrößen der Potenzialermittlung dienen jährliche Produktionsmengen der genannten Produkte sowie der spezifische Stromverbrauch der betrachteten stromintensiven Prozesse. Die Angabe der tatsächlichen Produktionsmengen stammt teilweise von den Betrieben selbst. Sofern keine Daten auf Unternehmensebene vorhanden waren, wurden Verbandsangaben oder Literaturwerte verwendet. Als Basisjahr der Betrachtung wurde das Jahr 2012 gewählt. In einem Fall lagen zum Zeitpunkt der Bewertung keine Produktionsdaten für 2012 vor, stattdessen wurden Daten aus 2011 verwendet.

Der jährliche Strombedarf für die Herstellung eines Produktes errechnet sich somit aus

$$E_{el,s,a} = e_{el,s} \cdot m_{prod,s,a} \quad (1)$$

E	Energieverbrauch
el	elektrisch
s	stromintensiver Prozess
a	Jahr
e	spezifischer Energieverbrauch
m	Menge
prod	produziert

Liegen keine Angaben zu der tatsächlichen Produktionsmenge vor, kann diese anhand der Daten zu Produktionskapazität sowie der mittleren Auslastung der Produktionsanlage bestimmt werden. Auch hier dienen als Eingangsgrößen Daten der Unternehmen oder Branchenreporte.

$$m_{prod,s,a} = m_{Kap,s,a} \cdot y_{s,a} \quad (2)$$

Kap	Kapazität
y	Auslastungsfaktor

Durch Division des Stromverbrauchs durch die Betriebsstunden errechnet sich die mittlere Last des Prozesses.

$$\emptyset P_{el,s} = \frac{E_{el,s,a}}{t_{BS,s,a}} \quad (3)$$

P	Leistung
\emptyset	mittlere
t	Zeit
BS	Betriebsstunden

Sofern die Betriebsstunden den Volllaststunden entsprechen bzw. die Anlage stets unter Nennlast betrieben wird, entspricht die mittlere Leistungsaufnahme der Nennleistung. Bei Betrieben, welche keine ganzjährige Volllast erreichen, ergibt sich durch die Verwendung der tatsächlichen Produktionsmenge und anschließende Division des Energieverbrauchs durch die Betriebsstunden die mittlere Leistungsaufnahme der Anlage im Produktionsprozess. Die flexibilisierbare positive Leistung errechnet sich anschließend durch Multiplikation der mittleren Last mit einem Flexibilitätsfaktor z . Dieser bezieht sich auf einen definierten Betriebspunkt der Anlage. Je nach Bezugsgröße (mittlere Last oder Nennleistung) kann dieser Faktor unterschiedlich hoch sein.

$$P_{el,flex,pos,s} = \emptyset P_{el,s} \cdot z_{s,pos} \quad (4)$$

flex	flexibilisierbar
pos	positiv
z	flexibilisierbarer Anteil

Bei Produktionsanlagen, deren Leistungsbezug von einem Zeitschritt in einen anderen verschoben wird, besteht sowohl positives als auch negatives Lastflexibilisierungspotenzial, da sowohl ein Vorziehen als auch ein Nachholen eines Produktionsschrittes aus technischer Sicht möglich ist. Dies gilt für Roh- und Zementmühlen sowie Holzschleifer und Refiner. Bei der Aluminiumelektrolyse sowie dem Elektrolichtbogenofen kann aufgrund der nahezu ganzjährigen Volllast nur das positive Potenzial abgebildet werden.

Wird eine Anlage z.B. stets im hohen Teillastbereich betrieben oder weist diese – bezogen auf den Hauptprozess – nur eine geringere Anzahl an Betriebsstunden auf, muss dies bei der Flexibilitätspotenzialermittlung berücksichtigt werden. Ersteres ist bei der Chlorherstellung der Fall. Letzteres hingegen betrifft Roh- und Zementmühlen sowie Holzschleifer und Refiner. Um hier das positive und negative Potenzial zu ermitteln, wird zunächst über die Produktionskapazität der maximale Stromverbrauch errechnet.

$$E_{el,s,a,max} = e_{el,s} \cdot m_{Kap,s,a} \quad (5)$$

max	maximal
-----	---------

Die installierte Leistung wird anhand des maximalen Stromverbrauchs und der Betriebsstunden ermittelt.

$$P_{el,inst,s} = \frac{E_{el,s,a,max}}{t_{BS,s,a}} \quad (6)$$

inst installiert

Die mittlere Last ist aus **Formel (3)** bereits bekannt. Um die reale, flexibilisierbare, positive Leistung zu bestimmen, wird das Delta zwischen Mindestlast und mittlerer Last gebildet. Die Mindestlast errechnet sich aus:

$$P_{el,min,s} = P_{el,inst,s} \cdot (1 - z_{s,pos}) \quad (7)$$

min minimal

Somit ergibt sich die flexibilisierbare positive Leistung aus:

$$P_{el,flex,pos,s} = \emptyset P_{el,s} - P_{el,min,s} \quad (8)$$

Die flexibilisierbare negative Leistung wird mittels **Formel (9)** berechnet.

$$P_{el,flex,neg,s} = P_{el,inst,s} - \emptyset P_{el,s} \quad (9)$$

neg negativ

Flexibilisierbare Leistung – Produktionsausfall

Bei einem möglicherweise eintretenden Produktionsausfall besteht die Möglichkeit, dass neben dem stromintensiven Prozess weitere in diesen Produktionsschritt eingebundene Anlagen abgeschaltet werden. In diesem Fall erhöht sich die flexibilisierbare positive Leistung. Die Höhe der abschaltbaren Leistung entspricht der mittleren Last des gesamten Produktionsschrittes. Dazu wird dessen Stromverbrauch durch die jährlichen Betriebsstunden dividiert.

$$\emptyset P_{el,proz} = \frac{E_{el,proz,a}}{t_{proz,BS,a}} \quad (10)$$

proz gesamter Produktionsprozess

Die zur Berechnung benötigten Daten stammen aus Statistiken zum Stromverbrauch je Branche sowie verschiedenen Studien zum spezifischen Stromverbrauch je

Produktionsschritt (inkl. Nebenaggregate) /FFE-01 14/, /GDA-01 12/, /DESTATIS-03 14/, /VDZ-01 13/, /FFE-24 09/, /VCI-01 13/.

4.1.3 Zeitliche Verfügbarkeit

Der zeitliche Aspekt spielt bei der Potenzialermittlung eine entscheidende Rolle. Die relevanten Parameter sind Abrufdauer, Abrufhäufigkeit und Sperrzeit sowie Lastgradient. Die Abrufdauer gibt an, wie lange eine Anlage ohne Pause flexibilisiert werden kann, die Abrufhäufigkeit gibt die maximale Anzahl an Abrufen pro Zeiteinheit (z.B. Woche oder Jahr) an. Als Sperrzeit wird die Zeit zwischen zwei Abrufen definiert, diese beginnt nach einem Abruf und beinhaltet ein ggf. erforderliches Nachholen. Erst nach Ablauf der Sperrzeit darf ein zweiter Abruf erfolgen. Der Lastgradient gibt Auskunft darüber, wie schnell die Last einer Anlage verändert werden kann. Dieser Aspekt spielt wiederum eine Rolle bei der Vermarktung des Potenzials, da die Höhe des Lastgradienten entscheidend für eine Marktteilnahme sein kann. Beispielsweise muss die angebotene Leistung bei der Teilnahme am Markt für Sekundärregelleistung innerhalb von fünf Minuten aktiviert werden können /BNETZA-02 11/. Die Quantifizierung dieser Parameter erfolgt zum einen anhand von Unternehmensbefragungen, zum anderen werden diese Ergebnisse mit Daten aus der Literatur abgeglichen.

Neben den zuvor genannten zeitlichen Parametern wird zusätzlich geprüft, inwiefern saisonale, typtagesabhängige und tageszeitliche Unterschiede bei den Potenzialen auftreten. Auch hier werden Befragungen von Unternehmen durchgeführt. Eine Validierung der Ergebnisse erfolgt anhand der Erkenntnisse aus den LEEN sowie anderen Studien. Sind saisonale Abhängigkeiten vorhanden, werden diese über einen saisonalen Faktor für den jeweiligen stromintensiven Prozess abgebildet.

4.1.4 Räumliche Verfügbarkeit

Der Bereich der stromintensiven Prozesse erlaubt aufgrund der geringen Anzahl an Standorten mit stromintensiven Prozessen eine standortscharfe Potenzialausweisung. Dazu wird die in Kapitel 4.1.2 genannte Methodik um eine Regionalisierung ergänzt, welche ebenfalls bereits in /FFE-49 16/ beschrieben wird.

Für die regionale Bestimmung und Darstellung der Potenziale dienen als Eingangsgrößen die Standorte der Unternehmen sowie die jeweils an einem Standort produzierten Tonnagen bzw. Produktionskapazitäten der Anlagen. Diese Daten werden teilweise von Verbänden, teilweise von den Unternehmen selbst veröffentlicht. In der Branche Zement liegen keine Produktionsmengen oder –kapazitäten je Standort vor. Die gesamte produzierte Tonnage wird dort anhand der Werksgröße auf die einzelnen Standorte aufgeteilt.

Für die graphische Darstellung der Potenziale wird das Regionenmodell⁹ des FfE e.V. genutzt (vgl. **Abbildung 4-5**). Das Lastverschiebepotenzial der unterschiedlichen Branchen wird standortscharf bestimmt und anschließend auf Landkreisebene aggregiert.



Abbildung 4-5: *Ableitung der regionalen Verteilung des Lastverschiebepotenzials bei stromintensiven Prozessen /FFE-01 14/*

Das Potenzial für den Produktionsausfall wird lediglich für Deutschland insgesamt ausgewiesen, da hier keine ausreichend detaillierte Datengrundlage hinsichtlich der installierten Anlagen je Produktionsschritt und Standort für eine regionale Darstellung zur Verfügung steht.

4.1.5 Kosten

Industrielle Flexibilitäten stehen in Konkurrenz zu anderen systemdienlichen Maßnahmen. Neben anderen Funktionalen Energiespeichern kann auch der Netzausbau als konkurrierende Maßnahme betrachtet werden. Welche Funktionalen Energiespeicher sich jedoch letztendlich durchsetzen, hängt sowohl von technischen als auch von ökonomischen Aspekten ab. Neben der technischen Potenzialanalyse wird zusätzlich eine Methodik zur Kostenbestimmung für industrielle Flexibilitäten erarbeitet.

Vor der Quantifizierung von Kosten wird zunächst untersucht, welche Kostenarten als relevant einzustufen sind. In der Regel müssen zunächst Investitionen getätigt werden, um einen flexiblen Betrieb von Anlagen überhaupt ermöglichen zu können. Darüber hinaus fallen fixe und variable Kosten im laufenden Betrieb an.

Basierend auf /FFE-49 16/ und /FFE-27 13/ zeigt **Tabelle 4-2** beispielhaft, welche Kosten den drei identifizierten Kostenarten zugeordnet werden können. So kann es erforderlich sein, in Mess- und Regelungstechnik oder in Software zu investieren. Investitionen in Form eines anfänglichen Personalaufwands für die Entwicklung einer Einsatzstrategie können ebenfalls notwendig sein. Fixe Betriebskosten treten unabhängig vom Abruf z. B. in Form einer Prüfung der jährlichen Abrechnung oder für die Besetzung einer Leitwarte rund um die Uhr auf. Variable Kosten entstehen nur bei einem Abruf. Bei Querschnittstechnologien setzen sich diese überwiegend aus Personalkosten, Wartungsaufwand, Komforteinschränkungen und Wirkungsgrad-

⁹ „Ein neues, flächendeckendes, räumlich und zeitlich hoch aufgelöstes Energiesystemmodell (FREM) ermöglicht die Bearbeitung von komplexen energietechnischen und -wirtschaftlichen Fragestellungen und liefert räumlich differenzierte Aussagen für viele energiewirtschaftliche Bereiche. Dieses in den letzten Jahren an der Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE) in München entwickelte regionalisierte Energiesystemmodell nutzt zur Modellierung unterschiedlichste Fachdaten, statistische Datenquellen und Verteilungsschlüssel. Es wird eine flexible und gleichzeitig über alle Aggregierungsebenen und Datenquellen konsistente Datenbasis sichergestellt.“ /FFE-39 14/.

verlusten zusammen. Entsteht bei stromintensiven Prozessen ein Produktionsausfall, haben die Opportunitätskosten (entgangene Erlöse) einen wesentlichen Einfluss auf die variablen Kosten.

Tabelle 4-2: *Kostenarten für Erschließung und Betrieb von Lastflexibilisierungsmaßnahmen in der Industrie in Anlehnung an /FFE-27 13/*

Investitionen	Fixe Betriebskosten	Variable Kosten
Mess- und Regelungstechnik	Informationskosten	Opportunitätskosten
Zentrale Steuerungssoftware	Transaktionskosten	Speicherkosten
Kommunikationstechnologie	Steuerungskosten (ggf. Personalaufwand)	Personalkosten
Lastflexibilisierungsstrategie		Wartungsaufwand
		Komforteinschränkungen
		Wirkungsgradverluste

Wechselwirkungen zwischen Flexibilität und Energieeffizienz

Neben verschiedenen anderen variablen Kosten entstehen aufgrund veränderter Arbeitspunkte ggf. Wirkungsgradverluste. Im Rahmen dieser Arbeit wird zunächst überprüft, ob Wechselwirkungen zwischen Flexibilität und Energieeffizienz bestehen. Anschließend wird für bestehende Wechselwirkungen eine Methodik zu deren Quantifizierung entwickelt. Eine Zusammenfassung der Methodik ist bereits in /FFE-26 16/ beschrieben, in dieser Arbeit wird sie im Detail erläutert. Eventuell durch eine Flexibilisierung entstehende Wirkungsgradverluste werden im Folgenden als variable Kosten ausgewiesen.

Zunächst werden die beiden Fälle Lastverschiebung und Teillastbetrieb untersucht. Flexibilitätsmaßnahmen beeinflussen die Energieeffizienz bzw. den Gesamtwirkungsgrad bei einer reinen Verschiebung der Last üblicherweise nicht. Wird jedoch der Arbeitspunkt einer Anlage verändert, kann dies Einfluss auf die Energieeffizienz und somit den Gesamtwirkungsgrad der Maschine haben. Für jeden der beiden Fälle Vermarktung positiver und negativer Leistung muss bestimmt werden, wie hoch die Leistungsaufnahme im Vergleich zur installierten Leistung ist bzw. wie hoch der Teillastbetrieb ist. Wird eine Anlage in Teillast betrieben und wird positive Leistung vermarktet, hat ein Abruf eine weitere Reduzierung der Leistungsaufnahme zur Folge. Bei der Vermarktung negativer Leistung ist dies bei der Vorhaltung der Fall.

Im nächsten Schritt werden Einflussfaktoren identifiziert, welche sich auf die Effizienz der Anlage auswirken können. Diese sind in **Abbildung 4-6** dargestellt. Während bei stromintensiven Prozessen davon auszugehen ist, dass sich der spezifische Stromverbrauch in Abhängigkeit des Arbeitspunktes verändert, werden bei Querschnittstechnologien die verschiedenen Einzelwirkungsgrade von Motor, Kraftübertragung und Technologie in den Berechnungen berücksichtigt. Auch erhöhte Wärme- oder Kälteverluste können bei Abweichung von der Solltemperatur auftreten.

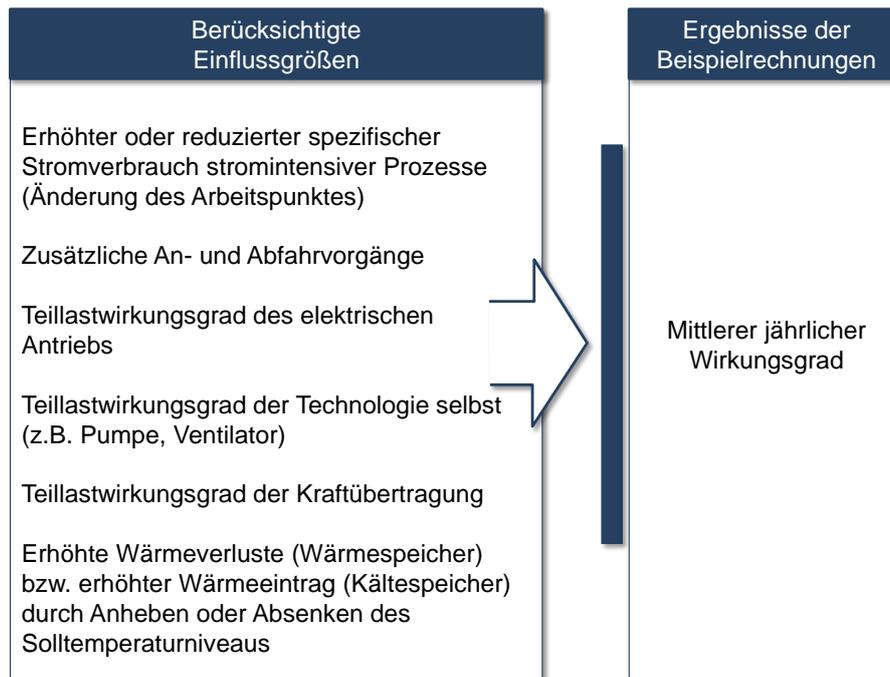


Abbildung 4-6: *Mögliche Einflüsse auf den mittleren jährlichen Wirkungsgrad durch Flexibilisierung von Anlagen*

Für die beiden Fälle der positiven und negativen Leistungserbringung werden Berechnungen zur Höhe der Beeinflussung des mittleren jährlichen Wirkungsgrades durchgeführt. Dabei besteht sowohl die Möglichkeit einer positiven als auch einer negativen Beeinflussung des Gesamtwirkungsgrades. Voraussetzung ist jeweils, dass die produzierte Menge eines Gutes oder eines Mediums im Jahresvergleich zur nicht flexiblen Betriebsweise unverändert bleibt.

Wird eine Vermarktung von Flexibilität angestrebt, muss für Vorhaltung oder Abruf vom aktuellen Arbeitspunkt abgewichen werden. Je nachdem, ob positive oder negative Leistung angeboten wird, verändert sich der Arbeitspunkt wie in **Tabelle 4-3** beschrieben.

Tabelle 4-3: *Betriebszustände von Anlagen bei der Vermarktung von Flexibilität*

Vermarktungsart	Vorhaltung	Abruf	Nachholen
Positive Leistung	Volllast	Teillast	Volllast
Negative Leistung	Teillast	Volllast	Teillast

Die Veränderung des Gesamtwirkungsgrades ist abhängig von der Anzahl an Vorhalte- und Abrufstunden. Diese werden in den folgenden Berechnungen variiert (vgl. **Tabelle 4-4**). Dabei werden typische Vermarktungsoptionen, wie beispielsweise lange Vorhaltezeit und eine nur geringe Anzahl an Abrufen, berücksichtigt.

Tabelle 4-4: *Variation von Vorhaltezeit und jährlicher Abrufdauer*

Vorhaltezeit in h/a	Jährliche Abrufdauer in h/a		
4.000	10	100	1.000
5.000	10	100	1.000
6.000	10	100	1.000
7.000	10	100	1.000
8.000	10	100	1.000

Die Kostenermittlung zur Bestimmung der zuvor genannten Kostenarten für stromintensive Prozesse und Querschnittstechnologien erfolgt überwiegend anhand der Befragung von Unternehmen. Da bereits einige befragte Betriebe ihre stromintensiven Prozesse aktiv vermarkten, werden deren Angaben für die Bestimmung der Investitionen sowie der laufenden Kosten (fixe und variable Kosten) zugrunde gelegt. Zur Validierung der Angaben wird eine Literaturrecherche durchgeführt.

Wechselwirkungen zwischen Flexibilität und Energieeffizienz bei stromintensiven Prozessen

Wie bereits beschrieben, wird der Einfluss einer flexiblen Betriebsweise auf die Energieeffizienz durch die Veränderung des jährlichen Gesamtwirkungsgrades dargestellt. Ergänzend zur Zusammenfassung in /FFE-26 16/ wird die Methodik im Rahmen dieser Arbeit im Detail erläutert.

Ohne die Vermarktung von Flexibilität errechnet sich der gesamte Stromverbrauch zur Erzeugung einer definierten Menge eines Produktes aus der Multiplikation des spezifischen Stromverbrauchs mit der jährlichen Produktionsmenge bzw. des Leistungsbezugs mit der Produktionszeit:

$$E_{el,s,a} = e_{el,s} \cdot m_{prod,s,a} = P_{el,prod,s} \cdot t_{prod,s} \quad (11)$$

Die flexible Betriebsweise führt zu unterschiedlich hohen Stromverbräuchen in den verschiedenen Arbeitspunkten. In Summe errechnet sich der gesamte neue Stromverbrauch aus der Summe des Verbrauchs für die Vorhaltung, den Abruf und das Nachholen.

$$E_{el,flex,s,a} = E_{el,vor,s} + E_{el,abruf,s} + E_{el,nach,s} \quad (12)$$

vor Vorhalten
 abruf Abruf
 nach Nachholen

Die gesamte Produktionszeit setzt sich nun zusammen aus der Zeit für das Vorhalten, etwaige Abrufe sowie das Nachholen.

$$t_{s,a} = t_{vor,s} + t_{abrufl,s} + t_{nach,s} \quad (13)$$

Die Berechnung des Stromverbrauchs für die Vorhaltung zeigt **Formel (14)**:

$$E_{el,vor,s} = P_{el,vor,s} \cdot t_{vor,s} \quad (14)$$

Entspricht die Vorhaltung dem ursprünglichen Betriebsfall ohne Flexibilisierung, verändert sich die Leistungsaufnahme nicht:

$$P_{el,vor,s} = P_{el,prod,s} \quad (15)$$

Die Höhe des Stromverbrauchs für Abruf und Nachholen wird mittels der produzierten Mengen in den einzelnen Betriebszuständen errechnet. Allerdings wird hier – ergänzend zur Potenzialermittlung in Kapitel 4.1.2 – ein leicht veränderter spezifischer Stromverbrauch bei Abweichung aus dem optimalen Arbeitspunkt angesetzt, was wiederum Einfluss auf die Leistungsaufnahme hat. Daraus ergibt sich, dass auch die Produktionsmenge weder linear ansteigt noch linear reduziert wird.

Bei Verschiebung des Arbeitspunktes errechnet sich die neue Leistungsaufnahme aus:

$$P_{el,AP2,s} = e_{el,AP2,s} \cdot m_{AP2,s,h} \quad (16)$$

AP2	Veränderter Arbeitspunkt durch Flexibilitätsvermarktung
h	Stunden

Der neue Arbeitspunkt kann sowohl einem Voll- als auch einem Teillastbetrieb entsprechen und wird je nach Prozess im Einzelnen ermittelt.

Die Zeit für das Nachholen ergibt sich aus den Vorgaben für Vorhaltung und Abruf sowie den zu diesen Zeiten produzierten Mengen. Es wird davon ausgegangen, dass die Leistungsaufnahme während des Nachholens jeweils der ursprünglichen, nicht flexibilisierten Betriebsweise entspricht. Somit errechnet sich die Nachholzeit aus der Division der noch benötigten Menge eines Produkts und der stündlichen Produktionsmenge im nicht flexibilisierten Betriebsfall:

$$t_{el,nach,s} = \frac{m_{nach,a}}{m_{nach,h}} \quad (17)$$

Somit kann der gesamte Stromverbrauch für die flexible Betriebsweise aus **Formel (12)** ersetzt werden durch:

$$E_{el,flex,s,a} = P_{el,vor,s} \cdot t_{vor,s} + P_{el,abrufl,s} \cdot t_{abrufl,s} + P_{el,nach,s} \cdot t_{nach,s} \quad (18)$$

Die Veränderung des Gesamtwirkungsgrades, bezogen auf den Jahresenergieverbrauch, ergibt sich aus **Formel (19)**:

$$\Delta\eta_{ges,s} = 1 - \frac{E_{el,flex,s,a}}{E_{el,s,a}} \quad (19)$$

Δ	Delta
η	Wirkungsgrad
ges	gesamt

Dabei entspricht ein positiver Wert einer Wirkungsgradverbesserung, ein negativer Wert einer Wirkungsgradverschlechterung. Für eine Ausweisung der variablen Kosten ist jedoch die Wirkungsgradänderung über den Zeitraum zu betrachten, innerhalb dessen ein Abruf erfolgt.

Opportunitätskosten

Entsteht bei der Flexibilisierung von stromintensiven Prozessen durch einen sehr langen Abruf oder häufigere Abrufe ein Produktionsausfall, entgehen dem Unternehmen Erlöse durch das nicht produzierte und nicht verkaufte Produkt. Die Flexibilität der Anlage wird jedoch nur dann genutzt, wenn die Erlöse durch den Abruf mindestens den Opportunitätskosten entsprechen, die den entgangenen Deckungsbeitrag darstellen. Nachfolgend wird daher eine Methodik erarbeitet, welche die Bestimmung dieser Kosten erlaubt. Diese Methodik wird bereits in /FFE-10 14/ beschrieben.

Für die Quantifizierung der Opportunitätskosten wird zunächst die Kostenstruktur von Industrieunternehmen analysiert (vgl. **Abbildung 4-7**). Der Preis für ein Gut setzt sich vereinfachend aus den fixen und variablen Kosten sowie der Gewinnmarge zusammen (vgl. **Formel (20)**). Die fixen und variablen Kosten entsprechen den Gesamtkosten (**Formel (21)**). Die variablen Kosten können wiederum aufgeteilt werden in Stromkosten und Material- sowie sonstige Energiekosten (ohne Strom). Die Stromkosten bestehen aus dem Großhandelspreis für Strom sowie Steuern, Abgaben und Umlagen (vgl. **Formel (22)**).

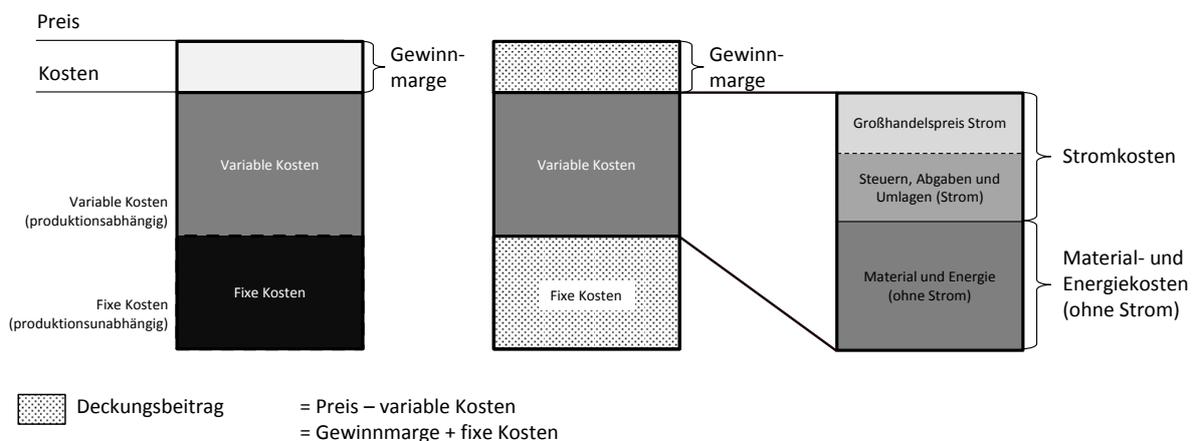


Abbildung 4-7: Vereinfachter Zusammenhang der Kosten, des Preises und der Gewinnmarge für industrielle Produkte /FFE-10 14/

$$Pr = K_{fix} + K_v + G \quad (20)$$

Pr	Preis
K	Kosten
fix	fix
v	variabel
G	Gewinnmarge

$$K_{ges} = K_{fix} + K_v \quad (21)$$

$$K_v = K_{v,el} + K_{v,ma,en} = K_{v,el,eex} + K_{v,el,c} + K_{v,ma,en} \quad (22)$$

ma	Material
en	Energie (ohne Strom)
eex	Großhandelspreis Strom
c	zusätzliche Kostenanteile für Strom (Steuern, Abgaben, Umlagen)

Der Deckungsbeitrag eines Unternehmens ergibt sich aus dem Preis des Gutes abzüglich der variablen Kosten (vgl. **Formel (23)**), welche nicht auftreten, wenn keine Produktion stattfindet (siehe Abbildung 4-7).

$$DB = Pr - K_v \quad (23)$$

DB	Deckungsbeitrag
----	-----------------

Üblicherweise beziehen stromintensive Unternehmen ihren Strom direkt im Großhandel und es können somit die Börsenpreise der EEX (European Energy Exchange) angesetzt werden. Anfallende Umlagen, Steuern und Abgaben müssen zusätzlich an den Staat und den Netzbetreiber gezahlt werden (vgl. **Abbildung 4-8**).

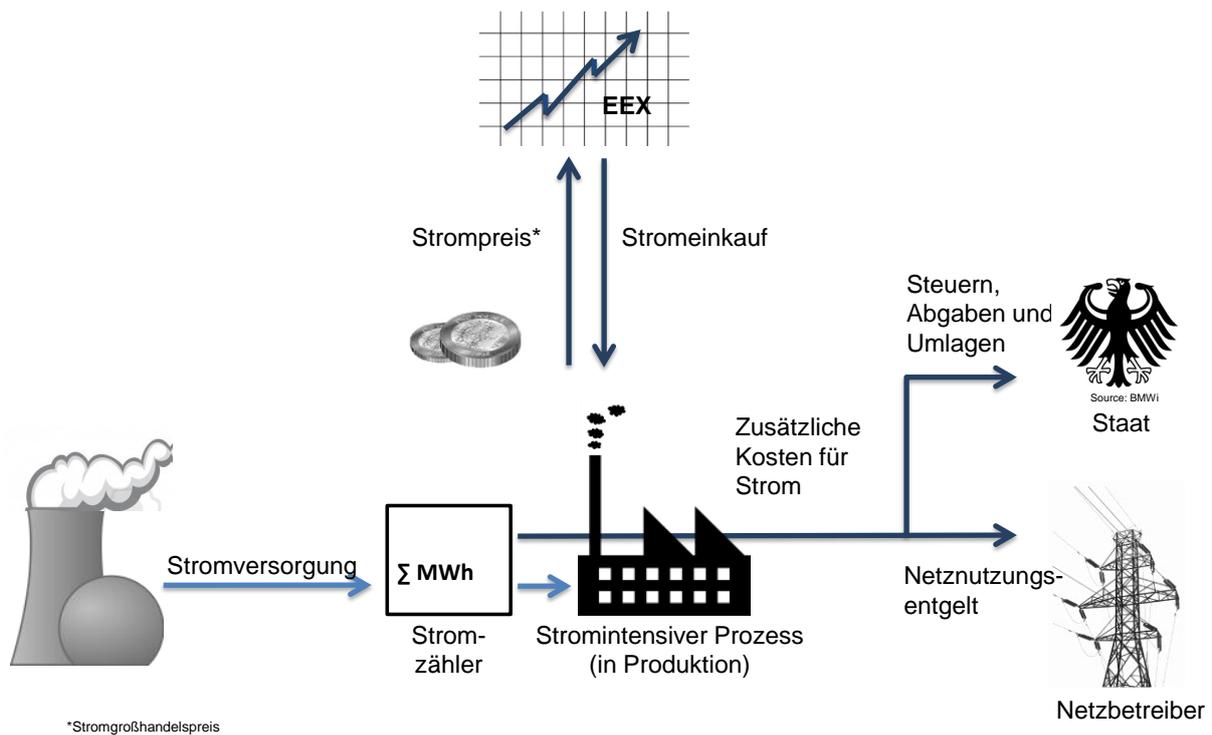


Abbildung 4-8: *Strombezug eines Unternehmens mit stromintensiven Prozessen und anfallende Kosten /FFE-10 14/*

Wird aufgrund eines Abrufs von positiver Leistung nicht produziert, muss das Unternehmen allerdings weiterhin den vertraglich vereinbarten Strombezug bezahlen. Physikalisch wird der nicht bezogene Strom jedoch in das öffentliche Netz eingespeist. Dem Unternehmen entstehen somit bei einem Abruf der Flexibilität zusätzlich Kosten in Höhe des Großhandelspreises für Strom (vgl. **Abbildung 4-9**). Weitere Kosten, wie Abgaben oder Steuern, müssen nur gezahlt werden, wenn das Unternehmen den Strom tatsächlich verbraucht und dieser über den Stromzähler erfasst wird.

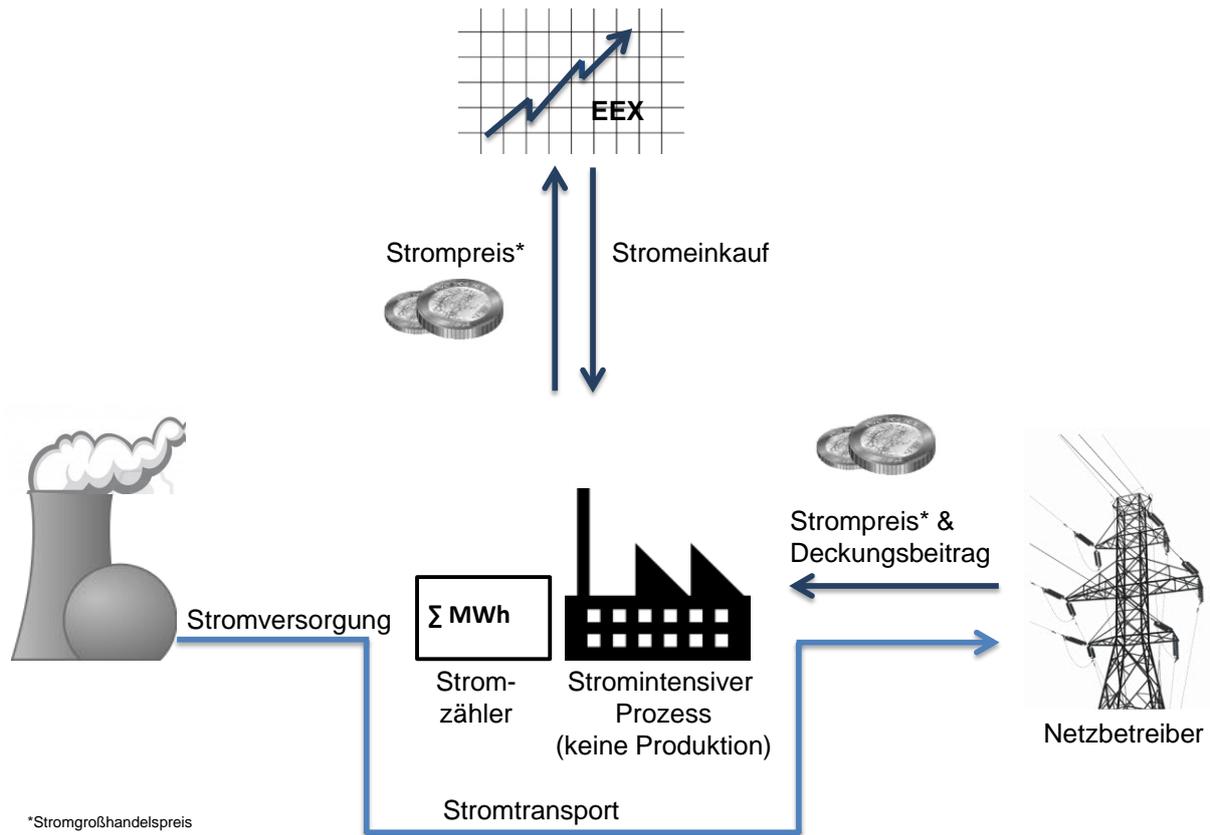


Abbildung 4-9: *Strombezug eines Unternehmens mit stromintensiven Prozessen und anfallende Kosten im Fall eines Abrufs von Flexibilität / FFE-10 14/*

Die Opportunitätskosten setzen sich somit aus dem Deckungsbeitrag (bestehend aus Gewinnmarge und fixen Kosten) und dem Stromgroßhandelspreis zusammen (siehe **Abbildung 4-10** und **Formel (24)**). Alternativ lassen sich die Opportunitätskosten auch durch Abzug der variablen Kosten (ohne Stromgroßhandelspreis) vom Verkaufspreis ermitteln.

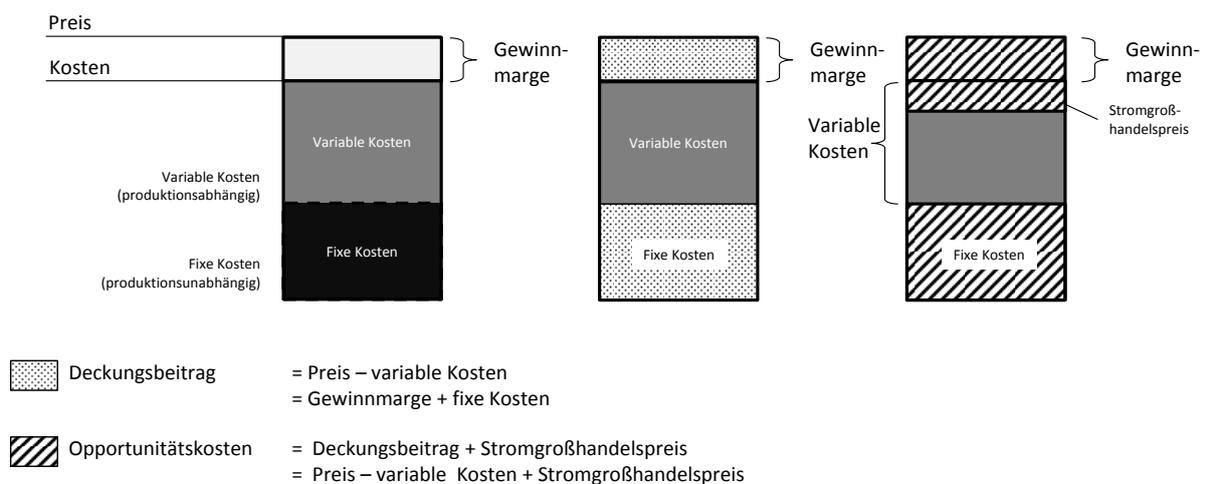


Abbildung 4-10: *Struktur der Kosten und Erlöse, Deckungsbeitrag und Opportunitätskosten / FFE-10 14/*

$$OK = DB + K_{v,el,eex} = Pr - K_v + K_{v,el,eex} \quad (24)$$

OK Opportunitätskosten

Die jeweiligen Kostenanteile werden nach den **Formeln (25), (26) und (27)** berechnet.

$$k_{v,el} = \frac{K_{v,el}}{K_{ges}} \quad (25)$$

k Anteil

$$k_{v,ma,en} = \frac{K_{v,ma,en}}{K_{ges}} \quad (26)$$

$$k_{fix} = \frac{K_{fix}}{K_{ges}} \quad (27)$$

$$k_{v,el} + k_{v,ma,en} + k_{fix} = 100 \% \quad (28)$$

Da die spezifischen Gesamtkosten nicht bekannt sind, werden diese anhand der vorliegenden Daten (Anteil der Stromkosten an den Gesamtkosten sowie spezifische Stromkosten inkl. Steuern, Abgaben und Umlagen) bestimmt (vgl. **Formel (29) und Formel (30)**).

$$K_{v,el} = K_{ges} \cdot k_{v,el} = K_{v,el,eex} + K_{v,el,c} \quad (29)$$

$$K_{ges} = \frac{K_{v,el,eex} + K_{v,el,c}}{k_{v,el}} \quad (30)$$

Der Anteil der Gewinnmarge am Preis des Gutes wird mittels **Formel (31)** ermittelt.

$$d = \frac{G}{Pr} \quad (31)$$

d Anteil der Gewinnmarge

Die Opportunitätskosten eines Unternehmens können nun nach **Formel (32)** bestimmt werden. Eingangsgrößen sind der Strompreis sowie Anteil der Gewinnmarge des Betriebs.

$$OK = \frac{(1 + d) - k_{v,ma,en} - k_{v,el} \cdot \left(\frac{(K_{v,el,eex} + K_{v,el,c}) - K_{v,el,eex}}{(K_{v,el,eex} + K_{v,el,c})} \right)}{\frac{k_{v,el}}{(K_{v,el,eex} + K_{v,el,c})}} \quad (32)$$

Für die Berechnung der Opportunitätskosten wird die Kostenverteilung der stromintensiven Industrie nach /ISI-03 09/ genutzt. Der Stromgroßhandelspreis wird mit 45 €/MWh¹⁰ angesetzt, die Gewinnmarge mit 20 % geschätzt.

4.1.6 Zukünftige Entwicklung

Aufbauend auf dem Ist-Zustand wird nachfolgend dargestellt, welche Faktoren die zukünftige Entwicklung des Potenzials sowie der Kosten beeinflussen und welche Methoden für deren Bewertung angewandt werden.

Technische Potenziale

Zur Abbildung der zukünftigen Entwicklung der Flexibilitäten werden im ersten Schritt verschiedene Einflussfaktoren identifiziert, welche im Folgenden detaillierter analysiert werden:

- Veränderung der Stromintensität stromintensiver Prozesse
 - Realisierung von Energieeffizienzmaßnahmen
 - Änderung von Verfahren zur Herstellung eines Produktes (Technologiewechsel)
- Entwicklung der Nachfrageseite
- Änderung regulatorischer Rahmenbedingungen
- Erweiterung der Flexibilität (Nutzung weiterer stromintensiver Prozesse)
- Möglichkeit der Elektrifizierung bzw. Hybridisierung

Alle oben genannten Aspekte werden anhand einer Literaturrecherche analysiert, zusätzlich werden diese Aspekte im Rahmen der Befragungen mit Verantwortlichen von Unternehmen diskutiert und Berechnungen durchgeführt. In diesen Berechnungen wird die zukünftige Potenzialermittlung beispielsweise durch veränderte spezifische Stromverbräuche oder Produktionsmengen abgebildet.

Kosten

Die Veränderung von Investitionen, fixer und variabler Kosten zur Abbildung der zukünftigen Entwicklung wird ebenfalls analysiert. Dazu werden Befragungen von Vermarktern und Betrieben durchgeführt. Eine genauere Analyse weiterer Veränderungen von Kostenbestandteilen wird im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt.

¹⁰ Der Preis entspricht dem aufgerundeten, mittleren EEX Base Strompreis für 2013 /EPEX-02 14/.

4.2 Querschnittstechnologien

Die Literaturrecherche zeigt, dass für Querschnittstechnologien keine detaillierte Potenzialermittlung durchgeführt wurde. Bisher liegen lediglich vereinfachte Abschätzungen für einzelne Technologien vor.

4.2.1 Geeignete Anlagen

Da für die Querschnittstechnologien bisher keine Detailanalyse vorliegt, werden zunächst die gängigen Querschnittstechnologien im Rahmen dieser Arbeit identifiziert, einer genauen Betrachtung unterzogen und geprüft, welche der Technologien für eine flexible Fahrweise geeignet sind. Die hier dargestellte Zusammenfassung basiert auf /FFE-49 16/. Zu den typischerweise in der Industrie eingesetzten Querschnittstechnologien zählen beispielsweise Lüftungsanlagen, Kälteerzeugung und -verteilung, Wärmeerzeugung und -verteilung, Beleuchtung sowie Druckluft. Im weiteren Sinne können auch Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen sowie Netzersatzanlagen als Querschnittstechnologien genannt werden. In **Tabelle 4-5** sind die vorhandenen Querschnittstechnologien sowie die möglichen, flexibilisierbaren Anlagenteile bzw. Komponenten des jeweiligen Systems aufgelistet.

Tabelle 4-5: *Flexibilisierbare Systemkomponenten von Querschnittstechnologien*

Querschnittstechnologie	Flexibilisierbare Anlagen bzw. Komponenten des Systems
Lüftung	Motoren von Ventilatoren (Zu- und Abluft)
Klimakälte	Elektrische Verdichter von Kompressionskältemaschinen und Splitgeräten, Motoren von Ventilatoren von Kühltürmen, Motoren von Umwälzpumpen
Prozesskälte	Elektrische Verdichter von Kompressionskältemaschinen und Splitgeräten, Motoren von Ventilatoren von Kühltürmen, Motoren von Umwälzpumpen
Pumpen	Motoren von Grundwasserpumpen, Umwälzpumpen (Behälter) und Trinkwasserpumpen
Raumwärme und elektrische Warmwasserbereitung	Wärmepumpen, Heizstäbe zur elektrischen Warmwasserbereitung, Heizungsumwälzpumpen, Motoren von Ventilatoren von dezentralen Luftherzern
Prozesswärme	Widerstandserwärmung: elektrische Prozesswärmeerzeugung mittels Elektro-/Elektrodenkessel
Druckluft	Elektrische Verdichter von Kompressoren
Beleuchtung	Elektronische Vorschaltgeräte von Leuchtmitteln
Fördertechnik	Motoren von Regalbediengeräten in Hochregallagern, Antriebe von Fließbändern
Informationstechnologie / EDV	Server
Kraft-Wärme-Kopplung	KWK-Anlage
Netzersatzanlagen	Notstromaggregat

Die Auswahl der für eine Flexibilisierung relevanten und auch nutzbaren Querschnittstechnologien erfolgt zum einen durch eine Befragung der Energieverantwortlichen verschiedener Unternehmen, zum anderen anhand der mittleren Leistungsgrößen der Technologien. Anlagen, welche eine spezifisch hohe Investition bezogen auf die installierte Leistung aufweisen, werden aufgrund des im Verhältnis hohen Aufwands für die Erschließung bzw. das Schaltbarmachen nicht berücksichtigt.

Aufgrund unzureichender technischer Daten, wie beispielsweise installierte Leistung oder mittlere Last, für eine Abbildung des Ist-Zustandes und eine ausreichend genaue Quantifizierung des Lastflexibilisierungspotenzials werden die Technologien Fördertechnik, Informationstechnologie / EDV und Netzersatzanlagen nicht im Detail betrachtet. Dies ist auch der Fall bei KWK-Anlagen. Allerdings sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass bereits einige Unternehmen ihre KWK-Anlagen flexibel betreiben und damit an den Regelleistungsmärkten teilnehmen (Minutenreserve oder Sekundärregelleistung). Die Befragung dieser Unternehmen ergab, dass überwiegend ältere BHKWs, welche sich nicht mehr in Betrieb befinden, für die Bereitstellung positiver Leistung genutzt werden. Üblicherweise übernehmen neuere BHKWs strom- und wärmeseitig die Grundlastdeckung, daher werden diese Anlagen tendenziell für die Vermarktung negativer Leistung genutzt.

4.2.2 Akzeptiertes Potenzial

Die Methodik zur Ermittlung des Lastflexibilisierungspotenzials bei Querschnittstechnologien bzw. derer technischer Kennwerte ist in **Abbildung 4-11** dargestellt und basiert auf /FFE-49 16/. Die linke Säule beschreibt die Herleitung des Anlagenbestandes in den einzelnen Branchen. Dieser Datensatz beinhaltet technische Spezifika, wie z.B. Stromverbrauch und installierte Leistung je Querschnittstechnologie. Als Basisdaten dienen umfangreiche, detaillierte Erhebungen aus den LEEN der FfE GmbH /FFE-31 14/. Diese detaillierten technischen Informationen liegen für mehr als 50 Betriebe vor und werden für die Erfassung der Lastflexibilisierungspotenziale aufbereitet und analysiert. In die weitere Auswertung fließen beispielsweise folgende Angaben je Standort ein:

- Branche
- Gesamtstromverbrauch
- Stromlastgang
- Stromverbrauch je Querschnittstechnologie
- Installierte Leistung der einzelnen Anlagen je Querschnittstechnologie
- Regelungsart der einzelnen Anlagen (keine Regelung, Stufen- oder Drehzahlregelung)

Die mittlere Säule stellt dar, welche Daten in die Methodik eingehen, um das jeweilige Lastflexibilisierungspotenzial zu ermitteln. Die Angaben zu Abrufdauer und zu- und abschaltbarer Leistung je flexibilisierbarer Anlage stammen aus der Befragung von Energieverantwortlichen, Auswertungen der LEEN der FfE GmbH sowie aus Expertenschätzungen aufgrund einer Vielzahl an Betriebsbegehungen. Die dritte Säule symbolisiert die regionale Verteilung der Stromverbräuche. Diese wiederum werden über das Regionenmodell des FfE e.V. genutzt und dienen dazu, den Anlagenbestand sowie das Flexibilitätspotenzial auf Landkreisebene abzubilden.

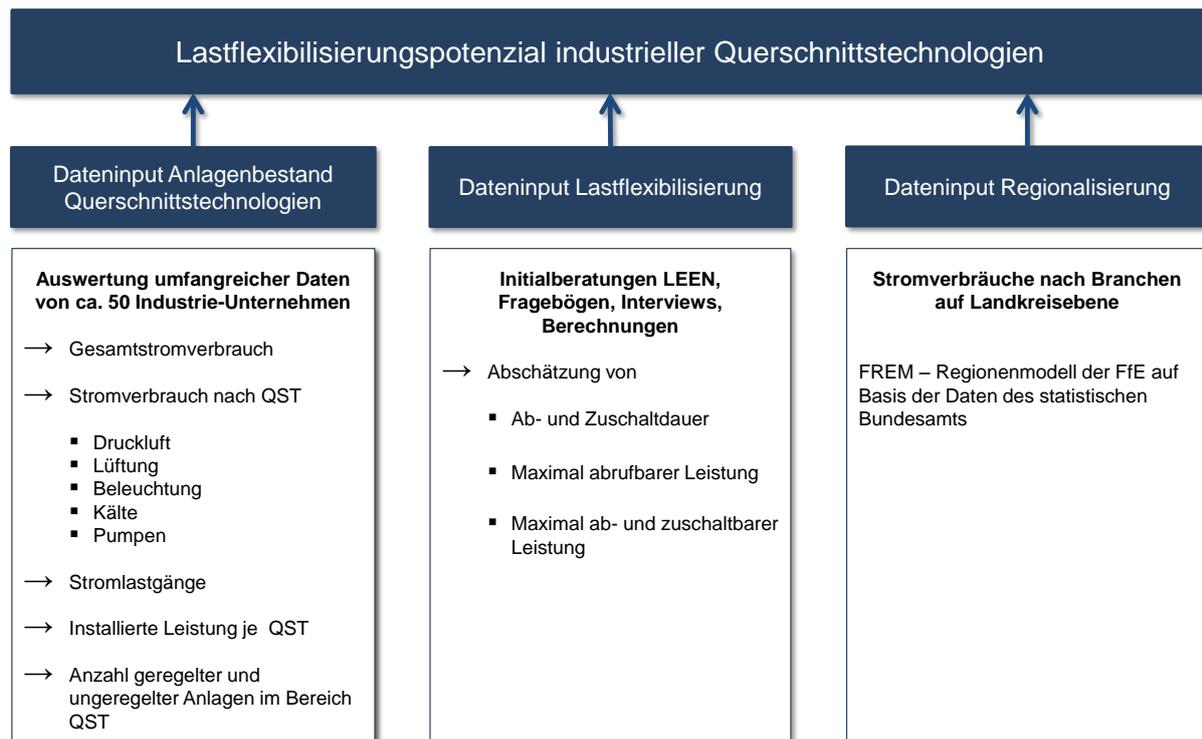


Abbildung 4-11: *Methodik zur Ermittlung des akzeptierten Lastflexibilisierungspotenzials industrieller Querschnittstechnologien / FFE-49 16/*

Das Lastflexibilisierungspotenzial wird anschließend nach Branchen und Querschnittstechnologien differenziert ausgewiesen. Da die betrachteten Querschnittstechnologien in einigen Branchen eine ähnliche Betriebsweise aufweisen, werden diese Branchen im ersten Schritt zu Branchengruppen zusammengefasst. Die Unternehmensdaten werden zusätzlich mit Angaben aus der Literatur verglichen, um sicherzustellen, dass die ausgewerteten Betriebe in etwa dem Durchschnitt der Industrie entsprechen.

Die detaillierte Herleitung der flexibilisierbaren Leistung je Querschnittstechnologie und Branchengruppe ist in **Abbildung 4-12** dargestellt. Anhand des Gesamtstromverbrauchs und der spezifischen installierten Leistung je Querschnittstechnologie wird die installierte Leistung je Querschnittstechnologie bestimmt. Durch Kenntnis des Betriebszustands wird die mittlere Last errechnet. Die flexibilisierbare Leistung ergibt sich durch Multiplikation der mittleren Last mit einem Flexibilitätsfaktor. Berücksichtigung findet auch die Abrufdauer, welche stark mindernd auf das vorhandene Potenzial wirkt.

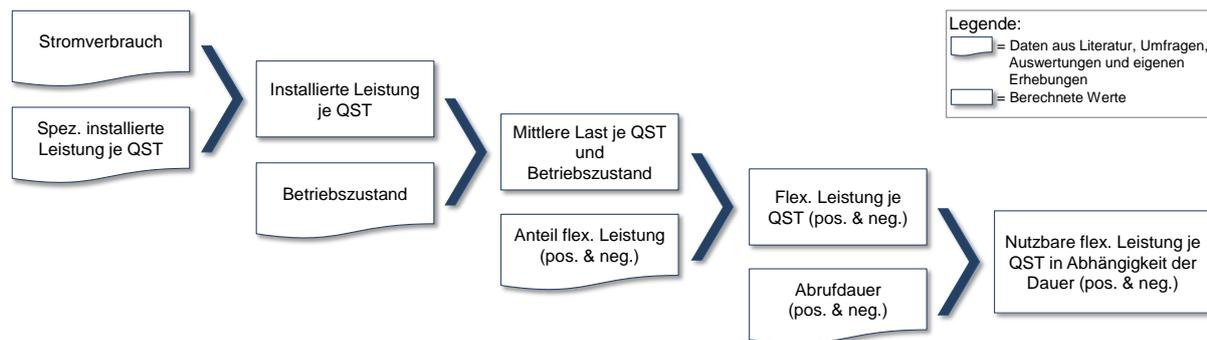


Abbildung 4-12: *Detaillierte Methodik zur Ermittlung des akzeptierten Lastflexibilisierungspotenzials von Querschnittstechnologien je Branchengruppe*

Festlegung von Branchengruppen

Die ca. 50 in die Auswertung technischer Informationen einbezogenen Unternehmen aus den LEEN werden zunächst unterschiedlichen Branchen zugeordnet. Aufgrund der nicht repräsentativen Stichprobengröße wird darauf geachtet, ähnliche Einsatzbereiche von Querschnittstechnologien zusammenzufassen. Beispielsweise werden Unternehmen der Branchen Maschinen- und Fahrzeugbau aufgrund der ähnlichen Nutzung von Lüftungsanlagen, Druckluftkompressoren und Kälteerzeugungsanlagen in einer Branchengruppe zusammengefasst. **Tabelle 4-6** zeigt die Zuordnung verschiedener Wirtschaftszweige zu den gewählten Branchengruppen.

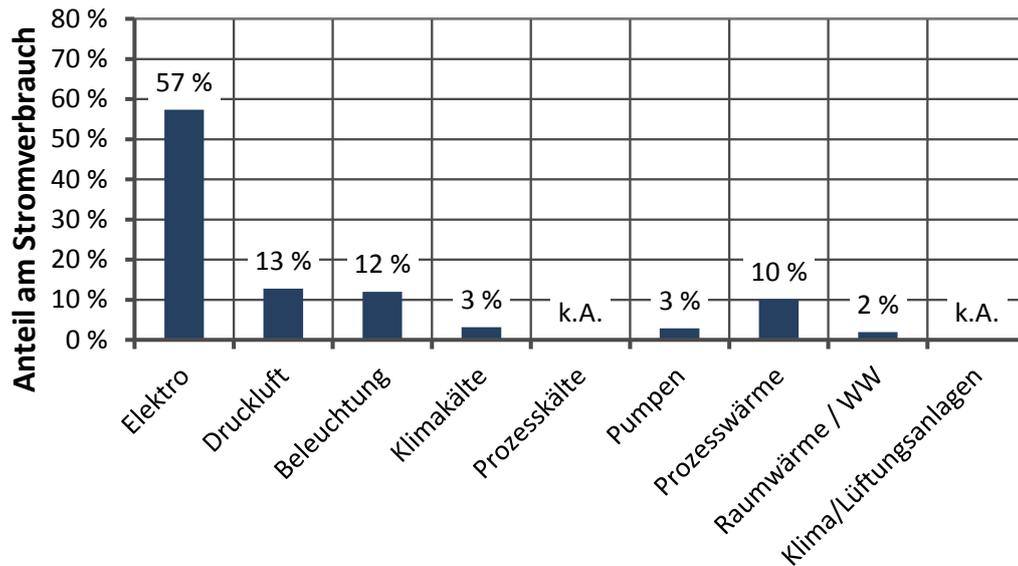
Tabelle 4-6: Zuordnung von Wirtschaftszweigen zu Branchengruppen

Branchengruppe	Zugeordnete Wirtschaftszweige*
Ernährung und Tabak	Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln, Getränkeherstellung, Tabakverarbeitung
Papier	Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus
Chemie	Herstellung von chemischen Erzeugnissen, Herstellung von pharmazeutischen Erzeugnissen
Glas, Keramik, Steine, Erden	Gewinnung von Steinen und Erden, sonstiger Bergbau, Erbringung von Dienstleistungen für den Bergbau und für die Gewinnung von Steinen und Erden, Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden
(Nichteisen-)Metallerzeugung, Metallbearbeitung	Metallerzeugung und -bearbeitung, Herstellung von Metallerzeugnissen
Maschinenbau, Fahrzeugbau	Maschinenbau, Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen, Sonstiger Fahrzeugbau, Reparatur und Installation von Maschinen und Ausrüstungen
Sonstige Wirtschaftszweige	Herstellung von Textilien, Herstellung von Bekleidung, Herstellung von Leder, Lederwaren und Schuhen, Herstellung von Holz-, Flecht-, Korb- und Korkwaren (ohne Möbel), Herstellung von Druckerzeugnissen, Vervielfältigung von bespielten Ton-, Bild- und Datenträgern, Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen, Herstellung von elektrischen Ausrüstungen, Herstellung von Möbeln, Herstellung von sonstigen Waren

* Klassifikation der Wirtschaftszweige nach /DESTATIS-07 08/

Validierung der Unternehmensdaten mit Literaturwerten

Bevor die technischen Daten der ca. 50 Unternehmen für eine umfangreiche Analyse genutzt werden, wird geprüft, ob diese Betriebe in etwa den Durchschnitt der Industrie darstellen. Dazu wird je Standort eine Aufteilung des Stromverbrauchs nach Anwendungsarten vorgenommen. Diese Daten werden wiederum mit den veröffentlichten Verbräuchen aus den Anwendungsbilanzen des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung verglichen, welche in **Abbildung 4-13** dargestellt sind /ISI-03 13/.



**Querschnittstechnologie in der Branchengruppe
Maschinen- und Fahrzeugbau**

Abbildung 4-13: Aufteilung des Stromverbrauchs nach Anwendungsarten am Beispiel des Maschinen- und Fahrzeugbaus nach /ISI-03 13/ für das Jahr 2012

Installierte Leistung je Querschnittstechnologie und Branchengruppe

Um den flexibilisierbaren Anteil je Querschnittstechnologie bestimmen zu können, muss zunächst der Anlagenbestand abgebildet werden. Dazu werden die Daten der Unternehmen genutzt und die installierte Leistung je Querschnittstechnologie und Standort ausgewertet. Für jeden Betrieb wird anschließend ein Kennwert gebildet. Dieser stellt die spezifische installierte Leistung je Querschnittstechnologie bezogen auf den Stromverbrauch des Betriebs dar und wird mit dem Faktor u bezeichnet.

$$u_{QST,i,j} = \frac{P_{inst,QST,i,j}}{E_{el,ges,i,j}} \tag{33}$$

- u Installierte Leistung bezogen auf den Gesamtstromverbrauch
- i Branche
- j Unternehmen
- QST Querschnittstechnologie

Der Faktor u je Querschnittstechnologie und Branche ergibt sich aus der Mittelwertbildung aller Standort-Kennwerte je Branchengruppe:

$$u_{QST,i} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n u_{QST,i,j} \tag{34}$$

- n Anzahl Unternehmen

Alternativ besteht die Möglichkeit, statt des arithmetischen Mittels ein gewichtetes Mittel aus den einzelnen Kennwerten zu bilden. Da die in die Auswertung einbezogenen Unternehmen nicht die Verteilung der gesamten Branchengruppe widerspiegeln, wurde hier auf eine Gewichtung verzichtet. Auch in der Literatur existiert keine ausreichend gute Datengrundlage für eine Betriebsgrößenverteilung je Branchengruppe, welche für eine Gewichtung herangezogen werden hätte können.

Die installierte Leistung je Querschnittstechnologie und Branchengruppe berechnet sich somit aus:

$$P_{el,inst,QST,i} = u_{QST,i} \cdot E_{el,ges,i} \quad (35)$$

Mittlere Last je Querschnittstechnologie und Branchengruppe in Abhängigkeit der Tageszeit

Ein Großteil der Anlagen weist eine deutlich höhere installierte Leistung im Vergleich zur mittleren Last auf. Letztere wirkt sich entscheidend auf die maximal zu- und abschaltbare Leistung aus. Da die mittlere Leistung im Tagesverlauf in Abhängigkeit des Betriebszustands variiert, wird diese für verschiedene Betriebszustände bestimmt. Ein typischer Gesamtlastgang im Tagesverlauf wird dabei, wie in **Abbildung 4-14** dargestellt, in drei verschiedene Zustände aufgeteilt.

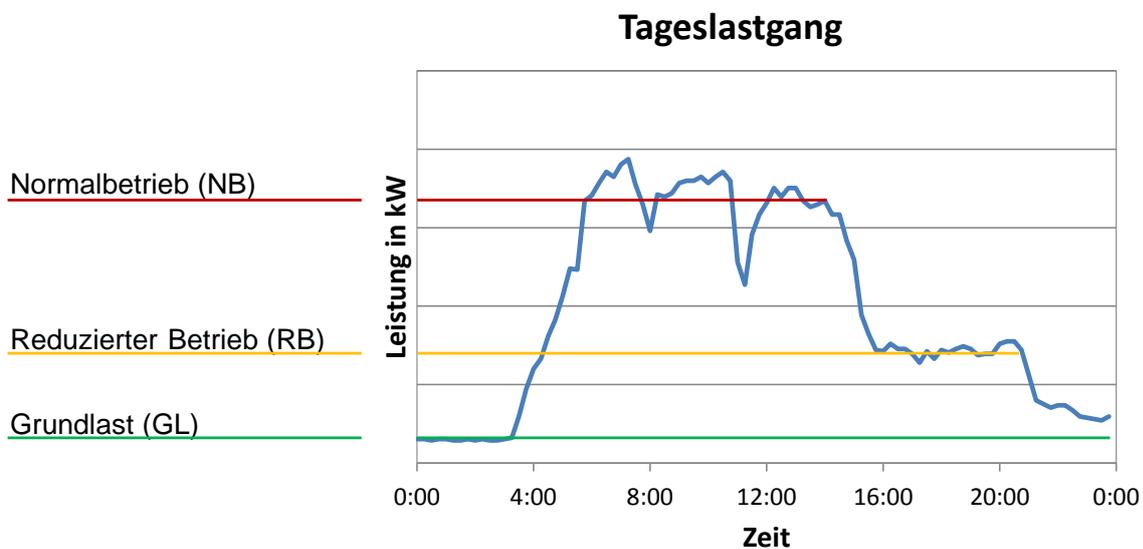


Abbildung 4-14: *Mittlere Last in Abhängigkeit des Betriebszustands am Beispiel eines Tageslastgangs eines Unternehmens /FFE-49 16/*

Es werden folgende Betriebszustände definiert:

- $b = 1$ Normalbetrieb: alle Abteilungen produzieren
- $b = 2$ Reduzierter Betrieb: nur ein Teil der Abteilungen produziert z.B. in der dritten Schicht
- $b = 3$ Grundlast: produktionsfreie Zeit
- $b = 4$: Sonntagnachmittag (nicht dargestellt)

Um die absolute mittlere Last je Querschnittstechnologie in Abhängigkeit des Betriebszustands zu bestimmen, wird vereinfachend folgender Ansatz gewählt: Die Leistungsaufnahme der Querschnittstechnologie verhält sich wie der Gesamtlastgang.

Im nächsten Schritt werden die Stromlastgänge der einzelnen Unternehmen analysiert. Dabei wird für jeden Betrieb anhand der Jahresdauerlinie, der typischen Wochenlastprofile sowie der Angaben zu dem jeweils vorhandenen Schichtmodell bestimmt, welchen Anteil der Zeit sich der Betrieb in welchem der drei Betriebszustände befindet (vgl. **Abbildung 4-15**).

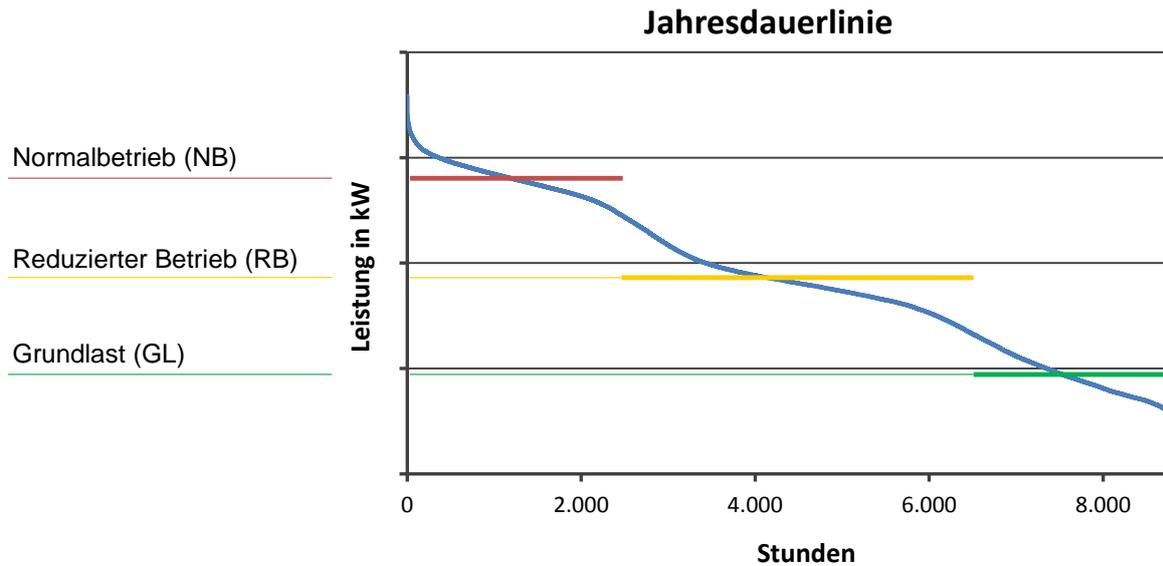


Abbildung 4-15: Exemplarische Einteilung der Jahresdauerlinie in verschiedene Betriebszustände

Für die Berechnung der absoluten mittleren Last im Normalbetrieb wird zunächst die Gesamtenergiebilanz für den Stromverbrauch aufgestellt. Diese lässt sich mit **Formel (36)** wie folgt abbilden:

$$E_{el,i,j} = \emptyset P_{el,i,j,NB} \cdot t_{i,j,NB} + \emptyset P_{el,i,j,RB} \cdot t_{i,j,RB} + \emptyset P_{el,i,j,GL} \cdot t_{i,j,GL} \quad (36)$$

NB	Normalbetrieb
RB	Reduzierter Betrieb
GL	Grundlast

Somit ergibt sich durch Umstellung und Anpassung der Gleichung auf einzelne Querschnittstechnologien folgende **Formel (37)** für die Berechnung der absoluten mittleren Last im Normalbetrieb:

$$\emptyset P_{el,i,j,QST,NB} = \frac{E_{el,QST,i,j}}{t_{i,j,NB} + \frac{\emptyset P_{el,i,j,RB}}{\emptyset P_{el,i,j,NB}} \cdot t_{j,RB} + \frac{\emptyset P_{el,i,j,GL}}{\emptyset P_{el,i,j,NB}} \cdot t_{i,j,GL}} \quad (37)$$

Die absoluten mittleren Lasten für den reduzierten Betrieb und die Grundlast errechnen sich aus:

$$\emptyset P_{el,i,j,QST,RB} = \emptyset P_{el,i,j,QST,NB} \cdot \frac{\emptyset P_{el,i,j,RB}}{\emptyset P_{el,i,j,NB}} \quad (38)$$

$$\emptyset P_{el,i,j,QST,GL} = \emptyset P_{el,i,j,QST,NB} \cdot \frac{\emptyset P_{el,i,j,GL}}{\emptyset P_{el,i,j,NB}} \quad (39)$$

Wird die absolute mittlere Last des jeweiligen Betriebszustands wiederum auf die installierte Leistung je Querschnittstechnologie bezogen, ergibt sich die prozentuale mittlere Last je Querschnittstechnologie und Betriebszustand:

$$f_{i,j,QST,b} = \frac{\emptyset P_{el,i,j,QST,b}}{P_{el,i,j,QST,inst}} \quad (40)$$

f Auslastung (mittlere Last bezogen auf installierte Leistung)
b Betriebszustand

Diese Berechnungen werden für alle Betriebe je Querschnittstechnologie und Betriebszustand durchgeführt. Anschließend wird wiederum je Branchengruppe ein arithmetisches Mittel für die prozentuale Leistungsaufnahme je Querschnittstechnologie und Zustand gebildet:

$$f_{i,QST,b} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n f_{i,j,QST,b} \quad (41)$$

Flexibilisierbare Leistung je Querschnittstechnologie und Branchengruppe

Im nächsten Schritt wird die flexibilisierbare Leistung je Querschnittstechnologie und Betriebszustand berechnet. Dazu wird die mittlere Last mit dem flexibilisierbaren Anteil bzw. Flexibilitätsfaktor z , welcher einen Wert zwischen 0 und 100 % erreichen kann, multipliziert.

$$P_{el,flex,i,QST,b} = \emptyset P_{el,i,QST,b} \cdot z_{i,QST,b} \quad (42)$$

Zur Bestimmung des Flexibilitätsfaktors je Querschnittstechnologie und Betriebszustand werden folgende verschiedene Methoden genutzt:

- Befragung von Unternehmen und Vermarktern
- Abgleich der Angaben der Unternehmen mit Erfahrungswerten aus den Betriebsbegehungen im Rahmen der LEEN
- Literaturrecherche

Bisher geht der gesamte Stromverbrauch aller Industrieunternehmen in die Berechnung des Lastflexibilisierungspotenzials für Querschnittstechnologien ein. Dieser beinhaltet die Verbräuche aller Industriebetriebe ohne Berücksichtigung der Größenverteilung der einzelnen Standorte. Dies bedeutet, dass das berechnete Potenzial vermutlich das akzeptierte Potenzial übersteigt. Nachfolgend wird zusammengefasst, welche weiteren Faktoren mindernd oder sogar steigernd auf das Potenzial wirken. Alle im Folgenden genannten Aspekte gehen ebenfalls in die Bestimmung des Flexibilitätsfaktors z mit ein:

- Berücksichtigung der Nichtverfügbarkeit von Anlagen: Vereinzelt stehen Anlagen für einen Abruf aufgrund von Wartung, Reparatur oder sonstigen Instandhaltungsmaßnahmen nicht zur Verfügung.
- Nicht abschaltbare Anlagen: Für einige Anlagen gelten gesetzliche Vorschriften, wie beispielsweise für Lüftungsanlagen im chemischen oder pharmazeutischen Bereich. Dort muss in Produktionsbereichen stets eine Mindestluftwechselrate eingehalten werden. Unter diesen Umständen ist eine flexible Betriebsweise der Anlage nicht zulässig. Auch bei Absauganlagen kann der Volumenstrom oft nicht reduziert werden.
- Vorhandensein, Größe und Art eines Speichers: Sofern ein Speicher (z.B. Druckluft-, Wärme- oder Kältespeicher) vorhanden ist, können Erzeugung und Verbrauch voneinander entkoppelt werden, was eine Flexibilisierung von Anlagen begünstigt. Die Größe des Speichers hat wiederum Einfluss auf die Abrufdauer.
- Das Zuschalten von Anlagen ohne Speicherwirkung wird aus folgenden Gründen nicht betrachtet: Üblicherweise kommen Lüftungsanlagen zur Aufrechterhaltung einer definierten Luftqualität zum Einsatz. Ist dies der Fall, kommt eine Erhöhung des Volumenstroms oder Zuschaltung der Anlage aufgrund einer Flexibilitätsvermarktung nicht in Frage, da die überschüssige Energie nicht gespeichert werden kann. Wird diese jedoch zur Temperierung eines Raumes eingesetzt, wäre eine teilweise flexible Betriebsweise denkbar. Da dies in den meisten Fällen nicht der Fall ist, wird vereinfachend davon ausgegangen, dass kein negatives Potenzial vorhanden ist. Ebenso verhält es sich mit der Erhöhung der Beleuchtungsstärke. Dadurch wird lediglich ein Mehrverbrauch generiert, auch diese Variante wird als Flexibilitätsoption ausgeschlossen.
- Mindestbetriebsgröße: Unternehmen mit einem Stromverbrauch von weniger als 5.000 MWh/a werden für die Potenzialermittlung zur Lastflexibilisierung nicht berücksichtigt, da dort meist nur Anlagen mit einer geringen installierten Leistung vorhanden sind und die Aufschaltung auf ein automatisiertes System in diesem Fall zu hohe Investitionen mit sich bringen würde¹¹.
- Sonstige Wirtschaftszweige: Da diese Gruppe sehr heterogen ist, wird das ermittelte Potenzial durch einen zusätzlich limitierenden Faktor um etwa 20 % nach Expertenschätzung reduziert.

¹¹ Nach Aussagen verschiedener Vermarkter ist eine wirtschaftliche Vermarktung von Flexibilitäten ab flexibilisierbaren Leistungen von 500 kW möglich. Um diesen Aspekt abzubilden, wird ein Mindeststromverbrauch je Unternehmen angesetzt. Nach Expertenschätzung wird die Grenze mit mindestens 5.000 MWh/a angesetzt.

4.2.3 Zeitliche Verfügbarkeit

Wie bereits in Kapitel 4.1.3 erwähnt, hat die zeitliche Verfügbarkeit einen wesentlichen Einfluss auf die Höhe des technischen bzw. akzeptierten Potenzials.

Die Bestimmung der Parameter zur zeitlichen Abhängigkeit, wie beispielsweise Lastgradient, Abrufdauer, Abrufhäufigkeit oder Sperrzeit, wird wiederum anhand von Unternehmensbefragungen durchgeführt. Auch hier werden ergänzend Experteneinschätzungen aus Betriebsbegehungen sowie Literaturwerte zum Datenabgleich genutzt. Zudem werden eigene Berechnungen bzgl. Speicherkapazitäten durchgeführt. Die Methodik wird bereits in /FFE-49 16/ beschrieben.

Weiteren Einfluss auf das Potenzial haben folgende zeitliche Parameter, welche hier deutlicher ausgeprägt als bei den stromintensiven Prozessen sind:

- Tageszeitliche Abhängigkeit
- Typtag-Abhängigkeit
- Saisonale Einflüsse

Die Abhängigkeiten von Tageszeit und Typtag werden bereits durch Abbildung verschiedener Betriebszustände dargestellt. Allerdings muss zusätzlich definiert werden, wie Brückentage und Feiertage sowie Sonntage behandelt werden. Vereinfachend werden Brückentage wie Samstag behandelt, Feiertage werden wie Sonntage angesetzt. Da sich allerdings nicht alle Betriebe sonntags im reinen Grundlastfall befinden, wird hier mittels Expertenschätzung je Branchengruppe ein Mischzustand aus den drei zuvor genannten Zuständen gebildet. Dabei wird berücksichtigt, dass in einzelnen Branchen nahezu kontinuierlich produziert wird, dass aber auch Betriebe in diesen Branchen existieren, die geringere Produktionszeiten aufweisen (z.B. Zweischichtbetrieb oder Dreischichtbetrieb nur werktags). Dieser Betriebszustand wird im weiteren Verlauf als $b = 4$: Sonntagnachmittag bezeichnet.

Ob saisonale Abhängigkeiten vorhanden sind, wird für jede Querschnittstechnologie separat untersucht. Sofern diese bestehen, wird dies über einen saisonalen Faktor für die jeweilige Technologie abgebildet.

Fragebogen

Wie bereits erwähnt, werden im Rahmen der Arbeit Expertenbefragungen (Energieverantwortliche von Unternehmen, Vermarkter etc.) durchgeführt. Der hierzu erstellte Fragebogen beinhaltet Fragen sowohl zu technischen als auch zu ökonomischen Parametern. Bei der Fragebogenerstellung werden unter anderem Umfragen aus FfE-Studien, anderer Institute sowie die Erkenntnisse aus den LEEN zu Querschnittstechnologien genutzt /FFE-31 14/, /FFE-09 13/. Der Fokus des Fragebogens liegt, anders als in bisherigen Studien und Befragungen, auf Querschnittstechnologien. Explizit werden im Fragebogen die Flexibilisierungsmöglichkeiten folgender Querschnittstechnologien abgefragt:

- Lüftung
- Kälte (Klima- und Prozesskälte)
- Beleuchtung
- Druckluft
- Pumpen

- Wärme (Raum- und Prozesswärme)
- Informationstechnologie / EDV (Server)
- Fördertechnik

Weitere Erkenntnisse aus den Befragungen sind beispielsweise Hinweise auf vorhandene technische und organisatorische Hemmnisse sowie grundsätzliche Vorbehalte in den Betrieben. Der Fragebogen gliedert sich in folgende drei Teile:

- Allgemeine Angaben zum Unternehmen
- Erhebung des akzeptierten Potenzials von Querschnittstechnologien
- Erhebung der Kosten (Investitionen, fixe Betriebskosten und variable Kosten)

Die Beantwortung der Fragebögen erfolgt in Vor-Ort-Interviews. Das bietet die Möglichkeit, einzelne Fragen nochmals zu erläutern und zu diskutieren sowie einen tieferen Einblick bezüglich technischer und ökonomischer Aspekte bei der Flexibilisierung zu erhalten. Neben Energieverantwortlichen dienen Produktionsleiter, Leiter des Facility Managements und Controller als Interviewpartner. Durch die Befragung von Personen verschiedener technischer und wirtschaftlicher Fachrichtungen können neben technischen Details zu Anlagen auch Produktionsabläufe sowie ggf. anfallende Kosten eruiert werden.

Ergänzend zu dem im Rahmen der Arbeit entwickelten Fragebogen werden Ergebnisse aus etwa 100 Experteninterviews der FfE GmbH für die Potenzialermittlung genutzt. In den Gesprächen mit Energieverantwortlichen, Controllern und Produktionsleitern aus den von der FfE GmbH betreuten LEEN sowie den Energieaudits der FfE GmbH wird diskutiert, inwiefern einzelne Anlagen aus Betriebs- oder Systemsicht flexibel betrieben werden können, welche Leistung über welchen Zeitraum zur Verfügung steht, wie häufig ein Abruf erfolgen kann und ob weitere Schritte für eine flexible Betriebsweise erforderlich sind. Auf Basis dieser Erkenntnisse werden akzeptierte Potenziale je Querschnittstechnologie aus den technischen Kennwerten abgeleitet.

4.2.4 Räumliche Verfügbarkeit

Zur regionalen Verteilung der Lastflexibilisierungspotenziale bei Querschnittstechnologien dient wiederum, wie bereits in /FFE-49 16/ beschrieben, das Regionenmodell des FfE e.V. /FFE-39 14/. Dort sind die industriellen Stromverbräuche je Branchengruppe und Landkreis hinterlegt, wie in **Abbildung 4-16** ersichtlich. Diese dienen im Weiteren als Eingangsgrößen für die Ermittlung der Lastflexibilisierungspotenziale auf Landkreisebene (siehe Formel (35)). Auch hier werden die Stromverbräuche der Wirtschaftszweige zu den genannten Branchengruppen zusammengefasst.

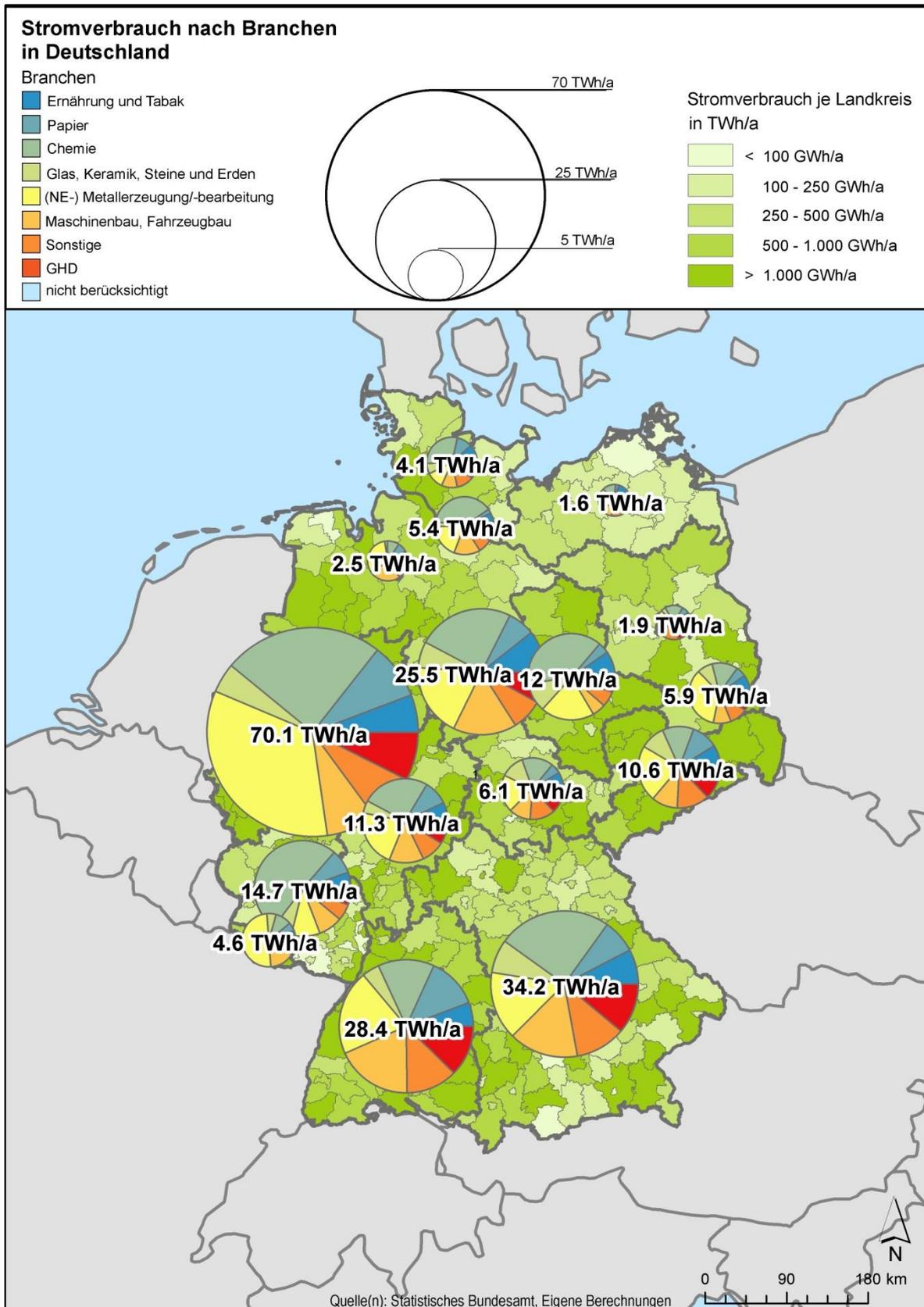


Abbildung 4-16: *Stromverbrauch der Industrie nach Bundesländern und Branchengruppen für das Jahr 2012 /FFE-49 16/*

4.2.5 Kosten

Die Quantifizierung von Kosten bei der Erschließung und anschließenden Flexibilisierung von Querschnittstechnologien erfolgt anhand der Befragung von Betrieben und Vermarktern und wird bereits in /FFE-49 16/ beschrieben. Zum einen werden Unternehmen befragt, welche noch keine schaltbaren Leistungen zur Verfügung stellen. Die Angaben dieser Firmen sind als Abschätzung zu verstehen, welche Investitionen, fixe und variable Kosten anfallen würden, um schaltbare Lasten und Eigenerzeugungsanlagen zu vermarkten. Zum anderen werden Unternehmen interviewt, die einen Teil ihrer Anlagen bereits als Flexibilität zur Verfügung stellen. Auch hier werden die verschiedenen Kostenbestandteile abgefragt. Die erhobenen Kosten werden anschließend mit Literaturangaben verglichen. Darüber hinaus werden zusätzlich eigene Berechnungen zur Validierung der Angaben getätigt.

Wechselwirkungen zwischen Flexibilität und Energieeffizienz

Wie bereits in Kapitel 4.1.5 erläutert, können Wirkungsgradverluste durch eine flexible Betriebsweise von Anlagen zusätzliche variable Kosten verursachen. Nachfolgend wird die Berechnung der Wirkungsgradveränderung durch Flexibilisierung bei Querschnittstechnologien dargelegt. Diese Methodik wird bereits in /FFE-26 16/ erläutert, eine detaillierte Beschreibung erfolgt jedoch erst im Rahmen dieser Arbeit.

Der Stromverbrauch ohne Beeinflussung durch eine Flexibilisierung errechnet sich aus der Multiplikation von Leistungsaufnahme und Betriebsstunden.

$$E_{el,QST,a} = P_{el,prod,QST} \cdot t_{prod,QST} \quad (43)$$

Die elektrische Leistungsaufnahme ergibt sich aus der mechanischen Leistung, welche dividiert wird durch das Produkt aus dem mechanischen Wirkungsgrad der Kraftübertragung und dem elektrischen Wirkungsgrad des Antriebs.

$$P_{el,QST} = \frac{P_{mech,QST}}{\eta_{el} \cdot \eta_{Kr}} \quad (44)$$

mech	mechanisch
Kr	Kraftübertragung

Durch die Vermarktung von Flexibilität ergibt sich ein veränderter Stromverbrauch, welcher darauf zurückzuführen ist, dass sich der Arbeitspunkt entweder bei der Vorhaltung oder einem Abruf verschiebt.

$$E_{el,flex,QST,a} = E_{el,vor,QST} + E_{el,abruf,QST} + E_{el,nach,QST} \quad (45)$$

Im nächsten Schritt wird anhand des neuen Arbeitspunktes die benötigte mechanische Leistung bestimmt. Da sich elektrischer Wirkungsgrad und Wirkungsgrad der

Kraftübertragung verändern, wird die elektrische Leistungsaufnahme nach **Formel (44)** neu berechnet.

Sofern ein Nachholbedarf besteht, ergibt sich die Zeit für das Nachholen aus der Division des noch benötigten, jährlichen Produktionsvolumens und dem stündlich erzeugten Volumenstrom des Mediums im nicht flexibilisierten Betriebsfall:

$$t_{el,nach,QST} = \frac{\dot{V}_{nach,QST,a}}{\dot{V}_{nach,QST,h}} \quad (46)$$

\dot{V} Volumenstrom

Da die Vorhalte- und Abrufstunden, wie auch schon bei den stromintensiven Prozessen, bereits vorgegeben sind, kann anschließend der neue Gesamtstromverbrauch ermittelt werden. Die Veränderung des Wirkungsgrades erfolgt wie in Formel (19) bereits beschrieben. Eine positive Veränderung des Gesamtwirkungsgrades entspricht wiederum einer Verbesserung der Energieeffizienz, eine negative Veränderung einer Verschlechterung.

Auch hier können die durch eine Wirkungsgradverschlechterung entstehenden variablen Kosten quantifiziert werden, indem die Wirkungsgradverschlechterung bei einem Abruf berechnet wird.

4.2.6 Zukünftige Entwicklung

Auch für die Querschnittstechnologien werden Faktoren identifiziert, welche einen Einfluss auf die zukünftige Entwicklung des Potenzials sowie der Kosten haben. Nachfolgend wird auf die Methoden für deren Bewertung eingegangen.

Akzeptiertes Potenzial

Entsprechend der Methodik für stromintensive Prozesse werden auch für die zukünftige Entwicklung der Lastflexibilisierung bei Querschnittstechnologien Einflussfaktoren identifiziert, welche sich auf die Höhe des Potenzials auswirken können. Diese sind im Folgenden aufgelistet und werden einer detaillierten Analyse unterzogen:

- Veränderung des industriellen Stromverbrauchs
 - Realisierung von Energieeffizienzmaßnahmen
 - Änderung von Verfahren zur Medienversorgung (z.B. Wechsel des Mediums, Technologiewechsel)
- Änderung regulatorischer Rahmenbedingungen
- Erweiterung der Flexibilität
- Möglichkeit der Elektrifizierung bzw. Hybridisierung (z.B. aufgrund eines Technologiewechsels)

Auch hierzu werden eine Literaturrecherche sowie Befragungen durchgeführt. Darüber hinaus dienen Experteneinschätzungen sowie eigene Berechnungen als Grundlage für die Abbildung der zukünftigen Entwicklung.

Einfluss von Energieeffizienzmaßnahmen auf das Lastflexibilisierungspotenzial

Bei stromintensiven Prozessen beinhaltet die Veränderung des spezifischen Stromverbrauchs häufig schon diverse Energieeffizienzmaßnahmen an den Anlagen selbst. Im Vergleich dazu werden bei Querschnittstechnologien häufig verschiedene Einzelmaßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung realisiert. Eine Ausweisung der gesamten Energieeffizienzsteigerung durch Umsetzung von Maßnahmenpaketen erfolgt häufig nicht. Daher wird im Rahmen der Arbeit analysiert, wie sich einzelne Energieeffizienzmaßnahmen auf das Lastflexibilisierungspotenzial bei Querschnittstechnologien auswirken. Die Methodik zur Quantifizierung der Auswirkungen von Energieeffizienzmaßnahmen auf das Lastflexibilisierungspotenzial ist in **Abbildung 4-17** dargestellt und basiert auf /FFE-49 16/ und /FFE-71 13/. Im ersten Schritt werden verschiedene Energieeffizienzmaßnahmen je Querschnittstechnologie identifiziert und bewertet. Ein Ranking erfolgt anhand deren Umsetzungswahrscheinlichkeit. Für Maßnahmen, welche eine hohe Umsetzungswahrscheinlichkeit aufweisen, wird anschließend quantifiziert, wie hoch deren Durchdringungsrate ist und welchen Einfluss die jeweilige Maßnahme auf die maximale Leistung bzw. installierte Leistung der einzelnen Anlage hat. Die Durchdringungsrate gibt an, wie hoch der Anteil der Industrie ist, in welchem eine einzelne Maßnahme mit hoher Wahrscheinlichkeit umgesetzt wird. Eine Maßnahme mit Beeinflussung der maximalen bzw. installierten Leistung hat eine geringere installierte Leistung zur Folge, was sich mindernd auf das negative bzw. zuschaltbare Potenzial auswirkt. Eine Erhöhung des Potenzials wird z.B. durch das Regelbarmachen von bisher nicht regelbaren Maschinen erreicht.

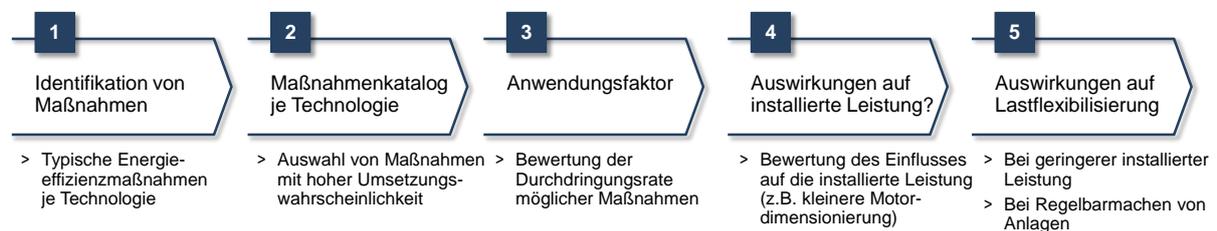


Abbildung 4-17: *Methodik zur Ermittlung der Auswirkungen von Energieeffizienzmaßnahmen auf das Lastflexibilisierungspotenzial von Querschnittstechnologien nach /FFE-49 16/*

Der Einfluss von Energieeffizienzmaßnahmen auf das Lastflexibilisierungspotenzial wird in der Berechnung durch Multiplikation der prozentualen Veränderung des positiven und negativen Potenzials mit dem zuvor ermittelten, zukünftigen akzeptierten Potenzial dargestellt.

Möglichkeiten der Elektrifizierung bzw. Hybridisierung

Eine Möglichkeit, die Flexibilität zukünftig zu erhöhen, besteht durch eine verstärkte Elektrifizierung in der Industrie. Als Beispiel kann hier die elektrische Erzeugung von Wärme (Prozess- und Raumwärme sowie Warmwasser) genannt werden. Voraussetzung für eine Erhöhung der Flexibilität ist nicht der Umstieg auf ein elektrisches System, vielmehr ist es die Hybridisierung, welche es ermöglicht, die Wärmeerzeugung von einem brennstoffbasierten System kurzfristig auf ein elektrisches umzustellen.

Die Methodik zur Quantifizierung des Elektrifizierungspotenzials basiert auf /FFE-06 15/ und wird nachfolgend in **Abbildung 4-18** dargestellt.

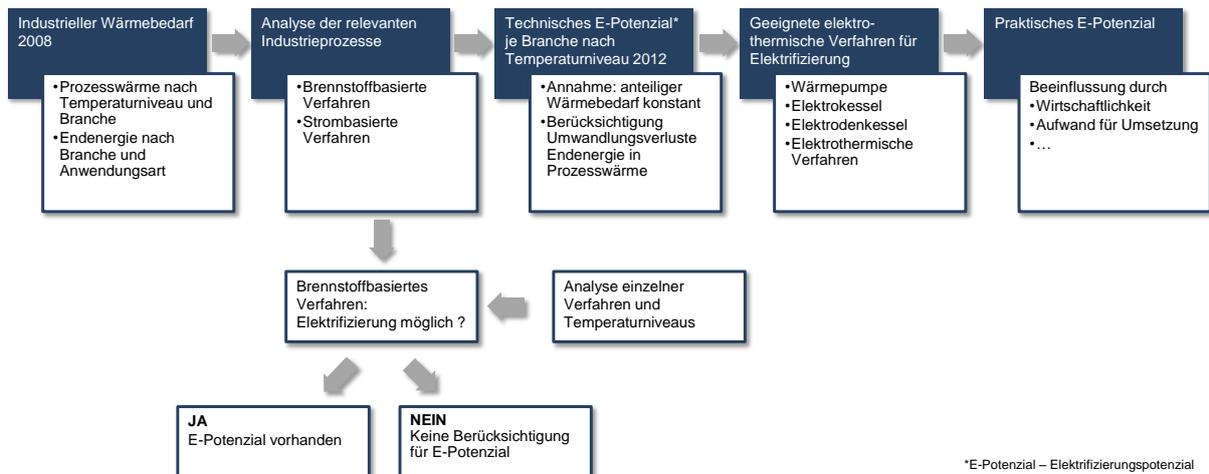


Abbildung 4-18: *Methodik zur Ermittlung des Elektrifizierungspotenzials brennstoffbasierter Prozesswärmeerzeugung nach /FFE-06 15/*

Im ersten Schritt wird der industrielle Wärmebedarf analysiert, dabei wird differenziert nach Anwendungsarten (Prozess- und Raumwärme sowie Warmwasserbereitung). Der Wärmeverbrauch nach Anwendungsart kann wiederum auf unterschiedliche Temperaturniveaus und Branchen sowie Energieträger aufgeteilt werden. Während bei bereits strombasierten Verfahren lediglich untersucht werden kann, ob weitere Anlagen flexibilisierbar sind, wird bei brennstoffbasierten Verfahren eine Bewertung hinsichtlich einer Elektrifizierung bzw. Hybridisierung der einzelnen Anlage oder Technologie vorgenommen. Die jeweiligen Verfahren werden auf deren Möglichkeit zur zusätzlichen strombasierten Wärmeerzeugung geprüft. Für Anlagen oder Technologien, bei denen eine Hybridisierung in Frage kommt, wird anschließend quantifiziert, wie hoch das dadurch zusätzlich entstehende technische Lastflexibilisierungspotenzial ist. Dabei wird berücksichtigt, dass die Umwandlungsverluste je nach Technologie unterschiedlich hoch sind. Von einer Quantifizierung des wirtschaftlichen Elektrifizierungspotenzials wird im Rahmen dieser Arbeit abgesehen, da hierzu noch nicht ausreichend Untersuchungen durchgeführt wurden.

Kosten

Die Entwicklung der zukünftigen Kosten bei Querschnittstechnologien wird im Rahmen der Befragung mit Betrieben und Aggregatoren¹² diskutiert. Zusätzlich werden Expertenschätzungen zur Validierung der Angaben herangezogen.

¹² Ein Aggregator übernimmt für das Unternehmen die Vermarktung. Der Betrieb schließt einen Vertrag über die Nutzung von Flexibilitäten mit dem Aggregator ab. Dieser aggregiert verschiedene Flexibilitäten unterschiedlicher Unternehmen und platziert diese anschließend an einem Markt.

4.3 Beitrag industrieller Flexibilitäten zum Engpassmanagement

Die entwickelte Methodik erlaubt die Bestimmung eines auf Landkreisebene aufgelösten Lastflexibilisierungspotenzials. Dieses ermöglicht eine Quantifizierung des Beitrags industrieller Flexibilitäten zur Integration Erneuerbarer Energien auf regionaler Ebene. Die regionale Auflösung für den Vergleich stellen die dena-Netzregionen nach /FFE-02 12/ dar.

Im Detail werden Maßnahmen des Engpassmanagements untersucht. Um diese durch die Flexibilisierung von stromintensiven Prozessen oder Querschnittstechnologien zu vermindern, bedarf es in der Modellierung verschiedener Rahmenbedingungen. Diese sowie die Berechnungsschritte werden im Folgenden beschrieben.

Für die jeweilige Modellierung liegen die Eingangsdaten für das Engpassmanagement nach /ÜNB-01 14/, /AVACON-01 16/, /BAYAG-02 16/, /EDIS-01 16/ und /SHN-01 16/ sowie für die in dieser Arbeit ermittelten Flexibilitäten in Intervallen von einer Minute vor.

Vor der Modellierung werden die quantifizierten Lastflexibilisierungspotenziale je Branche von der Landkreisebene auf die Ebene der dena-Netzregionen aggregiert. Diese Aggregation wird ebenso für die Redispatch- und Einspeisemanagementeinsätze, welche standortscharf vorliegen, durchgeführt.

Im nächsten Schritt werden Abrufdauer und Sperrzeit für jeden stromintensiven Prozess und jede Querschnittstechnologie in Abhängigkeit der Tageszeit festgesetzt (vgl. Kapitel 5.1.3 und 5.2.3). Anschließend werden für jede Sperrzeit die Redispatch- und Einspeisemanagementeinsätze je Netzregion analysiert und sowohl die positiven als auch die negativen Einsätze der Größe nach ab- bzw. aufsteigend sortiert. Die Zeitschritte, in denen zeitgleich positiver und negativer Redispatch benötigt wird, finden in der weiteren Modellierung keine Berücksichtigung. Die höchsten positiven und negativen Redispatch- und Einspeisemanagementeinsätze je Netzregion werden im Anschluss um die verfügbare positive und negative Leistung unter Berücksichtigung der maximalen Abrufdauer der Flexibilitäten reduziert. Es findet kein Abruf statt, wenn während des richtungsgleichen Redispatch- oder Einspeisemanagementeinsatzes ein Nachholbedarf besteht. Der Abruf erfolgt nur, sofern das Nachholen während eines entgegengesetzten Abrufs oder keiner Engpassmanagementmaßnahme durchgeführt wird.

Saisonale Einflüsse treten vor allem bei Querschnittstechnologien auf, explizit ist hier die Kälteerzeugung zu nennen. Da jedoch die Potenziale vor allem in der Chemie- sowie der Lebensmittelindustrie bestehen und dort ganzjährig Kälte für Prozesse benötigt wird, finden saisonale Einflüsse im Anwendungsfall Engpassmanagement keine Berücksichtigung.

Besteht ein Nachholbedarf, wird zudem verglichen, wie hoch die Energiemenge durch den Abruf sowohl positiver als auch negativer Leistung durch Flexibilität ist. Wird bei einem Abruf an positiver Leistung eine höhere Energiemenge genutzt als beim Abruf negativer Leistung für den Nachholvorgang, so wird die Abrufdauer des positiven Einsatzes so weit verkürzt, dass die Energiemengen bei positivem und negativem Abruf identisch sind.

Als Ergebnis der Modellierung werden die abgerufenen Mengen an Redispatch und Einspeisemanagement je Netzregion ohne sowie mit Nutzung industrieller Flexibilitäten ausgewiesen.

5 Zeitlich und regional aufgelöstes Lastflexibilisierungspotenzial

Die im Folgenden ausgewiesenen Potenziale sind im Fall der stromintensiven Prozesse als technisches Potenzial zu verstehen, im Fall der Querschnittstechnologien als akzeptiertes Potenzial. Eine Unterscheidung des Potenzials ist aufgrund der Gruppenzusammensetzung der Befragten erforderlich. Diese weisen hinsichtlich der praktischen Erfahrungen mit Lastflexibilisierungsmaßnahmen einen unterschiedlich hohen Kenntnisstand auf. Während stromintensive Prozesse in den meisten der befragten Betriebe bereits extern vermarktet werden, ist das bei Querschnittstechnologien generell nur sehr selten der Fall. Die Energieverantwortlichen, welche zum Lastflexibilisierungspotenzial bei Querschnittstechnologien befragt werden, nennen häufig die aus ihrer Sicht flexibilisierbaren Anlagen, was wiederum dem akzeptierten Potenzial entspricht.

5.1 Stromintensive Prozesse

Die Ergebnisse hinsichtlich der technischen und ökonomischen Kennwerte der stromintensiven Prozesse werden im Folgenden beschrieben.

5.1.1 Geeignete Anlagen

Die Auswahl an Prozessen beruht zunächst auf der in /FFE-49 16/ durchgeführten Literaturrecherche. Folgende in /FFE-49 16/ genannten Anlagen werden jedoch nicht in die detaillierte Potenzialermittlung aufgenommen: Induktionstiegelofen, Kupfer- und Zinkelektrolyse, Altpapier-/ Zellstoffauflösung, Papiermaschine, Glasschmelzen sowie Luftzerlegung. Gründe hierfür sind u.a. ein deutlicher Einfluss der Flexibilisierung auf den Produktionsprozess oder die Produktqualität, Einzelprozessanwendungen mit geringer Übertragbarkeit oder unzureichend genaue Daten für eine Ausweisung der regionalen Potenziale.

Aus der Auflistung an flexibilisierbaren stromintensiven Prozessen wird daher anhand der Kriterien Stromintensität und absoluter Stromverbrauch für die Herstellung eines Produktes folgende Auswahl an Produktionsschritten einer Detailanalyse unterzogen:

- Aluminiumelektrolyse
- Elektrostahlherstellung (Elektrolichtbogenofen)
- Holzstoffherstellung (Holzschleifer und Refiner)
- Klinker- und Zementherstellung (Roh- und Zementmühlen)
- Chlorelektrolyse

Aluminiumelektrolyse

Bei der Aluminiumelektrolyse werden dem Rohstoff Tonerde (Aluminiumoxid) Kryolith und weitere Fluorverbindungen zugegeben, um den Schmelzpunkt von ca. 2.050 °C (reine Tonerde) auf etwa 950 °C herabzusetzen. Durch das anschließende Aufschmelzen des Gemisches wird flüssiges Aluminium gewonnen. Dieser Vorgang findet in den einzelnen Elektrolysezellen statt. Eine Linie besteht jeweils aus einer Vielzahl an Elektrolysezellen (bspw. 90 bis 120 Zellen je Linie). Der Prozess läuft bei einer

Gleichspannung zwischen Anode und Kathode von ca. 4 bis 5 V und einer sehr hohen Stromstärke von 150 bis 300 kA ab. Letztere variiert je nach Anlage. Im Anschluss wird das flüssige Aluminium abgesaugt und dem Gießprozess, z.B. für Brammen, zugeführt. Die Flexibilität wird durch die Variation der Stromstärke für eine gesamte Linie erreicht. Da dies jedoch den Wärmeeintrag in die Zelle bei der endothermen Reaktion beeinflusst, muss das Gleichgewicht in der Zelle über regelbare Wärmetauscher aufrechterhalten werden /TRI-02 13/. Die nachfolgenden Prozessschritte werden durch die flexible Fahrweise der Elektrolysezellen nicht beeinflusst, da der Füllstand bzw. das Niveau des flüssigen Aluminiums in den Zellen variiert und somit als Puffer genutzt werden kann. Wird eine gesamte Linie betrachtet, kann der Produktionsprozess als kontinuierlich angesehen werden. Die Produktion in einzelnen Zellen läuft jedoch in Chargen ab, da dort immer wieder Rohmaterial nachgefüllt und das Endprodukt abgesaugt werden müssen.

Elektrostahlherstellung

Im Elektrolichtbogenofen werden direktreduziertes Eisen und Stahlschrott mit Hilfe von Graphitelektroden, welche einen Lichtbogen erzeugen, zu Rohstahl aufgeschmolzen. Die Temperatur der Stahlschmelze erreicht dabei etwa 1.800 °C. Der flüssige Rohstahl wird anschließend in Pfannenöfen einer sekundärmetallurgischen Behandlung unterzogen, bevor er in der Stranggussanlage zu einem Endlosstrang verarbeitet wird. Der Prozess im Lichtbogenofen läuft in Chargen ab, da der Ofen nach jedem Aufschmelzvorgang entleert und wieder befüllt werden muss. Das Aufschmelzen einer Charge dauert etwa 50 bis 60 Minuten, wobei etwa zwei Drittel der Zeit elektrische Leistung zugeführt wird. In der verbleibenden Zeit wird beispielsweise weiterer Schrott zugeführt oder es werden Proben genommen /HAV-01 09/. Am Ende des Aufschmelzvorgangs wird die Schmelze abgegossen.

Die Flexibilität ergibt sich durch Unterbrechung des Aufschmelzvorgangs, wobei prinzipiell auch die Leistungszufuhr durch Variation der Spannung verändert werden kann. Die begrenzenden Faktoren bei der Abschaltung sind zum einen das nicht gewünschte Erstarren der Schmelze, welches unbedingt vermieden werden muss, und zum anderen der Abriss des Stranggussverfahrens, welcher ebenfalls zu einem Produktionsausfall führen würde.

Holzstoffherstellung

Bei der Papierproduktion wird Holzstoff als Rohstoff verwendet. Holzstoff entsteht durch die Zerfaserung von Holz in feinste Fasern und kann in zwei unterschiedlichen Verfahren erzeugt werden. Beim so genannten Schliff-Verfahren im Holzschleifer wird mechanische Energie eingesetzt, um Holzprügel gegen rotierende Schleifsteine zu pressen und diese kontinuierlich abzuschleifen. Im Refiner-Verfahren werden Hackschnitzel verwendet, welche mittels Dampf vorgewärmt werden. Anschließend werden sie in Refinern bzw. Mahlanlagen ebenfalls zu Holzstoff zerfasert, was als TMP-Verfahren (Thermo Mechanical Pulp) bezeichnet wird.

Die Flexibilität wird bei Holzschleifern und Refinern erreicht, indem sie kurzfristig ab- oder zugeschaltet werden. Es findet somit eine Lastverschiebung statt. Begrenzend wirkt hier der Puffer bzw. Lagerbestand an Holzstoff.

Klinker- und Zementherstellung

In der Klinker- und Zementherstellung sind Roh- und Zementmühlen im Einsatz. Die Rohmühlen werden dazu genutzt, die Ausgangsstoffe für die Klinkerherstellung zu mahlen. Der Klinker, welcher anschließend für die Zementherstellung benötigt wird, wird zunächst im Drehrohfen gebrannt. Die Rohstoffe werden in Silos zwischengelagert und dem Ofen kontinuierlich zugeführt, da dieser ununterbrochen in Betrieb ist. Im nächsten Schritt wird der Klinker mit weiteren Zusatzstoffen vermischt und in Zementmühlen weiter zerkleinert.

Die Flexibilität der Roh- und Zementmühlen kann durch Nutzung vorhandener Puffer bzw. Zwischensilos erzielt werden. Bei diesen Anlagen ist ein Verschieben der Produktion möglich, die Flexibilisierung bedeutet daher die An- oder Abschaltung der Mühlen. Auch hier wirken die Silofüllstände und Silovolumen begrenzend auf die Dauer der Flexibilisierung.

Chloreelektrolyse

Chlor wird häufig als Grundstoff zur Herstellung verschiedenster Chemikalien und Materialien eingesetzt und mittels Chlor-Alkali-Elektrolyse hergestellt. Als Ausgangsstoff dienen Natriumchlorid und Wasser. In den Elektrolysezellen wird zwischen Anode und Kathode eine Gleichspannung angelegt. Durch den Stromfluss wird eine endotherme Reaktion in Gang gesetzt: Die Ausgangsstoffe werden zersetzt. Im Membranverfahren bewirkt eine zwischen Anode und Kathode platzierte Membran, welche nur für positiv geladene Ionen durchlässig ist, die Trennung von Kationen und Anionen. Neben dem Membranverfahren werden das Diaphragma- sowie das Amalgamverfahren für die Chlorherstellung eingesetzt.

Die Flexibilität ist nur bei der Produktion im Membran- und Amalgamverfahren erreichbar. Dort wird eine unterschiedlich hohe Leistungszufuhr durch Variation des Stromflusses erreicht. Aus Sicherheitsaspekten wird das Chlor ohne größere Zeitverzögerung weiterverarbeitet, für eine Flexibilisierung müssen daher auch Folgeprozesse berücksichtigt werden.

5.1.2 Technisches Potenzial

Die in der Potenzialermittlung verwendeten Eingangsdaten, wie beispielsweise spezifischer Strombedarf, Betriebsstunden oder jährliche Produktionsmenge sind in **Tabelle 5-1** dargestellt. Die spezifischen Verbräuche werden anhand einer Literaturrecherche ermittelt. In Experteninterviews werden diese Literaturangaben mit den in der Praxis erreichten Werten abgeglichen. Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse basieren auf /FFE-49 16/.

Den mit Abstand höchsten spezifischen Stromverbrauch weist die Primäraluminiumelektrolyse mit ca. 14 bis 16 MWh/t auf. Obwohl der absolute Stromverbrauch von Aluminiumelektrolyse und Chloreelektrolyse in einem ähnlich hohen Bereich liegt, wird deutlich mehr Chlor produziert. Werden die in der Chlorherstellung eingesetzten Amalgam- und Membranverfahren miteinander verglichen, zeigt sich, dass sich diese im spezifischen Stromverbrauch deutlich voneinander unterscheiden. Das Amalgamverfahren weist einen um knapp 30 % höheren spezifischen Stromverbrauch auf. Dies zeigt sich auch in den

Produktionsmengen. 2012 wurde etwa die vierfache Menge an Chlor im Membranverfahren – verglichen mit dem Amalgamverfahren – hergestellt.

Tabelle 5-1: *Stromintensive Prozesse: verwendete Parameter für die Potenzialermittlung (eigene Berechnungen nach Expertenbefragungen und /FFE-01 14/, /WVS-01 13/, /VDZ-01 13/, /VDP-01 13/, /VCI-01 13/, /EUC-01 13/, /GDA-01 12/, /HYDRO-01 13/, /TRI-05 13/, /TRI-06 13/, /TRI-04 13/)*

	Aluminium- elektrolyse	Elektrolight- bogenofen	Rohmühle	Zementmühle
Spezifischer Strombedarf in kWh/t	15.875	423	26	45
Mittlere Betriebsstunden in h/a	6.100	6.100	5.500	5.500
Produktionsmenge 2011* / 2012 in kt/a	433	13.789	24.581	32.432
Strombedarf in GWh/a	6.866	5.837	639	1.456
Mittlerer Leistungsbedarf in MW	1.126	957	116	265
	Holzschleifer	Refiner	Chlor- elektrolyse (Amalgam)	Chlor- elektrolyse (Membran)
Spezifischer Strombedarf in kWh/t	2.090	2.640	3.200	2.500
Mittlere Betriebsstunden in h/a	7.500	7.500	7.700	7.700
Produktionsmenge 2012 in kt/a	7444	299	574	2.309
Strombedarf in GWh/a	1.556	789	1.837	5.773
Mittlerer Leistungsbedarf in MW	207	105	239	750

* Für die Primäraluminiumerzeugung lagen zum Zeitpunkt der Berechnung nur Daten für 2011 vor

Während die Chlorherstellung sowie die Papierproduktion nahezu ganzjährig in Betrieb sind, weisen die Erzeugung von Primäraluminium, Elektrostahl und Zement etwas geringere Betriebsstunden von 5.500 bis 6.100 pro Jahr auf.

Die höchste mittlere Last wird bei der Primäraluminiumproduktion benötigt. Diese liegt für das Jahr 2012 bei etwa 1.130 MW. Die Lichtbogenöfen zur Elektrostahlerzeugung weisen eine mittlere Leistungsaufnahme von ca. 960 MW auf. In Summe verursacht die Chlorherstellung in den beiden oben genannten Verfahren eine ähnlich hohe mittlere Last von ca. 990 MW. Die benötigte Leistung der Holzstoffanlagen sowie der Roh- und Zementmühlen liegt mit ca. 300 und 380 MW deutlich darunter.

Bei der Potenzialbestimmung wird differenziert nach der reinen Lastverschiebung und dem Produktionsausfall. Das hier ausgewiesene technische Potenzial berücksichtigt in beiden Fällen technische Restriktionen bei der Vermarktung von Flexibilität. Die Höhe des flexibilisierbaren Anteils je Prozess wird zudem mit Unternehmens- und Branchenvertretern diskutiert sowie mit Angaben aus anderen Studien abgeglichen.

Die im Rahmen dieser Arbeit befragten Betriebe sind bereits größtenteils mit ihren stromintensiven Prozessen in der Vermarktung aktiv. Das im Folgenden ausgewiesene technische Potenzial stellt somit die obere Grenze des Potenzials dar.

5.1.2.1 Lastverschiebung

Die Höhe der flexibel nutzbaren positiven und negativen Leistung der Anlagen wird von verschiedenen technischen Faktoren, wie beispielsweise Mindestlast, Mindesttemperatur etc., beeinflusst. Der aus technischer Sicht flexibilisierbare Anteil des Leistungsbezugs der stromintensiven Prozesse bei einer reinen Lastverschiebung mit Nachholeffekt ist in **Tabelle 5-2** aufgeführt und basiert auf /FFE-49 16/. Dabei wird differenziert nach positiver und negativer Leistung. Der angegebene Prozentsatz bezieht sich jeweils auf die mittlere Leistungsaufnahme des Prozesses.

Tabelle 5-2: *Flexibilisierbarer Anteil stromintensiver Prozesse bezogen auf die mittlere Last*

	Aluminium- elektrolyse	Elektrolight- bogenofen	Rohmühle	Zementmühle
Flexibilisierbarer Anteil (pos. Leistung)	25 %	100 %	100 %	100 %
Flexibilisierbarer Anteil (neg. Leistung)	0 %	0 %	43 %	43 %
	Holzschleifer	Refiner	Chlor- elektrolyse (Amalgam)	Chlor- elektrolyse (Membran)
Flexibilisierbarer Anteil (pos. Leistung)	100 %	100 %	48 %	48 %
Flexibilisierbarer Anteil (neg. Leistung)	22 %	22 %	30 %	30 %

Unter Zugrundelegung der flexibilisierbaren Anteile der Produktionsanlagen aus Tabelle 5-2 ergibt sich ein Lastflexibilisierungspotenzial der stromintensiven Prozesse von insgesamt ca. 2.400 MW an positiver Leistung und etwa 530 MW an negativer Leistung für das Jahr 2012. Das größte positive Potenzial existiert im Bereich der Elektrostahlerzeugung mit im Mittel knapp 960 MW an abschaltbarer Leistung, gefolgt von der Chlorelektrolyse mit insgesamt etwa 470 MW (Amalgam- und Membranverfahren). Etwa 380 MW an Flexibilität werden durch Roh- und Zementmühlen erreicht, weitere ca. 310 MW entfallen auf Holzschleifer und Refiner. Wird die mittlere Last der Aluminiumelektrolyse von ca. 1.126 MW um 25 % abgesenkt, ergeben sich 280 MW an positivem Lastflexibilisierungspotenzial.

Die höchste negative Leistung ergibt sich durch die Lasterhöhung in der Chlorelektrolyse mit ca. 300 MW. Im Mittel sind zudem etwa 70 MW an Leistung in der Papierindustrie sowie 160 MW in der Zementherstellung zuschaltbar (vgl. **Tabelle 5-3**).

Tabelle 5-3: *Positives und negatives Lastflexibilisierungspotenzial stromintensiver Prozesse im Falle der Lastverschiebung für das Jahr 2012*

	Aluminium- elektrolyse	Elektrolit- bogenofen	Rohmühle	Zementmühle
Pos. Lastflexibilisierungspotenzial in MW	281	957	116	265
Neg. Lastflexibilisierungspotenzial in MW	0	0	50	113
	Holzschleifer	Refiner	Chlor- elektrolyse (Amalgam)	Chlor- elektrolyse (Membran)
Pos. Lastflexibilisierungspotenzial in MW	207	105	114	359
Neg. Lastflexibilisierungspotenzial in MW	46	23	72	227

Aluminiumelektrolyse

Bei der Aluminiumelektrolyse kann die mittlere Last, welche in etwa der installierten Leistung entspricht, stetig um bis zu 25 % durch einen verringerten Stromfluss reduziert werden, ohne das thermische Gleichgewicht in den Elektrolysezellen zu beeinflussen. Kurzfristig besteht auch die Möglichkeit, die Linien beispielsweise im Rahmen der Verordnung zu abschaltbaren Lasten komplett abzuschalten /TRI-01 14/.

Elektrolitbogenofen

Die Leistungsaufnahme des Lichtbogenofens zur Stahlerzeugung verändert sich während des Einschmelzprozesses, wie in **Abbildung 5-1** dargestellt. Nur sehr kurzzeitig wird nahezu Nennleistung benötigt. Finden zudem die sog. „power-off“ Zeiten Berücksichtigung, so ergibt sich im Mittel eine Leistungsaufnahme von etwa 75 %. Diese im Mittel zur Verfügung stehende Last kann vollumfänglich als Flexibilität genutzt werden, da eine Komplettabschaltung des Lichtbogenofens aus technischer Sicht möglich ist /HOE-01 14/.

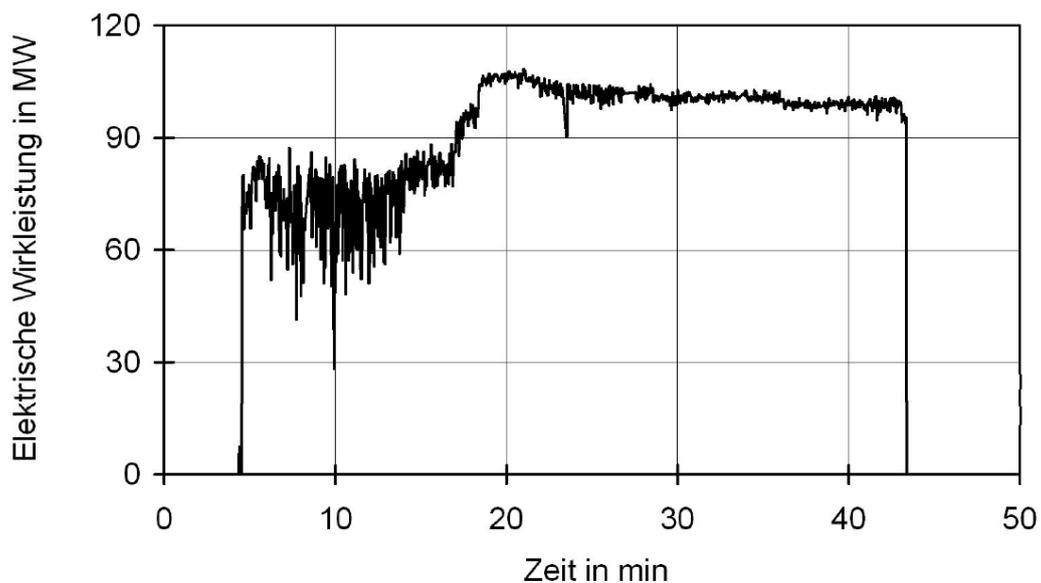


Abbildung 5-1: *Typischer Lastverlauf eines Lichtbogenofens während einer Einkorbcharge nach /HAV-01 09/*

Holzstoffherstellung

Holzschleifer und Refiner werden im Vergleich zur Papiermaschine nicht kontinuierlich rund um die Uhr betrieben. Der produzierte Holzstoff wird zwischengelagert, dieser Materialspeicher kann wiederum sehr gut dazu genutzt werden, um Flexibilität anzubieten. Sowohl bei Holzschleifern als auch Refinern kann eine Komplettabschaltung der Last erfolgen. Da der Betrieb der Anlagen sowohl vorgezogen als auch nachgeholt werden kann, stehen aus technischer Sicht sowohl positive als auch negative Leistung zur Verfügung.

Klinker- und Zementherstellung

Aufgrund des kontinuierlichen Betriebs des Drehrohrofens und der begrenzten Speicherkapazitäten der Silos weisen die Rohmühlen relativ hohe Betriebsstunden (durchschnittlich Zweischichtbetrieb) auf. Durch die vorhandenen Silos besteht zwar die Möglichkeit, den Betrieb der Rohmühlen zu unterbrechen und vorzuziehen oder auch nachzuholen, allerdings nicht in gleichem zeitlichem Umfang wie bei Zementmühlen. In der Vergangenheit wurden Zementmühlen häufig nachts oder am Wochenende betrieben, um günstigere Strompreise zu nutzen. Da diese auch heute noch eher geringe Betriebszeiten (oft Einschichtbetrieb) im Vergleich zu den Öfen aufweisen, besteht immer noch die Möglichkeit einer flexiblen Betriebsweise durch Vorziehen oder Nachholen dieses Produktionsschrittes.

Chlorelektrolyse

Bezogen auf die installierte Leistung beträgt die Mindestlast bei der Chlorelektrolyse etwa 40 %. Unterhalb dieses Grenzwertes können nach Angaben von Betrieben Schäden an der Membran auftreten. Da die Auslastung der Anlagen in der Regel nicht bei 100 % sondern etwas darunter liegt – in 2012 betrug diese im Mittel 77 % (eigene Berechnungen nach /VCI-01 13/ und /EUC-01 13/) –, können durchschnittlich etwa 48 % der mittleren Last reduziert werden. Dementsprechend kann die Last um etwa 30 %, bezogen auf die mittlere Last, erhöht werden.

5.1.2.2 Produktionsausfall

Im Fall eines Produktionsausfalles erhöht sich das positive Lastflexibilisierungspotenzial, da zusätzlich zum flexibilisierbaren stromintensiven Prozess sämtliche Nebenanlagen sowie zur Herstellung des Produktes benötigte Maschinen mit abgeschaltet werden. Zur Quantifizierung der Höhe der abschaltbaren Leistung wird der jährliche Stromverbrauch des gesamten Produktionsverfahrens bestimmt und durch die Anzahl der jeweiligen jährlichen Betriebsstunden dividiert, was der mittleren Leistungsaufnahme des gesamte Produktionsprozesses entspricht. Diese Vorgehensweise wird bereits in /FFE-49 16/ beschrieben. Diese Last stellt die insgesamt abschaltbare Leistung dar. Das bedeutet beispielsweise bei der Papierherstellung, dass bei einem Produktionsausfall neben dem Holzschleifer oder Refiner auch die Papiermaschine inklusive sonstiger Nebenaggregate zur Medienversorgung des Prozesses abgeschaltet wird. In **Tabelle 5-4** sind der Stromverbrauch, die Betriebsstunden sowie die mittlere Leistungsaufnahme je Produktionsverfahren dargestellt. Während der Stromverbrauch bei der Aluminium- und der Chlorelektrolyse in etwa dem oben ausgewiesenen Stromverbrauch des stromintensiven Prozesses entspricht, erhöht sich dieser bei Elektrolichtbogenöfen, Papier- und Zementherstellung,

da weitere zur Produktion gehörige Anlagen in die Betrachtung einbezogen werden. Am deutlichsten ist dies bei der Papierherstellung zu erkennen. Der Stromverbrauch von Holzschleifern und Refinern allein beträgt ca. 2.350 GWh/a, inklusive Papiermaschine, Nebenaggregate und Weiterverarbeitung beläuft sich dieser auf etwa 20.400 GWh/a in ganz Deutschland. Daher erhöht sich auch das positive Lastflexibilisierungspotenzial für diese Produktionsprozesse beträchtlich (vgl. Formel (10)). In Summe beträgt das positive Potenzial bei Produktionsausfall für das Jahr 2012 knapp 6.900 MW, wobei allein 2.700 MW auf die Papierherstellung entfallen.

Tabelle 5-4: *Positives Lastflexibilisierungspotenzial stromintensiver Prozesse im Falle eines Produktionsausfalles für das Jahr 2012 (eigene Berechnungen auf Basis von /FFE-01 14/, /GDA-01 12/, /DESTATIS-03 14/, /VDZ-01 13/, /FFE-24 09/, /VCI-01 13/)*

	Aluminium- elektrolyse	Elektrolight- bogenofen	Zement- herstellung	Papier- herstellung	Chlor- elektrolyse
Stromverbrauch in GWh/a	6.866	6.798	5.068	20.398	7.610
Betriebsstunden in h/a	6.100	6.100	5.500	7.500	7.700
Mittlere Leistung in MW	1.126	1.114	921	2.720	988

5.1.3 Zeitliche Verfügbarkeit

Die technische Potenzialermittlung zeigt, dass die betrachteten stromintensiven Prozesse aufgrund hoher installierter Leistungen bzw. hoher mittlerer Lasten ein im Vergleich zu Querschnittstechnologien um den Faktor 10 bis 10.000 höheres technisches Lastflexibilisierungspotenzial aufweisen. Ohne Berücksichtigung der zeitlichen Verfügbarkeit der Anlagen wird dieses Potenzial jedoch meist deutlich überschätzt. Im folgenden Abschnitt wird daher auf zeitliche Aspekte bei der Potenzialermittlung eingegangen.

Lastgradient

Der Lastgradient aller untersuchten Anlagen ist sehr hoch. So kann etwa die Leistungszufuhr der Aluminiumelektrolysezellen innerhalb von Sekunden unterbrochen werden /TRI-01 14/. Auch bei der Elektrostahlerzeugung kann der Lichtbogen innerhalb kürzester Zeit (Sekunden) abgeschaltet werden /HOE-01 14/. Dies ist auch bei der Chlorelektrolyse der Fall. Die Abschaltung der Holzschleifer und Refiner in der Papierindustrie kann in den meisten Fällen in weniger als fünf Minuten erfolgen. Je nach Anlage kann dies jedoch auch etwas mehr Zeit in Anspruch nehmen, eine Abschaltung innerhalb von 15 Minuten ist jedoch aus technischer Sicht in allen Fällen möglich. Roh- und Zementmühlen werden üblicherweise ebenfalls innerhalb von einigen Minuten abgeschaltet.

Abrufdauer

Die maximal mögliche Abrufdauer basiert auf den Ergebnissen in /FFE-49 16/ und wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Beispielsweise kann sie durch den Füllstand vor- oder nachgelagerter Speicher oder durch nachgeschaltete Produktionsanlagen, welche kontinuierlich beschickt werden müssen, begrenzt werden. Auch Vorgaben hinsichtlich der Einhaltung definierter Temperaturen, Spannungen oder ähnlichem im

Prozess selbst wirken reduzierend auf die maximale Abrufdauer. Die nachfolgenden Angaben hinsichtlich der Abrufdauer basieren erneut auf einer Befragung von Unternehmen und Verbänden sowie auf einer Literaturrecherche.

In der **Aluminiumelektrolyse** wird durch Absenkung der Stromdichte Flexibilität generiert. Der um 25 % abgesenkte Betrieb kann über maximal eine Stunde erfolgen, da es sonst zu einer zu starken Abkühlung des Elektrolyten kommen würde. Dieser muss auf einer Temperatur von etwa 950 °C mit einer maximalen Abweichung von +/-5 Kelvin gehalten werden. Im reduzierten Betrieb wird das Niveau des flüssigen Aluminiums in den Zellen variiert und als Produktspeicher genutzt. Daher werden nachgelagerte Prozesse wie das Gießen durch die Flexibilisierung nicht beeinflusst /TRI-02 13/, /AGORA-05 16/.

Der **Lichtbogenofen** liefert den flüssigen Stahl an den nachgelagerten Pfannenofen, welcher wiederum nach der Beimischung von Legierungselementen die Stranggussanlage versorgt. Um ein Abreißen des Stranggusses zu vermeiden, sind üblicherweise mehrere Pfannen vorhanden, welche mit flüssigem Stahl befüllt werden. Der Lichtbogenofen ist typischerweise etwas größer dimensioniert als der Pfannenofen, was zur Folge hat, dass eine kurzzeitige Abschaltung der Leistungszufuhr des Lichtbogenofens nicht sofort zum Stillstand des Gesamtprozesses führt. Je nach Produktionsanlage führt diese Überdimensionierung des Lichtbogenofens dazu, dass pro Schicht ca. 20 bis 30 Minuten an Puffer entstehen, welche für eine Abschaltung des Lichtbogenofens genutzt werden können. Wird davon ausgegangen, dass die geplante Produktionsmenge erst am Ende eines Tages zur Verfügung stehen muss, ergibt sich ein Zeitfenster von etwa einer bis 1,5 Stunden für die Nutzung positiver Leistung. Neben der Stranggussanlage wirkt sich ein weiterer Faktor begrenzend auf die Abrufdauer aus. Ein zu starkes Abkühlen der Schmelze führt zu einer Änderung des Aggregatzustands des Stahls und notfalls zu einem bergmännischen Abbau des erhärteten Stahls und ist daher auf jeden Fall zu vermeiden.

Das Produkt aus den **Rohmühlen** wird in Silos zwischengelagert und anschließend direkt dem Drehrohrofen zugeführt. Da dieser kontinuierlich in Betrieb ist, ist die Abrufdauer der Rohmühle abhängig von Füllstand und Kapazität der vor- und nachgelagerten Silos. Da die Kapazitäten der Silos in den Unternehmen unterschiedlich hoch sind, variiert die Abrufdauer je nach Silogröße und Auslastung des Drehrohrofens. Im Mittel beläuft sich die Abrufdauer für eine Abschaltung auf etwa zwei Stunden, dabei wird davon ausgegangen, dass die Rohmühlen im Mittel im Zweischichtbetrieb produzieren. Die **Zementmühle** wird mit verschiedenen Ausgangsstoffen aus unterschiedlichen Silos beliefert. Das Endprodukt wird wiederum in Silos zwischengelagert, bevor es abgefüllt wird. Auch hier begrenzen die Silofüllstände und -kapazitäten die maximal mögliche Abrufdauer an positiver Leistung, welche im Mittel bei etwa vier Stunden liegt.

Die maximale Abrufdauer von **Holzschleifern** und **Refinern** in der Papierherstellung wird durch die Füllstände der vor- und nachgelagerten Lager beeinflusst. Solange ausreichend Holzstoff für die Papierproduktion in der Papiermaschine vorhanden ist, kann eine kurzzeitige Abschaltung des Holzschleifers oder Refiners erfolgen. Aufgrund unterschiedlicher Speichergrößen variiert die maximale Abrufdauer für die Abschaltung je nach Standort, im Mittel beträgt sie jedoch etwa zwei Stunden.

Die maximale Abrufdauer für die Lastreduktion und somit die Erbringung positiver Leistung in der **Chlorelektrolyse** beträgt etwa zwei Stunden. Eine Lasterhöhung ist ebenfalls möglich, die maximale Abrufdauer wird jedoch durch die Folgeprozesse begrenzt, da Chlor als Zwischenprodukt aus sicherheitstechnischen Gründen nicht gespeichert, sondern zu weiteren Zwischen- oder Endprodukten weiterverarbeitet wird.

Sperrzeit

Die Sperrzeit ist definiert als die Zeit zwischen dem Ende eines Abrufs und dem Beginn eines zweiten Abrufs. Wurde während eines Abrufs eine zu geringe Produktionsmenge erzeugt, muss diese während der Sperrzeit wieder ausgeglichen werden. Je nach Prozess kommt es dabei im Fall einer reinen Lastverschiebung zu zusätzlichen Betriebszeiten einer Anlage oder zu einer etwas erhöhten Leistungsaufnahme, sofern die Last der Anlage nur reduziert wurde. Bei einer Lasterhöhung oder Zuschaltung entspricht die Sperrzeit der Zeit, in welcher die Anlage im Vergleich zum typischen Betriebszustand im reduzierten Betrieb gefahren oder abgeschaltet wird. Die Sperrzeit der stromintensiven Prozesse ist stark unterschiedlich. Bei der Flexibilisierung der **Aluminiumelektrolyse** erfolgt das Nachholen durch eine geringfügige Erhöhung der Stromdichte im Vergleich zum typischen Betriebszustand. Bei einem vorhergegangenen Abruf, welcher z.B. einer Lastreduktion um 25 % über eine Stunde entspricht, werden etwa 40 bis 50 Stunden benötigt, um die entgangene Produktionsmenge zusätzlich zu generieren /TRI-01 14/. Dies entspricht auch der minimal benötigten Sperrzeit. Der Puffer des **Elektrolichtbogenofens** auf die nachgelagerten Prozesse wie Pfannenofen und Stranggussanlage beträgt, wie bereits beschrieben, im optimalen Fall etwa 20 bis 30 Minuten pro Schicht. Erfolgt ein Abruf über diese Zeit, gilt die Sperrzeit mindestens bis zum Ende der Schicht. Aufgrund von unvorhergesehenen Stillständen kann sich diese jedoch deutlich verlängern. Bei der reinen Lastverschiebung bei z.B. **Roh- und Zementmühlen** sowie **Holzschleifern** und **Refinern** ist die Sperrzeit abhängig von der täglichen Produktionszeit sowie dem Füllstand der vor- und nachgelagerten Speicher. Vereinfachend wird angesetzt, dass nach einem Abruf eine Sperrzeit von etwa 24 Stunden bzw. bis zum nächsten Tag besteht. Die Elektrolysezellen der **Chlorherstellung** können theoretisch kontinuierlich mit variabler Last betrieben werden. Die Sperrzeit zwischen zwei Abrufen entspricht mindestens der Zeit für das Nachholen der Über- oder Minderproduktion. Ob die Nachholzeit der Abrufzeit entspricht, hängt davon ab, wie hoch die mittlere Last im ursprünglichen Betriebszustand war. Liegt diese beispielsweise bei 80 % und wird die Last auf 50 % reduziert, wird für das Nachholen auch bei Maximallast mehr Zeit benötigt als für den Abruf.

Abrufhäufigkeit

Die Ergebnisse hinsichtlich Abrufhäufigkeit basieren auf /FFE-49 16/. Bei stromintensiven Prozessen ist die Abrufhäufigkeit aufgrund bestehender Lieferverpflichtungen in der Regel stark eingeschränkt. Das Nachholen aufgrund einer Lastverschiebung oder einer kurzzeitigen Lastreduktion kann in Einzelfällen deutlich zeitaufwändiger als der reine Abruf sein. Die Befragungen zeigen, dass in den meisten kontinuierlich produzierenden Unternehmen ein Abruf pro Tag technisch möglich wäre. Mehrmalige Abrufe pro Tag wären aus technischer Sicht bei einzelnen Prozessen, die nicht kontinuierlich betrieben werden, ebenfalls möglich. Werden allerdings die oben

angesprochene, teilweise deutlich längere Nachholzeit für eine entgangene Produktion, geplante Revisionen von Tagen bis zu mehreren Wochen sowie saisonal bedingte Stillstände berücksichtigt, so zeigt sich, dass die Anzahl an möglichen Abrufen von mehrmals täglich auf einmal pro Woche zurückgeht.

Die Befragung der stromintensiven Unternehmen ergibt außerdem, dass die Angebote für eine Vermarktung in der Regel so platziert werden, dass eine möglichst geringe Anzahl an Abrufen erfolgt.

Um sicherzustellen, dass es nicht zu einem Produktionsausfall kommt, wird für die weitere Analyse von maximal einem Abruf pro Woche je stromintensivem Prozess ausgegangen. Ein einmaliger Abruf pro Woche hat keine Beeinflussung der Produktionsmenge zur Folge, da ausreichend Zeit verbleibt, um eine gegebenenfalls entgangene Produktionsmenge aufzuholen.

Einfluss von Tageszeit, Typtag und saisonalen Faktoren

Die folgenden Ergebnisse werden bereits in /FFE-49 16/ zusammenfassend beschrieben. Die meisten der analysierten Produktionsprozesse werden ganzjährig kontinuierlich betrieben, was bedeutet, dass die Anlagen sowohl werktags als auch am Wochenende ohne Unterbrechung produzieren. Dies ist beispielsweise bei der Aluminiumelektrolyse, dem Elektrolightbogenofen oder der Chlorelektrolyse der Fall. Das Lastflexibilisierungspotenzial dieser Anlagen wird somit nicht durch tageszeitliche oder typtagesabhängige Faktoren beeinflusst. Auch saisonale Einflüsse sind in diesen Branchen nicht vorhanden. Lediglich in der Zementindustrie wirken sich saisonale Einflüsse auf das Lastflexibilisierungspotenzial aus. In den Wintermonaten ist die Zementproduktion aufgrund einer witterungsbedingt reduzierten Nachfrage deutlich geringer. Oft erfolgt auch eine Abschaltung des Drehrohrofens über mehrere Wochen, wobei in dieser Zeit auch die Rohmühlen außer Betrieb sind. Daher ist das positive wie auch das negative Lastflexibilisierungspotenzial der Zementherstellung in den Wintermonaten deutlich geringer.

Tageszeitliche Einflüsse treten bei der Holzstoff- und der Zementproduktion auf. Im Fall der Holzstoffproduktion ist die Betriebszeit jedoch nicht abhängig von der Tageszeit sondern vielmehr von der Produktion der nachgelagerten Papiermaschine. Da die Holzschleifer und Refiner in der Regel größer als der Bedarf ausgelegt sind, werden diese nicht kontinuierlich ganztägig betrieben. Um den nicht durchgängigen Betrieb vereinfachend abzubilden, wird die über den Tag vorhandene mittlere Last aller Anlagen errechnet. Im Einzelnen kann das Flexibilitätspotenzial je nach Anlagenfahrweise deutliche Unterschiede aufweisen.

Auch bei Roh- und Zementmühlen findet, wie bereits erläutert, kein kontinuierlicher Betrieb statt. Während Rohmühlen häufig an den nachfolgenden Drehrohrofen gekoppelt sind und daher hohe Betriebsstunden (üblicherweise Zweischichtbetrieb) aufweisen, sind die Betriebszeiten von Zementmühlen oft geringer (Einschichtbetrieb). Dieser Umstand hat Einfluss auf die Höhe des Lastflexibilisierungspotenzials. Die in der Vergangenheit aufgrund des Niedertarifs im Stromvertrag übliche überwiegende Nachtproduktion der Zementmühlen ist heute aufgrund tagsüber teilweise geringer Börsenpreise nicht mehr stark verbreitet. Eine tageszeitliche Zuordnung der Betriebszeiten wird daher erschwert. Aus diesem Grund wird auch hier eine über den Tag mittlere Last und somit mittleres Flexibilitätspotenzial aller Anlagen ermittelt.

Hier kann sich im Einzelnen ein unterschiedlich hohes Potenzial je nach Anlagenfahrweise im Tagesverlauf ergeben.

5.1.4 Räumliche Verfügbarkeit

Die in Kapitel 5.1.2 ausgewiesenen technischen positiven und negativen Lastflexibilisierungspotenziale der stromintensiven Prozesse wurden bisher nur als Summenwert über ganz Deutschland ausgewiesen. Im nächsten Schritt wird eine Regionalisierung der Potenziale anhand der Produktionsmengen der einzelnen Standorte durchgeführt. Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse bezüglich der regionalen Verteilung basieren auf /FFE-01 14/ und werden um detaillierte Auswertungen ergänzt. Sofern keine Produktionsmengen der einzelnen Unternehmen vorliegen, werden diese über die mittlere Auslastung aller Unternehmen sowie die Produktionskapazitäten der einzelnen Standorte bestimmt. Die nachfolgenden Abbildungen stellen die regionalen positiven Lastflexibilisierungspotenziale der stromintensiven Prozesse für den Fall der Lastverschiebung dar.

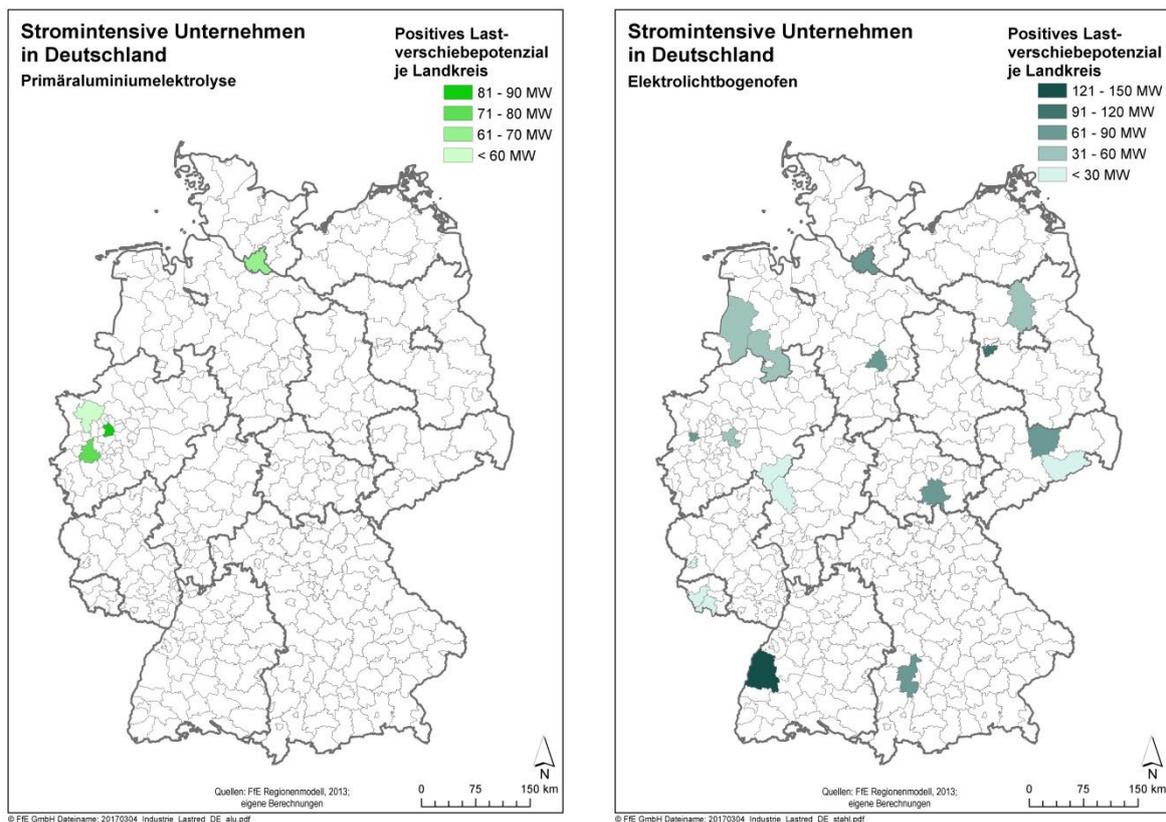


Abbildung 5-2: Regionales positives Lastflexibilisierungspotenzial der Primäraluminiumelektrolyse in der Nichteisen-Metallerzeugung (links) sowie der Elektrolichtbogenöfen in der Metallerzeugung (rechts)

Primäraluminium wird in Deutschland nur noch an vier Standorten produziert (vgl. **Abbildung 5-2** links). Im Jahr 2011 wurden insgesamt 432.500 t Primäraluminium hergestellt /GDA-01 12/. Bezogen auf eine Produktionskapazität der vier Standorte von insgesamt 540.000 t ergibt sich im Mittel eine Auslastung von 80 % /HYDRO-01 13/.

/TRI-05 13/, /TRI-06 13/, /TRI-04 13/. Die Lastreduktion der einzelnen Standorte beläuft sich auf je 50 bis 90 MW.

Im Jahr 2012 waren in Deutschland 19 Standorte mit **Elektrolichtbogenöfen** zur Stahlerzeugung vorhanden. In diesen Öfen wurden insgesamt 13,8 Mio. Tonnen Elektrostahl hergestellt /WVS-01 13/. Aufgrund nicht vorhandener Daten zu den Produktionskapazitäten der einzelnen Standorte kann hier keine Auslastung angegeben werden. Die regionale Verteilung zeigt, dass die Standorte über alle Bundesländer verteilt sind (siehe Abbildung 5-2 rechts). Allerdings unterscheiden sich die Flexibilitäten der einzelnen Standorte deutlich. Die zur Lastflexibilisierung nutzbare positive Leistung beträgt zwischen 10 und 140 MW, wobei der Großteil der Anlagen eine flexibilisierbare Leistung von bis zu 80 MW aufweist, wie die Häufigkeitsverteilung in **Abbildung 5-3** zeigt.

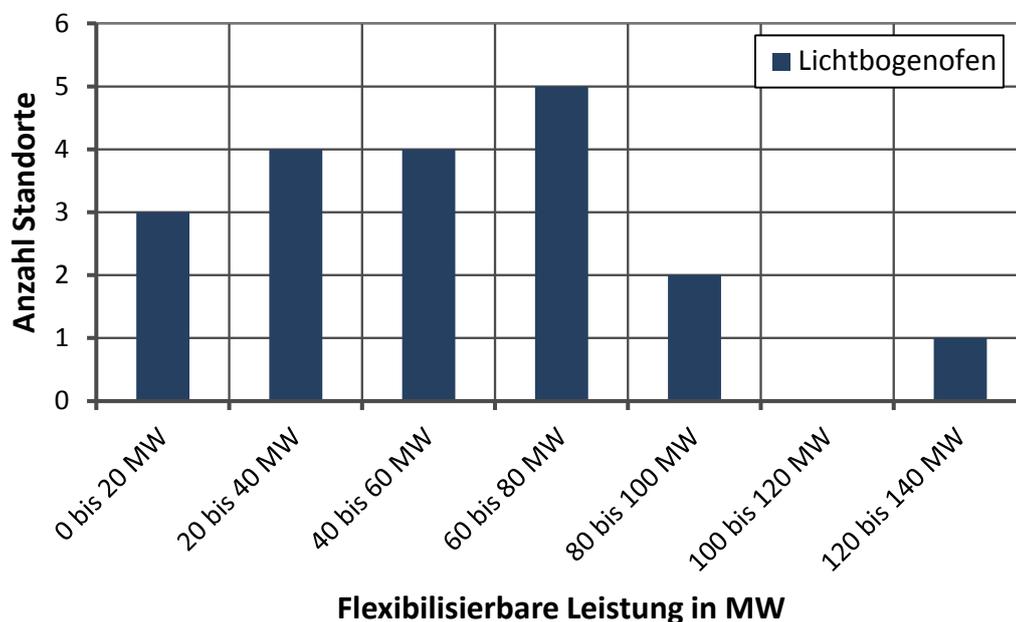


Abbildung 5-3: *Häufigkeitsverteilung der positiven Leistungsbereitstellung von Lichtbogenöfen je Standort*

In der deutschen Zementindustrie existieren derzeit insgesamt 54 Werke. 34 Standorte weisen neben der **Zementherstellung** auch eine **Klinkerproduktion** auf. Die Standorte mit und ohne Rohmühlen sind über Deutschland gleichmäßig verteilt, ein regionaler Schwerpunkt der Produktion existiert nicht (siehe **Abbildung 5-5** links). Die produzierte Tonnage in der Zementindustrie lag im Jahr 2012 bei 24.581 kt Klinker und 32.432 kt Zement. Die Auslastung liegt nach Verbandsangaben bei im Mittel 70 %. Die Häufigkeitsverteilung zeigt, dass der überwiegende Anteil der Standorte eine flexibilisierbare positive Leistung von bis zu 10 MW aufweist. An den Standorten mit Roh- und Zementmühlen steht aus technischer Sicht aufgrund deren höherer Anschlussleistung ein größeres Lastflexibilisierungspotenzial zur Verfügung (vgl. **Abbildung 5-4**).

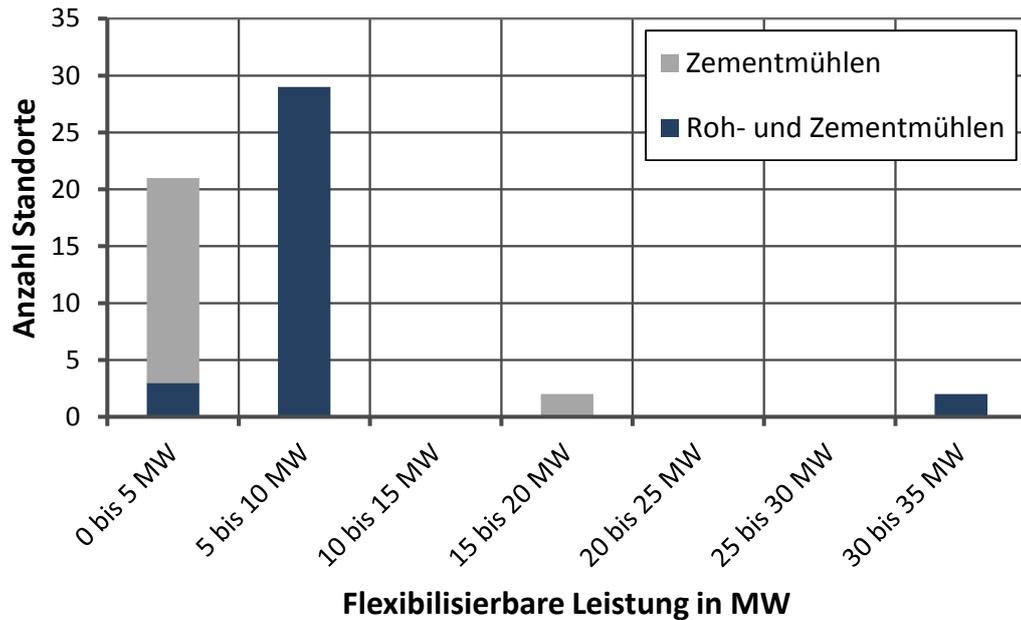


Abbildung 5-4: Häufigkeitsverteilung der positiven Leistungsbereitstellung von Roh- und Zementmühlen je Standort

Die flexibilisierbaren **Holzschleifer** und **Refiner** in der Papierbranche sind überwiegend in Süddeutschland angesiedelt. Die mögliche Lastreduktion der beiden Standorte mit Refinern liegt über dem Durchschnitt von ca. 30 MW je Standort, da die Refiner üblicherweise eine etwas höhere Anschlussleistung aufweisen. Je nach Anzahl an Anlagen je Standort liegt das Potenzial der zehn Standorte zwischen etwa 10 und 70 MW (vgl. Abbildung 5-5 rechts).

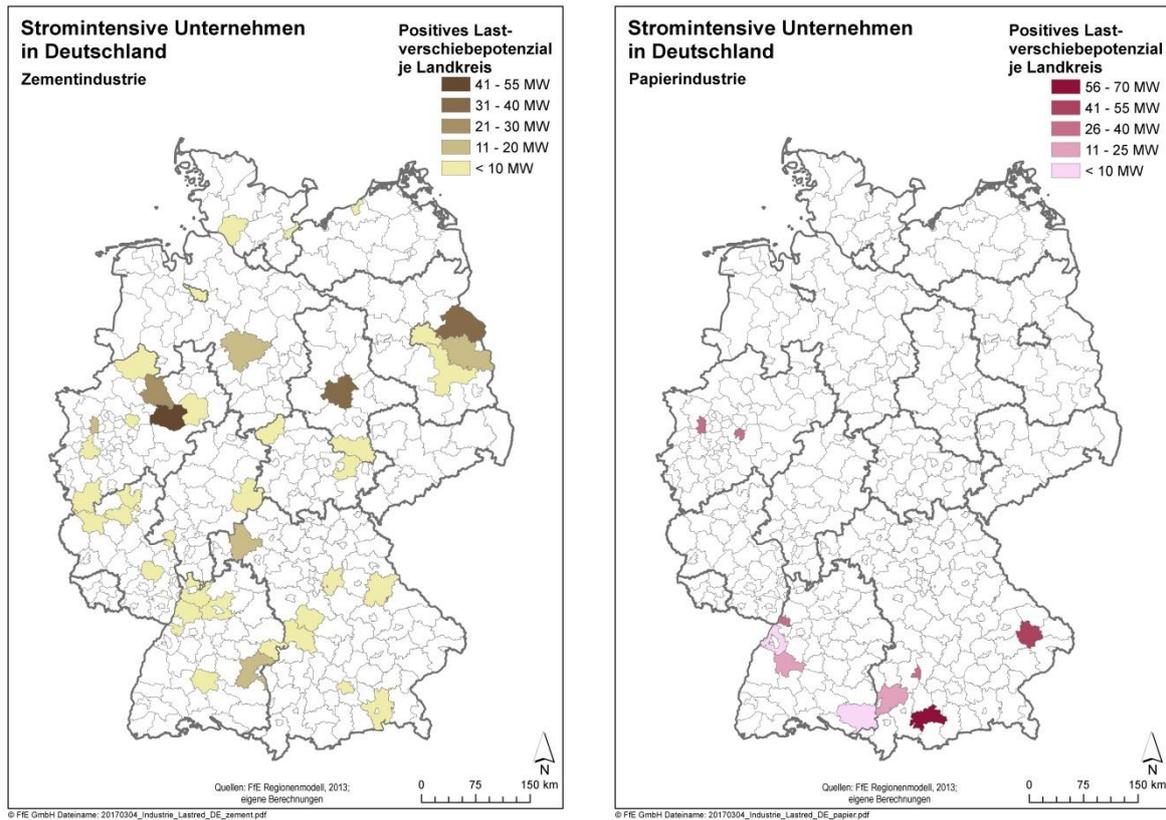


Abbildung 5-5: Regionales positives Lastflexibilisierungspotenzial der Roh- und Zementmühlen (links) in der Zementindustrie sowie der Holzschleifer und Refiner in der Papierindustrie (rechts)

Die **Chlor-Alkali-Elektrolyse** ist überwiegend in Nordrhein-Westfalen und im nördlicheren Teil Deutschlands angesiedelt. Insgesamt existieren aktuell 19 Standorte mit Amalgam- oder Membranverfahren. In 2012 wurde Chlor noch an fünf Standorten nach dem Amalgamverfahren produziert. In Summe wurden in diesem Jahr durch alle Verfahren 3.981 kt Chlor hergestellt, bezogen auf die installierte Produktionskapazität von 5.187 kt ergibt sich somit eine mittlere Auslastung der Anlagen von 77 %. Etwa drei Viertel aller Standorte weisen ein positives Lastflexibilisierungspotenzial von maximal 30 MW auf (vgl. **Abbildung 5-6** links), das maximale Potenzial eines Standortes beläuft sich auf knapp 70 MW.

Die regionale Darstellung des positiven Lastflexibilisierungspotenzials aller stromintensiven Prozesse ist in **Abbildung 5-6**, rechts zu finden. Erhöhtes Potenzial existiert im Ruhrgebiet sowie in Bayern und Baden-Württemberg. Auch in den östlichen Bundesländern ist entsprechend hohes Potenzial vorhanden. In insgesamt drei Landkreisen liegt das positive Potenzial der Prozesse bei über 100 MW.

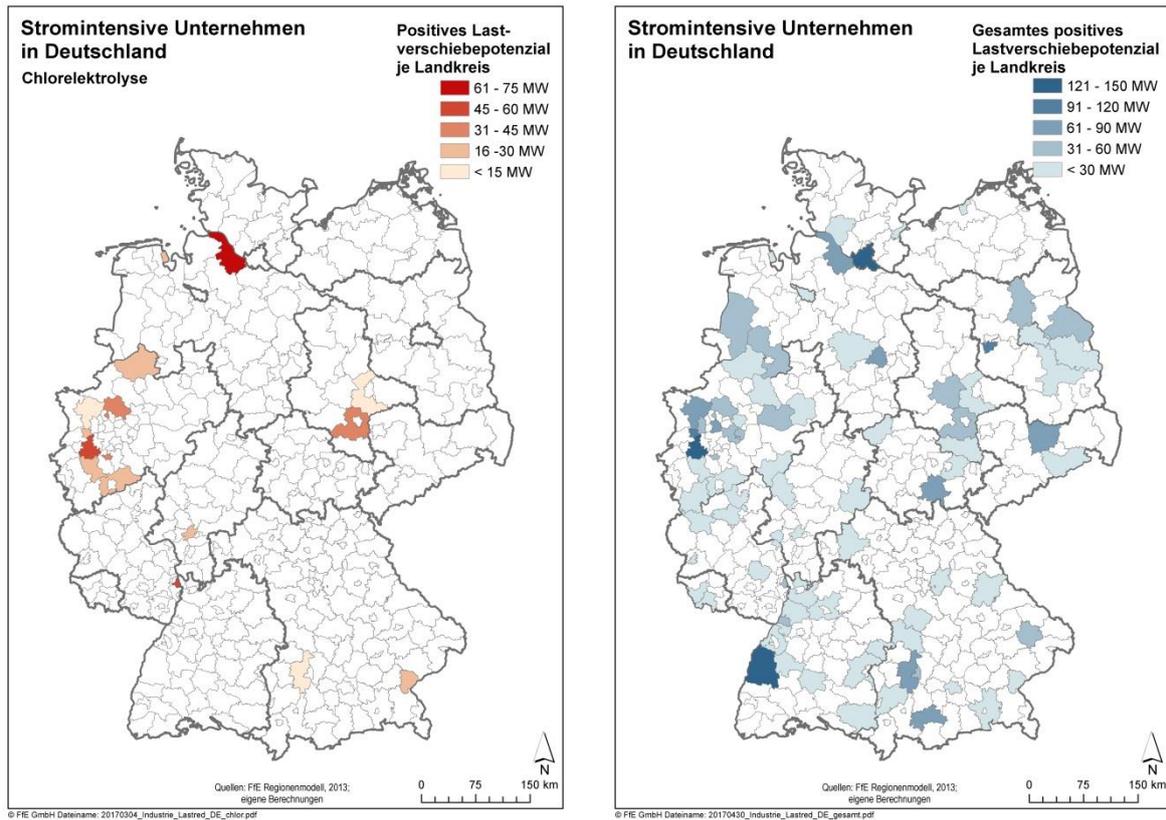


Abbildung 5-6: Regionales positives Lastflexibilisierungspotenzial der Chlor-Alkali-Elektrolyse in der Chemieindustrie (links) sowie aller betrachteten stromintensiven Prozesse (rechts)

Das negative Lastflexibilisierungspotenzial aller stromintensiven Prozesse zeigt **Abbildung 5-7**. Das höchste Potenzial liegt in einem einzelnen Landkreis im Norden Deutschlands, erhöhtes Potenzial besteht zudem in mehreren Landkreisen im Ruhrgebiet sowie im Osten Deutschlands.

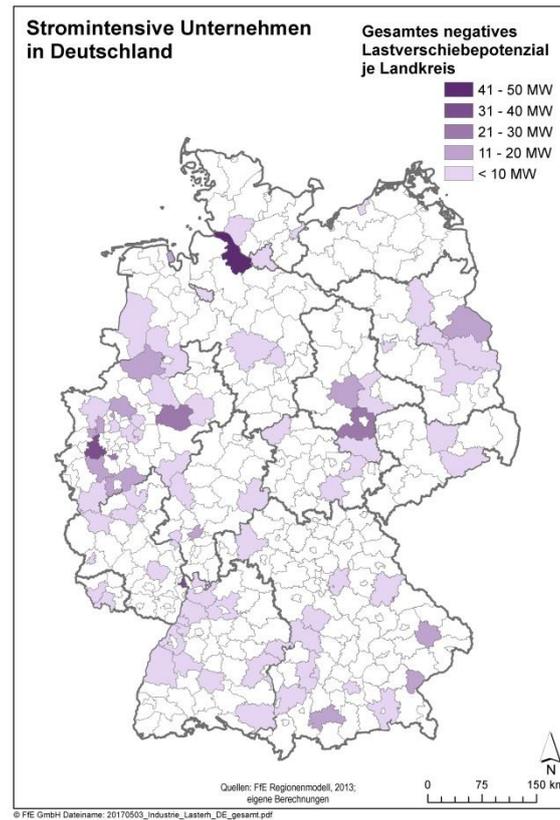


Abbildung 5-7: *Regionales negatives Lastflexibilisierungspotenzial aller betrachteten stromintensiven Prozesse*

5.1.5 Kosten

Die nachfolgend dargestellten Kostenarten (Investitionen, fixe und variable Betriebskosten) beruhen überwiegend auf Befragungen von Unternehmen und werden bereits in /FFE-49 16/ beschrieben. Diese Angaben werden wiederum mit Literaturwerten abgeglichen.

Investitionen

Die spezifischen Investitionen je kW installierte Leistung für stromintensive Prozesse in Abhängigkeit der Anzahl der Anlagen basieren auf realen Kostenangaben von Betrieben, die bereits aktiv Flexibilitäten vermarkten. Die anfallenden Investitionen setzen sich überwiegend aus der Umprogrammierung von Steuerungen, der Installation von Kommunikationstechnologie sowie dem Personalaufwand für die Festlegung einer Vermarktungsstrategie zusammen. In Einzelfällen fallen zusätzlich z.B. Kosten für die Nachrüstung einer zentralen speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) an. Insgesamt zeigt sich jedoch, dass bei diesen stromintensiven Prozessen nur sehr geringe spezifische Investitionen getätigt werden mussten, um die Anlagen von extern ansteuern zu können. Der Grund dafür ist, dass die überwiegende Anzahl an flexibilisierbaren Anlagen bereits sehr gut steuerungstechnisch eingebunden ist. In den meisten Fällen sind bereits elektronische Steuerungen vorhanden, auf die bei der Aktivierung zurückgegriffen werden kann. Etwas häufiger werden Stromzähler zur Erfassung des aktuellen Leistungsbezugs nachgerüstet. Diese Information wird wiederum an den Vermarkter weitergegeben, damit dieser möglichst genau angeben kann, wie hoch die

aktuell zur Verfügung stehende Flexibilität aller Anlagen eines Pools ist. Im Mittel liegen die spezifischen Investitionen für stromintensive Prozesse bei etwa 0,5 €/kW. Einzelne Ausreißer, die aufgrund einer unterschiedlichen Bilanzgrenze der Unternehmen entstanden sind, werden für die Mittelwertbildung nicht berücksichtigt. Der geringste Wert beläuft sich auf 0,2 €/kW, der höchste in die Mittelwertbildung eingegangene Wert auf 0,9 €/kW. Die Angaben in verschiedenen anderen Studien liegen in einer ähnlichen Größenordnung, beispielsweise wird in /DENA-07 10/ und /EWI-09 10/ ein Wert von nicht höher als 1 €/kW installierte Leistung angegeben.

Fixe Betriebskosten

Der Großteil der fixen Betriebskosten besteht nach Aussage der Betriebe überwiegend aus den Personalkosten für die regelmäßige Aktualisierung der angebotenen Leistung. Der personelle Aufwand hierfür ist jedoch mit wenigen Stunden pro Monat bis wenigen Stunden pro Woche sehr gering. Bezogen auf die flexibilisierbare Leistung belaufen sich diese Kosten auf etwa 0,05 €/(kW·a).

Variable Betriebskosten

Bei stromintensiven Prozessen werden die variablen Kosten für die beiden Fälle Lastverschiebung und Produktionsausfall separat ausgewiesen. Während Investitionen und fixe Betriebskosten in beiden Fällen gleich hoch angesetzt werden können, steigen die variablen Kosten bei Produktionsausfall deutlich. Im Fall der Lastverschiebung entstehen nur geringe variable Kosten. Diese bestehen aus einem etwas erhöhten Personalaufwand je Abruf, sofern der Prozess manuell wieder angefahren werden muss. Einige Betriebe gaben an, dass sich der Wirkungsgrad bei einem Abruf etwas verschlechtert, quantitative Angaben konnten jedoch nicht gemacht werden. Daher wird im folgenden Abschnitt Wechselwirkungen zwischen Flexibilität und Energieeffizienz anhand eines beispielhaften Abrufs quantifiziert, welchen Einfluss die Wirkungsgradverschlechterung hat. Das Ergebnis wird in Form von variablen Kosten dargestellt.

Bei einem Produktionsausfall müssen die entgangenen Erlöse kompensiert werden, daher werden für die Vermarktung der Flexibilität die Opportunitätskosten angesetzt. Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse basieren auf /FFE-10 14/. Bisherige Studien zeigen, dass diese aufgrund verschiedener Bewertungsmethoden jedoch sehr stark schwanken können, wie auch in **Tabelle 5-5** ersichtlich ist.

Tabelle 5-5: *Auszug aus der Literatur zu variablen Kosten stromintensiver Prozesse /FFE-10 14/*

Prozesse	Variable Kosten in €/MWh		
	/EWI-09 10/	/ISI-03 09/	/PRA-01 13/
Aluminiumelektrolyse	500 – 1.500	75	620
Elektrolichtbogenofen	> 2.000	-	
Holzschleifer und Refiner	< 10	-	470
Roh- und Zementmühlen	400 – 1.000	490	1.750
Chlorelektrolyse	> 100	-	870

Den im Rahmen dieser Arbeit nach Formel (32) ermittelten Opportunitätskosten liegen folgende Annahmen zugrunde:

Die Kostenverteilung für die Prozesse Aluminiumelektrolyse, Elektrolichtbogenofen, Holzschleifer, Roh- und Zementmühlen, und Chlorelektrolyse erfolgt in Anlehnung an /IEA-01 04/ und /ISI-03 09/. Der Stromgroßhandelspreis wird mit 45 €/MWh, die Gewinnmarge mit 20 % angesetzt. Die sich daraus ergebenden Opportunitätskosten sind in **Abbildung 5-8** dargestellt. Während für Chlor und Primäraluminium Werte von etwa 100 bis 170 €/MWh anzusetzen sind, betragen die Opportunitätskosten für die Zement-, Papier- und Stahlproduktion zwischen 350 und 450 €/MWh. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass verschiedene Faktoren, wie beispielsweise sich verändernde Rohstoff-, Brennstoff- oder Stromgroßhandelspreise, deutlichen Einfluss auf die Opportunitätskosten haben können. Eine Quantifizierung der Opportunitätskosten wird auch für andere, nicht stromintensive Branchen durchgeführt. Ein Produktionsausfall kommt dort jedoch aufgrund der Kostenstruktur und den damit verbundenen immensen Opportunitätskosten auch in Extremfällen nicht in Frage.

		Strompreis für Industriekunden in €/MWh																														
		155	129	103	77	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51	51			
		Anteil der Stromkosten an den Gesamtkosten in %																														
		2,5%	5,0%	7,5%	10,0%	12,5%	15,0%	17,5%	20,0%	22,5%	25,0%	27,5%	30,0%	32,5%	35,0%	37,5%	40,0%	42,5%	45,0%	47,5%	50,0%	52,5%	55,0%	57,5%	60,0%	62,5%	65,0%	67,5%	70,0%	72,5%	75,0%	
Anteil der Material- und Brennstoffkosten an den Gesamtkosten in %	2,5%	7175	2948	1556	873	473	394	336	294	260	234	212	194	178	165	154	144	135	127	120	114	108	103	98	94	90	86	83	80	77	74	
	5,0%	7020	2883	1521	854	463	385	329	287	255	229	207	190	174	162	150	141	132	124	117	111	106	101	96	92	88	84	81	78	75	72	
	7,5%	6865	2819	1487	834	453	377	322	281	249	224	203	185	171	158	147	137	129	122	115	109	103	98	94	90	86	82	79	76	73	71	
	10,0%	6710	2754	1453	815	443	368	315	275	243	218	198	181	167	154	144	134	126	119	112	106	101	96	92	88	84	80	77	74	71	69	
	12,5%	6555	2690	1418	796	433	360	307	268	238	213	193	177	163	151	140	131	123	116	109	104	98	94	89	85	82	78	75	72	70	67	
	15,0%	6400	2625	1384	777	423	351	300	262	232	208	189	173	159	147	137	128	120	113	107	101	96	91	87	83	80	76	73	71	68	65	
	17,5%	6245	2561	1350	757	412	343	293	255	226	203	184	168	155	143	133	125	117	110	104	99	94	89	85	81	78	74	71	69	66	64	
	20,0%	6090	2496	1315	738	402	334	285	249	221	198	179	164	151	140	130	122	114	107	101	96	91	87	83	79	76	72	70	67	64	62	
	22,5%	5935	2432	1281	719	392	326	278	243	215	193	175	160	147	136	127	118	111	105	99	94	89	84	80	77	74	71	68	65	63	60	
	25,0%	5780	2367	1247	700	382	317	271	236	209	188	170	156	143	132	123	115	108	102	96	91	86	82	78	75	72	69	66	63	61	59	
	27,5%	5625	2303	1212	680	372	309	264	230	204	183	166	151	139	129	120	112	105	99	93	88	84	80	76	73	69	67	64	61	59		
	30,0%	5470	2238	1178	661	361	300	256	224	198	178	161	147	135	125	116	109	102	96	91	86	81	77	74	71	67	65	62	60			
	32,5%	5315	2174	1144	642	351	292	249	217	192	173	156	143	131	122	113	106	99	93	88	83	79	75	72	68	65	63	60				
	35,0%	5160	2109	1109	623	341	283	242	211	187	167	152	139	127	118	110	102	96	90	85	81	77	73	69	66	63	61					
	37,5%	5005	2045	1075	603	331	275	234	204	181	162	147	134	123	114	106	99	93	88	83	78	74	71	67	64	61						
	40,0%	4850	1980	1041	584	320	266	227	198	175	157	142	130	120	111	103	96	90	85	80	76	72	68	65	62							
	42,5%	4695	1916	1006	565	310	258	220	192	170	152	138	126	116	107	99	93	87	82	77	73	69	66	63								
	45,0%	4540	1851	972	546	300	249	213	185	164	147	133	122	112	103	96	90	84	79	75	71	67	64									
	47,5%	4385	1787	938	526	290	241	205	179	158	142	128	117	108	100	93	86	81	76	72	68	64										
	50,0%	4230	1722	903	507	280	232	198	173	153	137	124	113	104	96	89	83	78	73	69	65											
52,5%	4075	1658	869	488	269	224	191	166	147	132	119	109	100	92	86	80	75	71	66													
55,0%	3920	1593	835	469	259	215	183	160	141	127	115	105	96	89	82	77	72	68														
57,5%	3765	1529	800	449	249	207	176	153	136	122	110	100	92	85	79	74	69															
60,0%	3610	1464	766	430	239	198	169	147	130	116	105	96	88	81	76	71																
62,5%	3455	1400	732	411	229	190	162	141	124	111	101	92	84	78	72																	
65,0%	3300	1335	697	392	218	181	154	134	119	106	96	88	80	74																		
67,5%	3145	1271	663	373	208	173	147	128	113	101	91	83	76																			
70,0%	2990	1206	629	353	198	164	140	122	107	96	87	79																				
72,5%	2835	1142	594	334	188	156	132	115	102	91	82																					
75,0%	2680	1077	560	315	178	147	125	109	96	86																						

Abbildung 5-8: Opportunitätskosten stromintensiver Prozesse in Abhängigkeit der Kostenstruktur /FFE-49 16/

Wechselwirkungen zwischen Flexibilität und Energieeffizienz

Eine flexibilisierte Fahrweise einer Anlage kann gegebenenfalls zu einer Beeinflussung des Wirkungsgrades führen, was sich wiederum auf die Energieeffizienz auswirken kann. Der Grund hierfür ist ein veränderter Arbeitspunkt der Anlage. Nachfolgend sind die Ergebnisse der theoretischen Betrachtung zusammengefasst, detaillierte Informationen zur Quantifizierung enthält der Bericht zur wissenschaftlichen Begleitforschung des Projektes DSM Bayern /FFE-26 16/. Ergänzend wird die Wirkungsgradverschlechterung für einen exemplarischen Abruf in Form eines Mehrverbrauchs ausgewiesen und anschließend in variable Kosten umgerechnet.

Tabelle 5-6 zeigt den Ist-Zustand, welcher den typischen Betriebszustand darstellt, die theoretisch möglichen Vermarktungsarten, den Arbeitspunkt im üblichen Betrieb bzw. für die Vorhaltung sowie den Abruf und die Vorhaltezeit. Bei Holzschleifern, Roh- oder Zementmühlen findet ein reines Verschieben der Last statt. Eine vorgezogene oder nachgelagerte Zu- oder Abschaltung einer Anlage wirkt sich somit nicht auf deren Effizienz aus.

Tabelle 5-6: *Typische Betriebsweise stromintensiver Prozesse und Änderung der Betriebsweise bei Vermarktung von Flexibilität /FFE-26 16/*

Stromintensiver Prozess	Typischer Betriebsfall	Theoretische Vermarktungsart	Vorhaltung (typ. Betriebsfall)	Abruf (typ. Betriebsfall)	Vorhaltezeit in h/a
Aluminiumelektrolyse	Volllast	+ / - Leistung	Volllast	Teillast	6.000
Elektrolichtbogenofen	Volllast	+ / - Leistung	Volllast	Abschaltung	6.000
Holzschleifer / Refiner	Volllast	+ / - Leistung	Volllast	Abschaltung	7.000
Roh- / Zementmühle	Volllast	+ / - Leistung	Volllast	Abschaltung	5.000
Chlorelektrolyse	Voll- / Teillast	+ / - Leistung	Voll- / Teillast	Voll- / Teillast	7.000

+ = positive

- = negative

Aluminiumelektrolyse

Der Teillastbetrieb auf etwa 75 % der Last wird bei der Aluminiumelektrolyse durch Abschaltung einzelner Linien, welche wiederum aus einer Vielzahl an Zellen bestehen, realisiert. Diese Abschalten und spätere Wiederanfahren führt dazu, dass sich der spezifische Stromverbrauch im Teillastbetrieb um etwa 5 bis 10 % erhöht. Nachgeholt wird die entgangene Produktion durch eine geringfügige Überlast (über dem Volllastbetrieb) über einen längeren Zeitraum /TRI-01 14/.

Elektrolichtbogenofen

Eine Flexibilisierung des Elektrolichtbogenofens geht mit der Abschaltung der Leistungszufuhr einher. Dies entspricht zwar einer reinen Lastverschiebung, allerdings treten hier – anders als bei den Holzschleifern und Refinern oder den Roh- und Zementmühlen – während der Stillstandszeit zusätzliche Wärmeverluste von etwa 15 %¹³ auf, welche sich auf den Gesamtwirkungsgrad der Anlage negativ auswirken.

¹³ Gilt für eine mittlere Ofentemperatur von 900 °C (maximale Ofentemperatur ca. 1.800 °C)

Chlorelektrolyse

Die Veränderung der Leistungszufuhr bei der Chlorelektrolyse erfolgt durch Variation der Stromstärke. Eine höhere Leistungszufuhr bzw. Auslastung bewirkt jedoch eine quadratische Zunahme der Wärmeverluste (diese steigen nach dem Jouleschen Gesetz proportional zum Quadrat der Stromstärke). Dies führt bei hohem Teillastbetrieb zu einem geringeren Gesamtwirkungsgrad, bei geringem Teillastbetrieb dementsprechend zu einem verbesserten Gesamtwirkungsgrad.

Der Einfluss einer Flexibilisierung auf die Energieeffizienz des stromintensiven Prozesses wird anhand von Beispielen theoretisch betrachtet. Die zugrunde gelegten Daten bzw. die ursprünglichen Arbeitspunkte der Aluminium- und Chlorelektrolyse sowie des Elektrolichtbogenofens sind in **Tabelle 5-7** dargestellt.

Tabelle 5-7: *Spezifischer Stromverbrauch und mittlere Leistungsaufnahme eines beispielhaften stromintensiven Prozesses im typischen Betriebsfall*

	Aluminium- elektrolyse	Elektrolicht- bogenofen	Chlorelektrolyse
Spezifischer Stromverbrauch in kWh/t	14.000	550	2.400
Ø Leistungsaufnahme (Gesamtanlage) in MW	150	55	25

Die Ergebnisse der theoretischen Betrachtungen werden in Form einer prozentualen Wirkungsgradveränderung abgebildet. Im Ist-Zustand wird der jeweilige Wirkungsgrad aus Datenschutzgründen jeweils auf 100 % skaliert, daher sind die ausgewiesenen Wirkungsgradveränderungen als relative Veränderung und nicht als Prozentpunkte zu interpretieren. Ein negativer Wert entspricht einer Wirkungsgradverschlechterung, ein positiver dementsprechend einer Wirkungsgradverbesserung.

Abbildung 5-9 zeigt die durch eine Vermarktung positiver Leistung bewirkte jährliche Wirkungsgradveränderung der oben beschriebenen stromintensiven Prozesse für 10, 100 und 1.000 h Abruf pro Jahr bei einer zwischen 4.000 und 8.000 Stunden variierten Vorhaltezeit je stromintensivem Prozess. Es zeigt sich, dass die Beeinflussung durch eine flexible Fahrweise bei allen betrachteten Prozessen bei einem Abruf von bis zu 100 h pro Jahr bei deutlich unter einem Prozent liegt. Diese Veränderung kann aufgrund der vorhandenen Messungenauigkeit nicht eindeutig quantifiziert werden, daher kann diese vernachlässigt werden. Bei einem Abruf von etwa 1.000 h pro Jahr liegt die Wirkungsgradveränderung bei der Aluminium- und Chlorelektrolyse immer noch unter einem Prozent. Bei dem Elektrolichtbogenofen verschlechtert sich der Gesamtwirkungsgrad jedoch im Mittel um etwa 2,5 %. Dies ist auf die erhöhten Wärmeverluste des Ofens zurückzuführen.

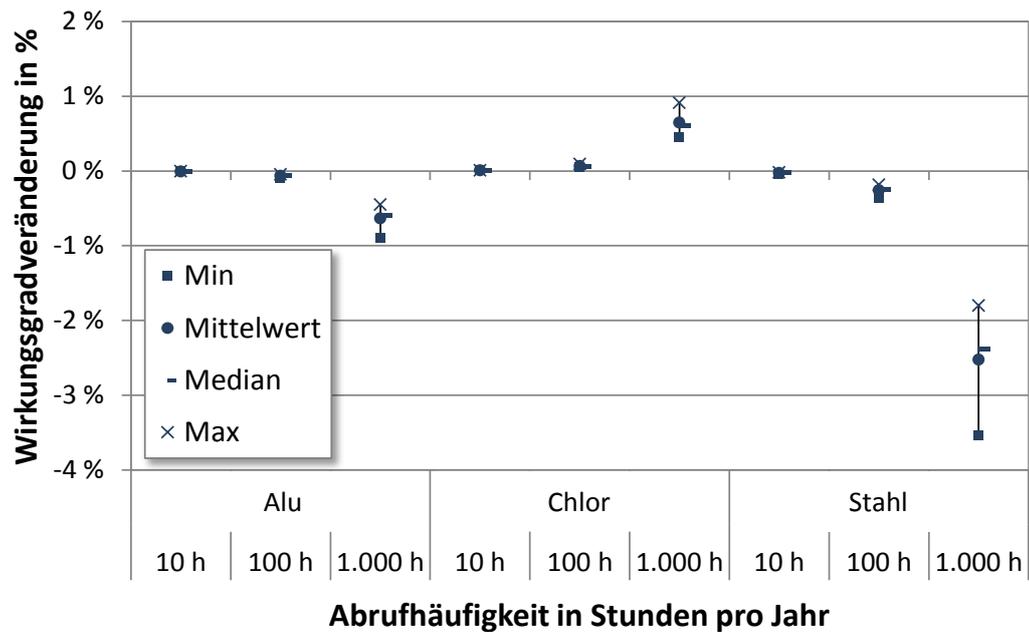


Abbildung 5-9: *Veränderung des jährlichen Gesamtwirkungsgrades der Aluminium- und Chlorelektrolyse sowie des Elektrolichtbogenofens bei Vermarktung positiver Leistung*

Die Vermarktung negativer Leistung ist in **Abbildung 5-10** dargestellt. Während die jährliche Wirkungsgradveränderung für die Chlorelektrolyse und den Lichtbogenofen auch bei 1.000 h Abruf pro Jahr unter einem Prozent liegt, zeigt sich bei der Aluminiumelektrolyse, dass eine Erhöhung der Leistungsaufnahme eine Verschlechterung des Gesamtwirkungsgrades von etwa 4 bis 5 %, je nach jährlichen Abrufstunden, bewirkt. Die Ursache für diese Verschlechterung liegt darin begründet, dass für die Vorhaltung negativer Leistung ein Teillastbetrieb erforderlich ist (für die Aluminiumelektrolyse liegt dieser bei 75 %), welcher einen spezifisch höheren Verbrauch aufweist. Bei einem Abruf verschiebt sich der Arbeitspunkt von Teillast hin zu Vollast, je höher also die jährlichen Abrufstunden sind, desto häufiger werden die Anlagen unter Vollast und somit maximaler Effizienz betrieben.

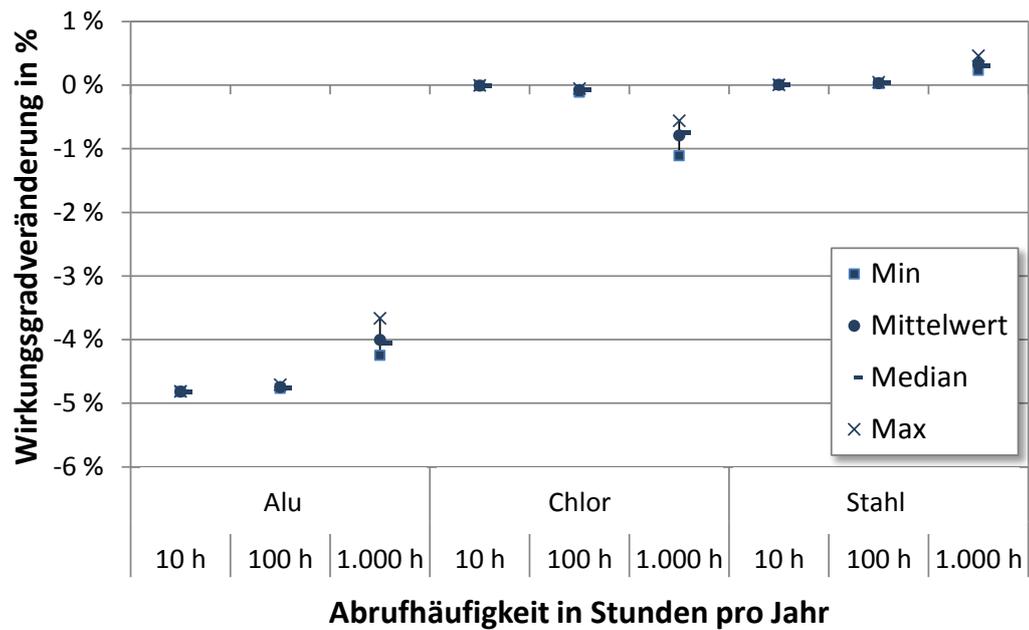


Abbildung 5-10: Veränderung des jährlichen Gesamtwirkungsgrades der Aluminium- und Chlorelektrolyse sowie des Elektrolichtbogenofens bei Vermarktung negativer Leistung

Eine Beeinflussung des jährlichen Gesamtwirkungsgrades durch eine Flexibilisierung ist zwar erkennbar, diese ist jedoch in den meisten Fällen vernachlässigbar gering bzw. liegt unterhalb der Grenze der Messbarkeit.

Zusätzlich muss jedoch die Veränderung des Wirkungsgrades für einen einzelnen Abruf untersucht werden. Verschlechtert sich der Wirkungsgrad, treten variable Kosten auf, welche für eine Vermarktung berücksichtigt werden müssen. Verglichen werden jeweils der Stromverbrauch bzw. die Kosten einer Stunde bei typischer Produktion und bei einem Abruf positiver oder negativer Leistung mit anschließendem Nachholeffekt. Voraussetzung ist, dass in beiden Fällen die gleiche Produktionsmenge erzeugt wird, welche der in einer Stunde erzeugten Produktionsmenge im ursprünglichen Betriebszustand entspricht. **Tabelle 5-8** zeigt die Wirkungsgradveränderung sowie die variablen Kosten¹⁴ für einen Abruf bei Flexibilisierung stromintensiver Prozesse. Eine Wirkungsgradverbesserung führt nicht zu Kosten und wird daher nicht weiter betrachtet. Eine Wirkungsgradverschlechterung um 3,6 % ergibt sich bei Abruf positiver Leistung sowie negativer Leistung in der Aluminiumelektrolyse. Diese entspricht variablen Kosten von 7,2 €/MWh. Die Erhöhung der Last der Chlorelektrolyse aus Flexibilitätsgründen führt zu einer Wirkungsgradverschlechterung um 4,5 % bzw. zu variablen Kosten von 27,7 €/MWh. Für den Elektrolichtbogenofen wird keine Wirkungsgradveränderung aufgrund der Flexibilisierung veranschlagt. Da der Lichtbogenofen eine etwas höhere Produktionskapazität als die Folgeprozesse aufweist, entsteht im Lauf eines Tages ein zeitlicher Puffer. Um diesen abzubauen, bedarf es über den Tag verteilt eines oder mehrerer kürzerer Stillstände. Diese führen sowohl mit als auch ohne Flexibilisierung zu einem gleichbleibend erhöhten Wärmeverlust.

¹⁴ Der Strompreis wird überschlägig mit 50 €/MWh angesetzt.

Eine zusätzliche Variation der Vorhaltezeit hat in den meisten Fällen keinen Einfluss auf die variablen Kosten. Eine wesentliche Erhöhung der variablen Kosten ergibt sich bei deutlicher Erhöhung der Vorhaltezeit für den Abruf negativer Leistung bei der Aluminiumelektrolyse. Entscheidend wirkt sich der spezifisch höhere Energieverbrauch des Teillastbetriebs aus. Bei einer Vorhaltezeit von 1.000 Stunden und einem nur einstündigen Abruf erhöhen sich die variablen Kosten der Aluminiumelektrolyse auf ca. 7.200 €/MWh.

Tabelle 5-8: *Variable Kosten stromintensiver Prozesse durch Wirkungsgradverschlechterung bei einem Abruf (Produktionsmenge entspricht der typischen Produktionsmenge einer Stunde)*

Stromintensiver Prozess	Abruf positiver Leistung		Abruf negativer Leistung	
	Wirkungsgradveränderung in %	Variable Kosten in €/MWh	Wirkungsgradveränderung in %	Variable Kosten in €/MWh
Aluminiumelektrolyse	-3,6 %	7,2	-3,6 %	7,2
Elektrolichtbogenofen	Entfällt	Entfällt	Entfällt	Entfällt
Holzschleifer / Refiner	Entfällt	Entfällt	Entfällt	Entfällt
Roh- / Zementmühle	Entfällt	Entfällt	Entfällt	Entfällt
Chlorelektrolyse	3,6 %	Nicht relevant	-4,5 %	27,7

5.1.6 Zukünftige Entwicklung

Die zukünftige Entwicklung der Lastflexibilisierung stromintensiver Prozesse wird durch verschiedenste Faktoren beeinflusst. Zum einen werden Aspekte analysiert, welche sich auf das technische Potenzial auswirken können, zum anderen wird untersucht, wie sich die Kostenseite zukünftig entwickeln kann.

Beeinflussung des technischen Potenzials

Die folgenden Ausführungen zur Beeinflussung des technischen Potenzials basieren auf /FFE-49 16/. Eine entscheidende Wirkung haben die zukünftige Entwicklung der Nachfrageseite sowie die zur Herstellung eines Produktes eingesetzten Verfahren. Nimmt die Nachfrage beispielsweise stark ab oder reduziert sich aufgrund von Energieeffizienzmaßnahmen und Anlagenerneuerungen der spezifische Stromeinsatz zur Erzeugung eines Produktes, hat dies eine deutliche Minderung der Flexibilität zur Folge. Eine Änderung im Verfahren kann ebenfalls zu veränderten Potenzialen führen. Beispielsweise kann eine Verfahrensumstellung aufgrund der Änderung regulatorischer Rahmenbedingungen sowohl positiven als auch negativen Effekt auf das Lastflexibilisierungspotenzial haben. Dies wird am Beispiel der Chlorelektrolyse verdeutlicht. Das bisher nicht flexibel einsetzbare Asbest-Diaphragmaverfahren stellt nach Angabe der EU in /EU-09 13/ nicht mehr die beste verfügbare Technik dar. Es besteht somit die Möglichkeit, auf das asbestfreie Diaphragmaverfahren oder das als beste verfügbare Technik geltende Membranverfahren umzustellen. Durch Wechsel auf das Membranverfahren erhöht sich das Flexibilitätspotenzial deutlich. Die Umrüstung des ebenfalls nicht mehr als beste verfügbare Technik geltenden Amalgamverfahrens auf das Membranverfahren hat ein sich reduzierendes Lastflexibilisierungspotenzial zur

Folge. Die Ursache hierfür ist der geringere spezifische Stromverbrauch des Membranverfahrens bei gleich hohem flexiblem Anteil.

Die nach /ISI-06 11/ erwartete Veränderung der Produktionsmengen in den betrachteten Produktionsverfahren zwischen dem Jahr 2015 und dem Jahr 2030 ist in **Abbildung 5-11** dargestellt. Eine deutliche Erhöhung der Produktionsmenge ist aufgrund der oben beschriebenen Änderung der regulatorischen Rahmenbedingungen beim Membranverfahren zur Chlorherstellung zu erwarten (Steigerung der jetzigen Menge um etwa 75 %). Während bei der Stahlproduktion im Elektrolichtbogenofen bis 2030 ein leichter Anstieg zu erwarten ist, sind die Produktion von Primäraluminium, Holzstoff und Zement nach /ISI-06 11/ leicht rückläufig.

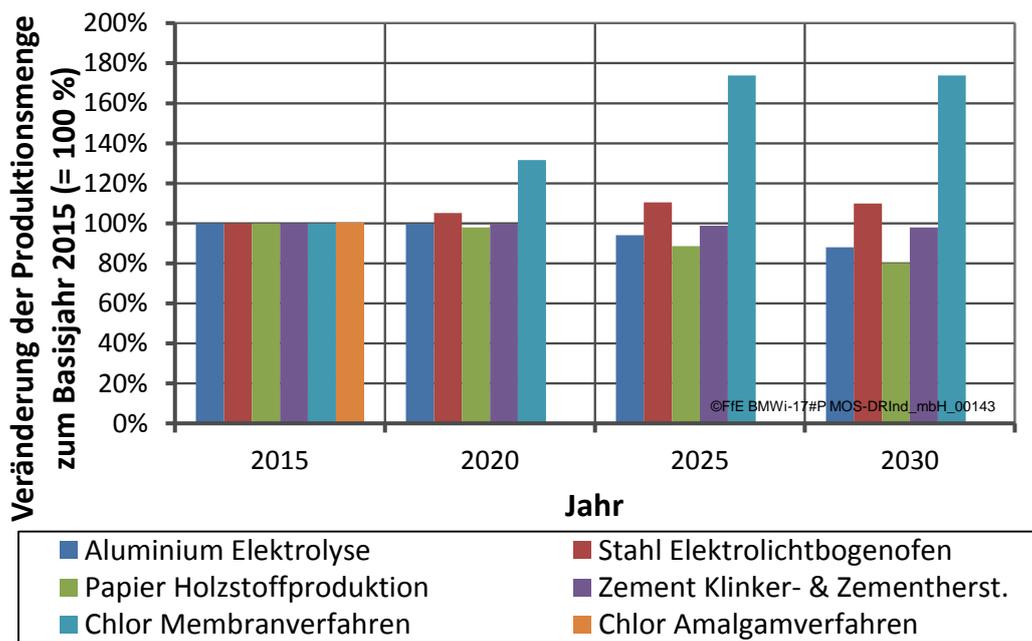


Abbildung 5-11: Produktionsentwicklung bis 2030 (eigene Darstellung nach /ISI-06 11/)

Der in /ISI-06 11/ prognostizierte spezifische Stromverbrauch reduziert sich aufgrund von Energieeffizienzmaßnahmen und teilweisen Anlagenerneuerungen bis 2030 bei nahezu allen betrachteten Prozessen mit Ausnahme der Roh- und Zementmühlen. Dort bleibt der spezifische Stromverbrauch annähernd konstant (siehe **Abbildung 5-12**).

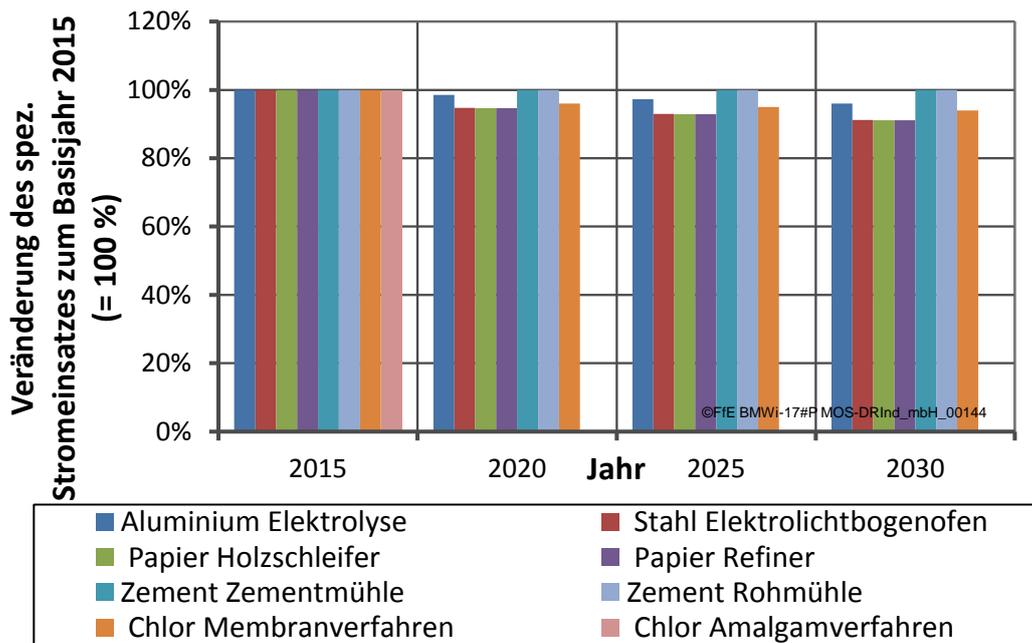


Abbildung 5-12: *Entwicklung des spez. Stromeinsatzes bis 2030 (eigene Darstellung nach /ISI-06 11/)*

Die Entwicklung des Lastflexibilisierungspotenzials im Falle der Lastverschiebung und des Produktionsausfalls ist in **Tabelle 5-9** und **Tabelle 5-10** dargestellt. Obwohl sich im Falle der Lastverschiebung das positive Lastflexibilisierungspotenzial der Chlorelektrolyse deutlich erhöht, nimmt das gesamte positive Potenzial leicht ab. Dies liegt vor allem an den deutlich rückläufigen Flexibilitäten der Aluminiumelektrolyse und der Holzstofferzeugung mittels Holzschleifer und Refiner. Das negative Potenzial steigt bis zum Jahr 2030 leicht an. Die Ursache hierfür ist überwiegend auf die Chlorelektrolyse zurückzuführen. Durch den Umstieg von Amalgam- auf Membranverfahren erhöhen sich bis 2030 sowohl positives als auch negatives Flexibilisierungspotenzial.

Tabelle 5-9: *Entwicklung des Lastflexibilisierungspotenzials stromintensiver Prozesse bei Lastverschiebung bis 2030*

Positives Lastflexibilisierungspotenzial in MW	Jahr			
	2012	2020	2025	2030
Aluminiumelektrolyse	281	277	257	238
Elektrolichtbogenofen	957	953	983	960
Holzschleifer und Refiner	313	290	257	228
Roh- und Zementmühlen	381	379	376	373
Chlorelektrolyse	473	430	563	557
Summe	2.405	2.329	2.436	2.355
Negatives Lastflexibilisierungspotenzial in MW	Jahr			
	2012	2020	2025	2030
Aluminiumelektrolyse	0	0	0	0
Elektrolichtbogenofen	0	0	0	0
Holzschleifer und Refiner	69	64	56	50
Roh- und Zementmühlen	163	162	161	160
Chlorelektrolyse	300	272	356	352
Summe	531	499	574	562

Die Entwicklung des positiven Potenzials bis 2030 bei Produktionsausfall zeigt zunächst eine leichte Erhöhung des Potenzials bis 2025, im Jahr 2030 ist jedoch ein leichter Rückgang zu erwarten. Dies hängt überwiegend damit zusammen, dass der Absatz an Primäraluminium und Holzstoff bzw. Papier insgesamt rückläufig ist.

Tabelle 5-10: *Entwicklung des positiven Lastflexibilisierungspotenzials stromintensiver Prozesse bei Produktionsausfall bis 2030*

Positives Lastflexibilisierungspotenzial in MW	Jahr			
	2012	2020	2025	2030
Aluminiumelektrolyse	1.126	1.107	1.029	951
Elektrolichtbogenofen	1.114	1.110	1.145	1.117
Holzschleifer / Refiner	2.720	2.524	2.237	1.984
Roh- / Zementmühle	921	917	911	902
Chlorelektrolyse	988	1.248	1.632	1.615
Summe	6.869	6.905	6.954	6.570
Veränderung zu 2012 (= 100 %)		1 %	1 %	-4 %

Die zukünftige Entwicklung beinhaltet bisher keine Anpassungen in den Produktionsverfahren, die aufgrund einer Flexibilitätserhöhung durchgeführt werden. Beispielsweise wird derzeit im Rahmen des Forschungsvorhabens Kopernikus /BMBF-01 16/ eine erhöhte Flexibilität der Aluminiumelektrolysezellen untersucht. Regelbare Wärmetauscher sollen das thermische Gleichgewicht bzw. die Temperatur in den Zellen nahezu konstant halten, obwohl die Last beliebig schnell um bis zu 25 % stetig verändert werden kann (Erhöhung und Reduktion um bis zu 25 % möglich). Ziel

ist es, diese Flexibilität über bis zu 48 Stunden anzubieten, ohne die nachgeschaltete Gießanlage zu beeinflussen. Gelingt dieses Pilotvorhaben, so ist damit zu rechnen, dass die Flexibilität der Aluminiumelektrolyse in Zukunft deutlich erhöht wird. Je nach Betriebspunkt kann entweder eine höhere positive Leistung oder zusätzlich negative Leistung angeboten werden. Angemerkt werden muss jedoch, dass sich die Energieeffizienz während der flexiblen Fahrweise etwas verschlechtert. Je häufiger die Betriebsweise geändert wird, desto stärker wirkt sich dies auf den Gesamtwirkungsgrad der Anlage aus.

Neben der Nutzung der bereits betrachteten stromintensiven Prozesse bestehen weitere Möglichkeiten, das Lastflexibilisierungspotenzial zu erhöhen. Zum einen kann die Flexibilisierung erhöht werden, indem weitere Anlagen beispielsweise aus anderen Branchen genutzt werden, zum anderen können durch Elektrifizierung bzw. Hybridisierung zusätzliche Potenziale erschlossen werden.

In /FFE-06 15/ wird im Detail untersucht, welche elektrothermischen Verfahren sich zusätzlich zu den bereits genannten Verfahren für eine flexible Betriebsweise eignen. **Tabelle 5-11** und **Tabelle 5-12** fassen die Ergebnisse für die verschiedenen elektrothermischen Verfahren zusammen. Bewertet wird dort auch, ob sich die einzelnen Verfahren aus technischer Sicht für eine Flexibilisierung eignen. Ob diese auch praktisch möglich ist, wird anhand folgender Kriterien bewertet: Erfolgt durch die Flexibilisierung eine Beeinflussung der Produktqualität oder der Produktionsmenge oder besteht ein hoher organisatorischer Aufwand? Sofern eines der genannten Kriterien zutrifft, wird die jeweilige Technologie als praktisch nicht für eine Flexibilisierung geeignet eingestuft. Das Ergebnis zeigt, dass der Großteil der Verfahren nicht für eine Lastflexibilisierung geeignet ist. Lediglich die folgenden Prozesse können flexibel betrieben werden:

- Elektroglasschmelzofen
- Infrarotstrahler für die Raumwärmeerzeugung
- Induktives Schmelzen (Tiegelofen)
- Elektro- / Elektrodenkessel
- Elektrische Heizstäbe

Tabelle 5-11: *Elektrothermische Verfahren nach /CONR-01 93/, /TUM-01 89/ und /BLESL-01 13/ sowie deren Eignung hinsichtlich Flexibilisierung /FFE-06 15/ - Teil 1*

Verfahren	Art der Erwärmung	Anlage	Betrieb	Flexibilisierung (technisch) möglich	Beeinflussung Produktqualität	Beeinflussung Produktionsmenge	Hoher organisatorischer Aufwand	Praktisch geeignet für Flexibilisierung
Widerstandserwärmung	Direkt	Konduktive Erwärmungsanlagen (Standanlagen)	Diskontinuierlich	x		x		-
		Konduktive Erwärmungsanlagen (Durchlaufanlagen)	Kontinuierlich	x		x		-
		Widerstandsschweißanlage	Diskontinuierlich					-
		Elektroschlackeumschmelzverfahren	Diskontinuierlich	x	(x)			-
		Siliziumcarbid-Ofen	Diskontinuierlich	x	x			-
		Graphitierungsöfen	Diskontinuierlich	x	x			-
		Elektroglasschmelzöfen - vollelektrisch beheizte Glasschmelze	Diskontinuierlich	x				x
		Elektroglasschmelzöfen - elektrische Zusatzbeheizung von Glasschmelzen	Kontinuierlich	x				x
		Elektrodensalzbadöfen	Kontinuierlich	x	x			-
	Elektrodenkessel	Diskontinuierlich	x				x	
	Indirekt	Strahlungsöfen, Heißluft-/Umluftöfen	(Dis)kontinuierlich	x	x	(x)		-
		Widerstandsöfen	(Dis)kontinuierlich	x		x		-
		Walzentrockner	Kontinuierlich	x		x		-
		Elektrokessel	Diskontinuierlich	x				x
		Heizschwert	Diskontinuierlich	x				x
		Galvanik	Diskontinuierlich	x	x	x		-
		Infrarotstrahler (Prozesswärme)	Diskontinuierlich	x	x	x		-
		Infrarotstrahler (Raumwärme)	Diskontinuierlich	x				x
Elektrolyse	Aluminiumelektrolyse	Kontinuierlich	x				x	
	Chlorelektrolyse	Kontinuierlich	x				x	

x = ja

- = nein

Tabelle 5-12: *Elektrothermische Verfahren nach /CONR-01 93/, /TUM-01 89/ und /BLESL-01 13/ sowie deren Eignung hinsichtlich Flexibilisierung /FFE-06 15/ - Teil 2*

Verfahren	Art der Erwärmung	Anlage	Betrieb	Flexibilisierung (technisch) möglich	Beeinflussung Produktqualität	Beeinflussung Produktionsmenge	Hoher organisatorischer Aufwand	Praktisch geeignet für Flexibilisierung
Induktive Erwärmung		Induktives Glühen (mobile Geräte)	Diskontinuierlich	x	x			-
		Induktives Härten	Diskontinuierlich	x	x			-
		Induktives Löten	Diskontinuierlich					-
		Induktives Schweißen	Diskontinuierlich					-
		Induktives Schmelzen (Tiegelofen)	Diskontinuierlich	x				x
		Induktives Schmelzen (Rinnenofen)	Kontinuierlich	x		x		-
Dielektrische Erwärmung		Hochfrequenz-Trocknung	(Dis)kontinuierlich	x	x			-
		Mikrowellentrocknung	(Dis)kontinuierlich	x	x			-
Lichtbogen-erwärmung		Lichtbogenöfen	Diskontinuierlich	x				x
Plasmastrahl-erwärmung		Plasmaschmelzofen	Diskontinuierlich	x	x			-
		Plasmaschneiden	Diskontinuierlich					-
Elektronenstrahl-erwärmung		Elektronenstrahlkanone	Diskontinuierlich	x	x	x		-
Laserstrahl-erwärmung		Laser	Diskontinuierlich					-

x = ja

- = nein

Darüber hinaus wird in /FFE-06 15/ untersucht, welche bisher brennstoffbasierten Prozesse für eine Elektrifizierung bzw. Hybridisierung geeignet sind. Dazu werden sämtliche in den einzelnen Branchen eingesetzten Verfahren und Temperaturniveaus analysiert. Während in den Bereichen geringerer Temperaturniveaus (bis ca. 240 °C) überwiegend Heißwasser oder Dampf zum Einsatz kommt, nimmt die Direktbefeuerung bei höheren Temperaturniveaus zu. Eine Umstellung der einzelnen Prozesse auf eine bivalente Erzeugung ist in vielen Bereichen technisch möglich. Beispielsweise kann die zentrale Heißwasser- oder Dampferzeugung auch mittels Elektro- oder Elektrodenkessel erfolgen. Auch Wärmepumpen können bis zu einem Temperaturniveau von etwa 140 °C (Hochtemperaturwärmepumpen) zum Einsatz kommen. Nicht geeignet sind spezielle direktbefeuerte Verfahren, in welchen der Brennstoff zusätzlich als Rohstoff genutzt wird. Auch nicht berücksichtigt werden Prozesse, welche mit einem Anlagenneubau verbunden sind. Folgende Verfahren werden als nicht geeignet eingestuft:

- Koksherstellung
- Stahlerzeugung im Hochofen
- Primärkupferherstellung
- Glaserzeugung (einige Sorten)

- Einzelne Prozesse der Grundstoffchemie, wie z.B. Methan- oder Ammoniakproduktion

Insgesamt verbleiben bei einem Brennstoffverbrauch von ca. 420 TWh/a für die industrielle Prozesswärmeerzeugung nach /ISI-03 13/ etwa 180 TWh/a, welche für eine Hybridisierung und somit Elektrifizierung geeignet sind (vgl. **Abbildung 5-13**). Die mittlere Last würde sich somit um ca. 29 GW erhöhen. Aufgrund des bivalenten Systems stünde diese Leistung auch als Flexibilität zur Verfügung.

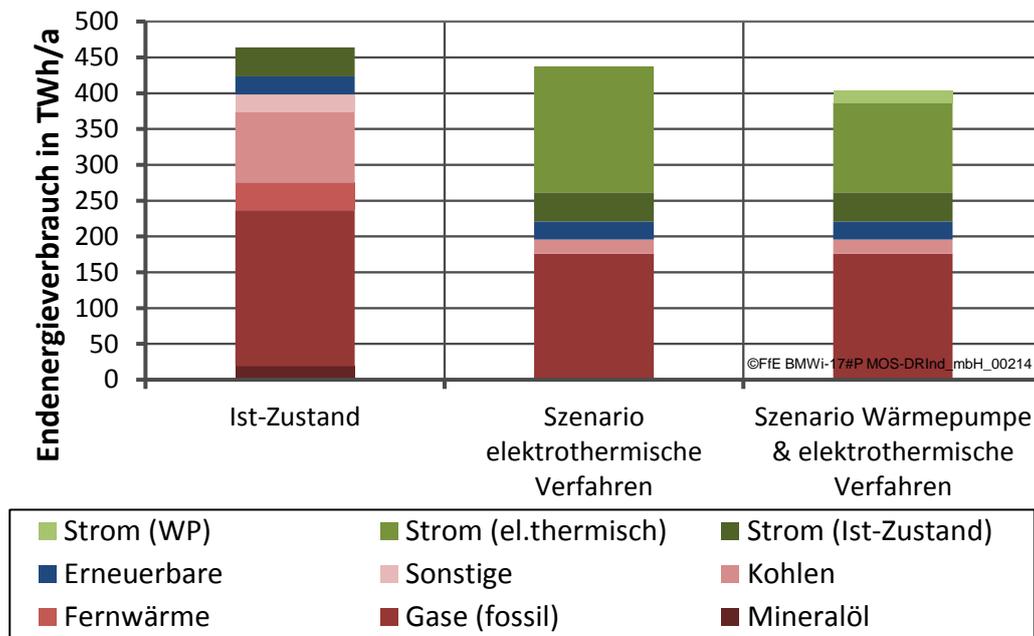


Abbildung 5-13: Endenergieverbrauch zur Prozesswärmeerzeugung im Ist-Zustand und durch Elektrifizierung bzw. Hybridisierung /FFE-06 15/

Beeinflussung der Kosten

Neben der zukünftigen Entwicklung des technischen Potenzials wird, basierend auf /FFE-49 16/, auch analysiert, welche Faktoren Auswirkungen auf die Kosten für die Erschließung und den Betrieb der Lastflexibilisierung haben.

Aufgrund der Tatsache, dass die Investitionen für die Erschließung der Lastflexibilisierung bei stromintensiven Prozessen bereits heute sehr gering sind, ist nicht von einer deutlichen Kostendegression auszugehen. Dies gilt auch für die fixen Betriebskosten. Die Opportunitätskosten im Falle eines Produktionsausfalls sind von mehreren Faktoren, wie beispielsweise Stromgroßhandelspreis oder Rohstoffpreis, abhängig. An dieser Stelle wird aufgrund einer unzureichenden Datengrundlage hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung von Rohstoffpreisen etc. von einer detaillierten Analyse abgesehen.

5.2 Querschnittstechnologien

Für Querschnittstechnologien wird das akzeptierte technische Potenzial ausgewiesen. Da sich viele Unternehmen bisher nicht mit der Flexibilisierung von Querschnittstechnologien beschäftigt haben und auch nur wenige Betriebe Flexibilitäten vermarkten, können die Angaben aus der Unternehmensbefragung aufgrund zu geringer praktischer Erfahrungen lediglich eine Momentaufnahme des akzeptierten Potenzials widerspiegeln.

5.2.1 Geeignete Anlagen

Im Folgenden werden die Funktionsweisen der einzelnen Querschnittstechnologien erläutert sowie auf deren Flexibilität eingegangen. Im Anschluss erfolgt die Auswahl der für die weitere Betrachtung relevanten Querschnittstechnologien.

Lüftung

Lüftungsanlagen werden in der Industrie für verschiedene Zwecke eingesetzt, dabei wird zwischen raum- und prozesslufttechnischen Anlagen unterschieden. Prozesslufttechnische Anlagen werden beispielsweise bei Staubentwicklung als reine Absauganlagen an Produktionsanlagen eingesetzt. Bei raumlufttechnischen Anlagen wird weiter differenziert nach Anlagen mit oder ohne Lüftungsfunktion. Anlagen ohne Lüftungsfunktion werden als Umluftanlagen bezeichnet. Bei den Geräten mit Lüftungsfunktion gibt es in der Ausführung nochmals deutliche Unterschiede. Je nach Anforderung können die Geräte als reine Lüftungs-, Teil- oder Vollklimaanlagen ausgeführt sein¹⁵ /REC-01 11/.

Eine flexible Fahrweise kann bei diesen Anlagen prinzipiell durch die Steuerung der Ventilatorantriebe in Stufen oder stufenlos mittels Frequenzumrichter ermöglicht werden.

Kälte (Erzeugung und -verteilung)

Die Prozess- und Klimakälteerzeugung kann mittels unterschiedlicher Anlagen realisiert werden. So genannte Splitgeräte mit einem Außengerät und einem oder mehreren Innengeräten werden meist für dezentrale Lösungen eingesetzt. Häufig werden sie zur Klimakälteerzeugung installiert. Zentrale Geräte zur Versorgung diverser Verbraucher können verschiedene Möglichkeiten der Kälteerzeugung nutzen. Eine sehr energieeffiziente Variante ist die Kühlung mittels Kühlwasser. Hier kann zum einen Grundwasser genutzt werden, welches über einen Saugbrunnen entnommen, anschließend erwärmt und über einen Schluckbrunnen wieder in den Boden eingeleitet wird. Zum anderen kann ein Kühlkreislauf mit Rückkühlfunktion zum Einsatz kommen. Reicht das über diese Varianten erreichbare Temperaturniveau oder die erzeugbare Kälteleistung nicht aus, werden häufig Kompressionskältemaschinen eingesetzt. Dort wird das sich im Kreislauf befindliche Kältemittel mittels einem oder mehreren elektrisch angetriebenen Verdichtern auf ein höheres Druck- und Temperaturniveau gebracht, um anschließend die Kondensation des Kältemittels zu ermöglichen. Auf

¹⁵ Für Lüftungsanlagen gibt es vier mögliche thermodynamische Behandlungsfunktionen: Heizen, Kühlen, Be- und Entfeuchten. Ist nur eine der genannten Möglichkeiten verbaut, wird das Gerät als reine Lüftungsanlage bezeichnet. Bei zwei oder mehr installierten Behandlungsfunktionen gilt sie als Teilklimaanlage, sind jedoch alle vier Konditionierungsmöglichkeiten vorhanden, entspricht das einer Vollklimaanlage /REC-01 11/.

dieser Basis kann im nächsten Schritt wiederum Wärme aufgenommen werden, wobei das Kältemittel verdampft und der Kreislauf von Neuem beginnt. Alternativ hierzu können – je nach Temperaturniveau – auch Ab- und Adsorptionskältemaschinen genutzt werden. Allerdings werden diese bisher nur sehr selten zur Kälteerzeugung in der Industrie eingesetzt, wie **Tabelle 5-13** zeigt.

Tabelle 5-13: *Leistung und Energie zur Kälteerzeugung in der Industrie nach /BMWI-01 02/*

	Kompressions- kältemaschinen (KKM)	Absorptions- kältemaschinen (AKM)
Installierte Kälteleistung in MW	12.148	233
Prozentualer Anteil an installierter Kälteleistung	98,1 %	1,9 %
Erzeugte Kältemenge in TWh/a	17,0	0,3
Mittlere Arbeitszahl bzw. mittleres Wärmeverhältnis	3,3	0,8
Strombedarf / Heizwärmebedarf für Kälteerzeugung in TWh/a	5,1	0,4

Für eine flexible Betriebsweise geeignet sind die elektrisch angetriebenen Verdichter der Kompressionskältemaschinen. Auch die Antriebe von Kühlturmventilatoren oder Umwälzpumpen eignen sich für eine Flexibilisierung, deren schaltbare Last beläuft sich meist jedoch auf unter 10 kW je Ventilator oder Pumpe.

Pumpen

Pumpen werden nicht nur zu Kühlzwecken eingesetzt. Ein weiteres Einsatzgebiet ist beispielsweise der Transport flüssiger Rohstoffe und Produkte sowie von Medien zur Versorgung von Produktionsanlagen z.B. mit Wärme oder Kälte.

Die Flexibilisierung von Pumpen wird durch Variation der Drehzahl mittels Frequenzumrichter oder eine Zu- und Abschaltung in Abhängigkeit des Füllstands eines Speichers erreicht.

Wärme (Erzeugung und –verteilung)

In der Wärmeerzeugung und –verteilung ist der Anteil des Stromverbrauchs am Gesamtenergieeinsatz mit unter 10 % sehr gering, da für die Wärmeerzeugung meist konventionelle Brennstoffe oder Erneuerbare Energien genutzt werden /ISI-03 13/.

Die Flexibilisierung kann beispielsweise durch die Nutzung elektrischer Energie zur Wärmebereitstellung erfolgen. Durch eine Hybridisierung der zentralen Wärmeerzeugung hätte eine kurzfristige Umschaltung zwischen brennstoff- und strombasierter Erzeugung aufgrund von z.B. Preissignalen keinen Einfluss auf die Versorgung der Verbraucher. Beispielsweise kann die Beladung eines Pufferspeichers durch den Heizkessel als auch mittels eines elektrischen Heizschwerts erfolgen. Wird die Trägheit eines thermischen Systems ausgenutzt, kann auch die Leistungsaufnahme des Wärmeerzeugers (z.B. Wärmepumpe) kurzzeitig reduziert bzw. die Anlage abgeschaltet werden, ohne dass dies wesentlichen Einfluss auf die Raumtemperatur hat. Neben der Wärmeerzeugung kann auch die Wärmeverteilung mittels Heizungsumwälzpumpen für einen flexiblen Betrieb genutzt werden.

Gut flexibilisierbare, branchenübergreifende Technologien zur Prozesswärmeerzeugung sind beispielsweise Elektro- oder Elektrodenkessel zur Heißwasser- oder

Dampferzeugung, sofern diese in ein hybrides System integriert sind. Das maximal erreichbare Temperaturniveau von Elektrodenkesseln zur Erzeugung von Dampf liegt bei ca. 230 °C, durch einen nachgeschalteten Elektrodurchlauferhitzer kann das Temperaturniveau nochmals deutlich angehoben werden /AGORA-01 14/. Branchenspezifische Prozesswärmeanwendungen, die für eine Lastflexibilisierung geeignet sind, wurden bereits im Abschnitt der stromintensiven Prozesse erwähnt (vgl. Kapitel 5.1.6).

Druckluft

Druckluft ist eine der teuersten Energieformen, da hier über 90 % der eingesetzten Energie in Form von Wärme wieder an die Umgebung abgegeben werden. In der mittelständischen Industrie werden überwiegend Schraubenverdichter eingesetzt, vereinzelt wird Druckluft auch mittels Kolbenkompressoren erzeugt, in Spezialfällen kommen zudem Turbokompressoren zum Einsatz.

Die Flexibilität bzw. eine Laständerung kann durch Variation der Drehzahl oder durch Wechsel der Leistungsstufe einfach realisiert werden. Größtenteils sind in der Industrie Last-/ Leerlaufkompressoren vorhanden, welche lediglich zu- oder abgeschaltet werden können.

Beleuchtung

Ein Beleuchtungssystem besteht im Wesentlichen aus Leuchtmittel, Leuchte und Vorschaltgerät.

Die Flexibilität wird durch Nutzung einer Regelung oder Steuerung der Beleuchtung, welche durch Bewegungs- oder Präsenzmelder, Zeitschaltuhren oder eine tageslichtabhängige Steuerung realisiert werden kann, ermöglicht. Bei Letztgenannter wird die künstliche Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit des Tageslichteinfalls geregelt. Während bei einfachen Systemen lediglich Leuchtmittel an- und abgeschaltet werden, kann der Lichtstrom mit Hilfe von dimmbaren elektronischen Vorschaltgeräten stufenlos angepasst werden.

Fördertechnik

Im Bereich der Fördertechnik wird eine Vielzahl an elektrischen Antrieben für Transportvorgänge eingesetzt.

Die Flexibilität wird durch den Einsatz von Frequenzumrichtern zur Drehzahlregelung erreicht. Eine flexible Betriebsweise ist möglich, sofern der eigentliche Produktionsprozess nicht beeinflusst wird.

Informationstechnologie / Server

Branchenübergreifend werden diverse Geräte der Informationstechnologie genutzt, wie z.B. Server.

Die Flexibilität ist durch das Verschieben einzelner Rechenoperationen beispielsweise im tageszeitlichen Verlauf möglich.

Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)

Eine relativ konstante Wärme- und Stromabnahme begünstigt den wirtschaftlichen Betrieb von KWK-Anlagen. Daher eignen sich überwiegend jene Industriebetriebe für die Installation von KWK-Anlagen, in denen im Großteil des Jahres Wärme benötigt wird.

Da die eingesetzten Anlagen häufig nahezu ganzjährig möglichst unter Volllast betrieben werden, wird in den meisten Fällen Flexibilität durch eine Abschaltung oder den Teillastbetrieb der KWK-Anlage erzielt. Für den Zeitraum des Stillstands wird die Wärmeproduktion üblicherweise von konventionellen, brennstoffbasierten Wärmeerzeugungsanlagen übernommen, die auch bei einer Wartung der KWK-Anlage zum Einsatz kommen.

Netzersatzanlagen (NEA)

Netzersatzanlagen sind Notstromaggregate, welche bei Ausfall der allgemeinen Stromversorgung die Versorgung einzelner wichtiger Anlagen übernehmen. Bei der Umschaltung in den Inselbetrieb kommt es allerdings, anders als bei Batteriespeichern bzw. USV-Anlagen¹⁶, zu einer kurzen Unterbrechung der Stromversorgung.

Die Flexibilität kann durch eine kurzzeitige Zuschaltung dieser sich üblicherweise nicht in Betrieb befindlichen Anlagen erfolgen.

Eine **Abschaltung** von Lüftungsanlagen, Kältemaschinen, Heizungsumwälzpumpen oder Teilen der Beleuchtung wird von den Unternehmen in der Befragung am häufigsten genannt und wird bereits in /FFE-49 16/ beschrieben (vgl. **Abbildung 5-14**).

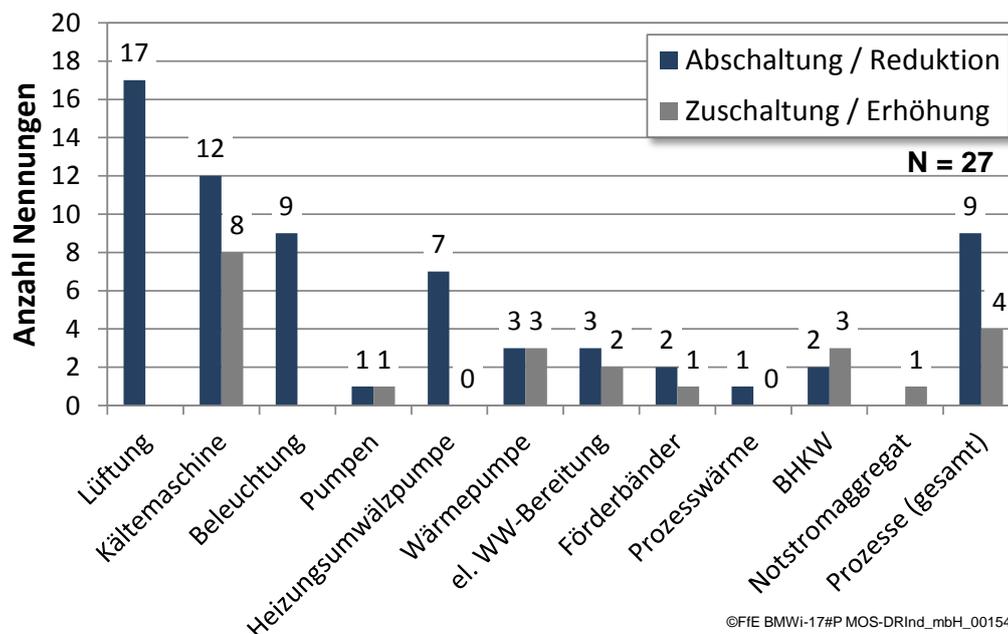


Abbildung 5-14: *Ergebnisse der Interviews: Nennung der zur Lastflexibilisierung geeigneten Querschnittstechnologien*

Etwa zwei Drittel der Betriebe (17 von 27 Befragten) gaben an, **Lüftungsanlagen** flexibel betreiben zu können. Knapp die Hälfte der befragten Unternehmen kann die Leistungsaufnahme der **Kältemaschinen** variieren. **Beleuchtungssysteme** sowie **Heizungsumwälzpumpen** zur Raumwärme- und Warmwasserbereitung wurden ebenfalls als für einen flexiblen Betrieb geeignet eingestuft. Bei Beleuchtungssystemen sei jedoch darauf hingewiesen, dass ein Lastflexibilisierungspotenzial nur vorliegt, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

Die Beleuchtungsstärke liegt im Normalzustand beispielsweise aus Gründen einer

¹⁶ USV – Unterbrechungsfreie Stromversorgung

verbesserten Produktqualität über den Anforderungen der Arbeitsstättenrichtlinie und wird bei einem Abruf auf die gesetzlichen Anforderungen reduziert. Voraussetzung für die Anpassung der Beleuchtungsstärke ist eine bereichsweise Schaltung oder tageslichtabhängige Steuerung mit Dimmfunktion. Kann eine Abschaltung der Beleuchtung oder eine Reduzierung der Leistungsaufnahme grundsätzlich immer erfolgen, ist dies als Energieeffizienzmaßnahme einzustufen. Dieser Fall wird nicht als Flexibilität gewertet. Die Nutzung von **Druckluftkompressoren** als schaltbare Last kam bei den befragten Unternehmen nicht in Frage, da die Produktionsanlagen kontinuierlich mit einem definierten Druckniveau versorgt werden müssen. Eine kurzzeitige Reduktion des Druckniveaus unter den festgelegten Grenzwert hätte gegebenenfalls ungeplante Abschaltungen von Maschinen und somit Auswirkungen auf den Produktionsprozess zur Folge.

Die meisten Nennungen bezüglich der **Zuschaltung** oder Lasterhöhung erhielten **Kältemaschinen**. Knapp ein Drittel der Befragten kann diese aufgrund des Vorhandenseins von Speichern (Kaltwasserspeicher oder Eisspeicher) zur negativen Leistungserbringung nutzen.

Da unter den Befragten auch Betriebe mit stromintensiven Prozessen waren und die Querschnittstechnologien in diesen Firmen aufgrund des anteilig geringen Verbrauchs üblicherweise nur eine untergeordnete Rolle spielen, wurden diese in den Interviews häufig nicht als Flexibilitätsoption genannt. Die Nebenanlagen weisen dort einen im Vergleich zum Produktionsprozess nur sehr geringen Leistungsbedarf und Stromverbrauch auf. Nach Ansicht der Unternehmen stehen Aufwand und Nutzen für ein Schaltbarmachen dieser Anlagen hier in keinem Verhältnis. Bei nicht stromintensiven Betrieben wurden Querschnittstechnologien jedoch deutlich häufiger als für eine flexible Fahrweise geeignet eingestuft.

Auf eine Hybridisierung und somit Flexibilisierung der Prozesswärmeerzeugung wurde bereits in Kapitel 5.1.6 eingegangen. Das Lastflexibilisierungspotenzial durch Hybridisierung der Raumwärme- und Warmwasserbereitung wird in Kapitel 5.2.6 quantifiziert.

5.2.2 Akzeptiertes Potenzial

Die folgenden Ergebnisse basieren auf /FFE-49 16/ und werden um detaillierte Erkenntnisse ergänzt. Vor der Potenzialermittlung werden die vorliegenden, detaillierten technischen Daten zu den Querschnittstechnologien der LEEN-Teilnehmer je Branche ausgewertet. Die Aufteilung des Stromverbrauchs auf Anwendungsarten dient zur Validierung der Daten mit Angaben aus der Literatur. **Abbildung 5-15** zeigt beispielsweise den Stromverbrauch der LEEN-Teilnehmer nach Anwendungsarten für die Branche Maschinen- und Fahrzeugbau. Der Bereich „Elektro“, welcher etwa 56 % des Gesamtstromverbrauchs ausmacht, beinhaltet neben dem Stromverbrauch für die Produktionsanlagen auch den für die Pumpen sowie die EDV, wobei Letzterer meist vernachlässigbar gering ist. Die Anwendungsarten Druckluft, Beleuchtung und Lüftung stellen neben dem Bereich Elektro mit 10 bis 14 % des Gesamtstromverbrauchs weitere größere Verbraucher dar.

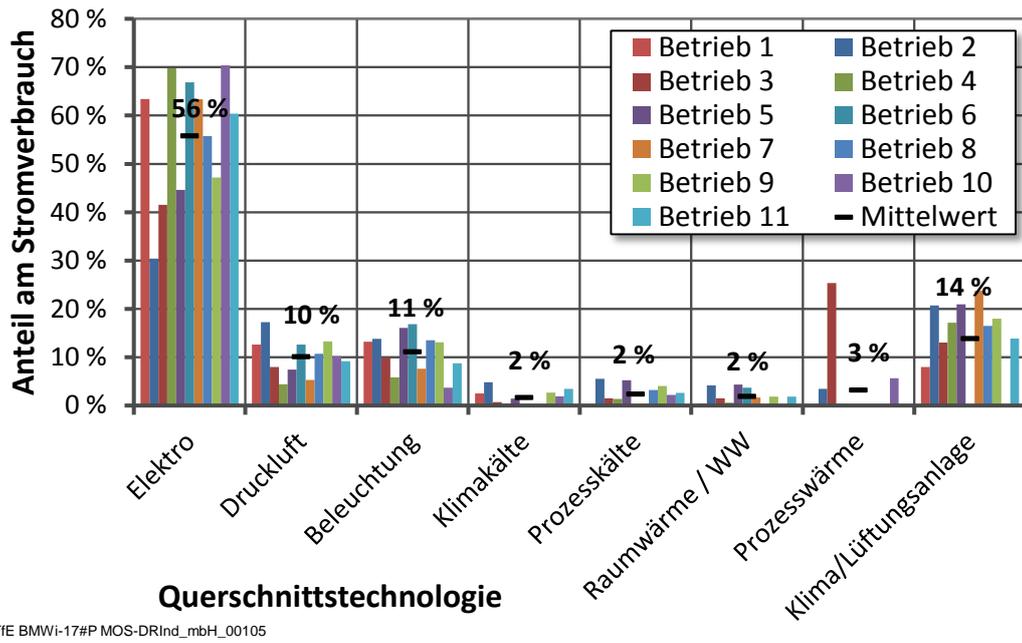


Abbildung 5-15: Aufteilung des Stromverbrauchs nach Anwendungsarten am Beispiel des Maschinen- und Fahrzeugbaus /FFE-49 16/

Der Vergleich des mittleren Anteils am Stromverbrauch nach Anwendungsarten am Beispiel des Maschinen- und Fahrzeugbaus in **Abbildung 5-16** zeigt, dass die anteiligen Stromverbräuche der LEEN-Teilnehmer der Aufteilung in der Anwendungsbilanz nach /ISI-03 13/ sehr ähnlich sind.

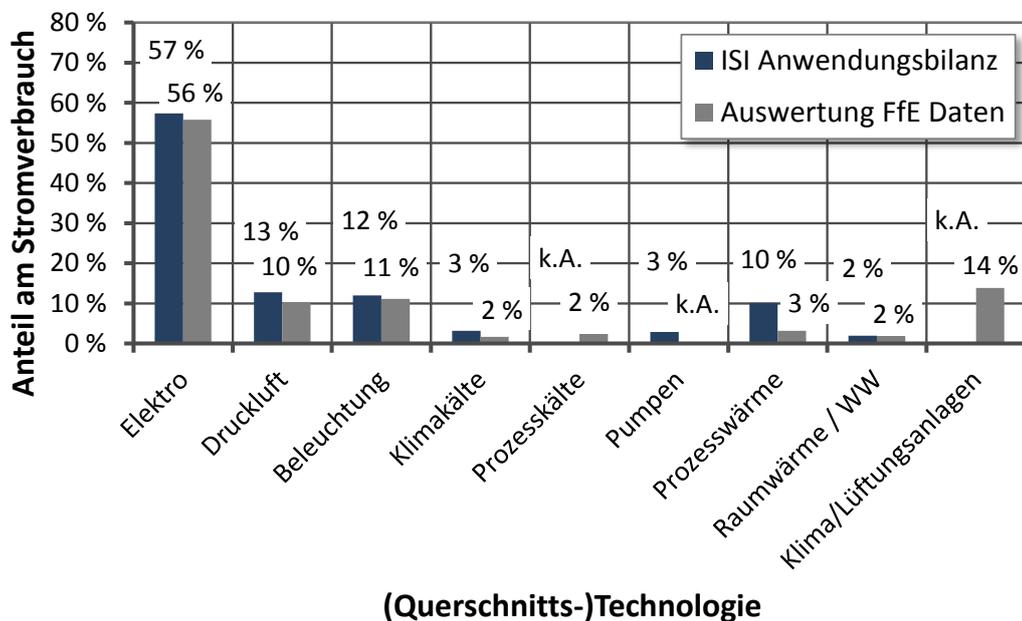


Abbildung 5-16: Aufteilung des Stromverbrauchs nach Anwendungsarten am Beispiel des Maschinen- und Fahrzeugbaus nach /ISI-03 13/ und der Auswertung der FfE-Daten

Aufgrund unterschiedlicher Zuordnungen bzw. Bilanzierungen unterscheiden sich die Werte in den Bereichen Kälte, Pumpen und Lüftung: In den Anwendungsbilanzen nach

/ASI-03 13/ wird für den Maschinen- und Fahrzeugbau keine Prozesskälteerzeugung ausgewiesen, die Lüftungsanlagen werden nicht separat betrachtet. Der Stromverbrauch für Pumpen wird jedoch bilanziert. Bei den LEEN-Teilnehmern wird dieser direkt den einzelnen Anwendungsarten, wie z.B. Prozess- oder Klimakälte bzw. Prozess- oder Raumwärme, zugeordnet. Allerdings werden dort Prozesskälte- und Lüftungsanlagen separat dokumentiert.

Die validierten Daten der Netzwerkteilnehmer werden anschließend weiteren Auswertungen unterzogen. Zur Ermittlung der absoluten installierten Leistung je Querschnittstechnologie und Branche wird der Faktor u bestimmt (vgl. Formel (33)). Dieser stellt die spezifische installierte Leistung einer Querschnittstechnologie bezogen auf den Gesamtstromverbrauch der jeweiligen Branche dar. Je nach Branche und Technologie fällt dieser Wert unterschiedlich hoch aus, wie in **Abbildung 5-17** erkennbar. So zeigt sich beispielsweise die im Vergleich zu anderen Branchen hohe installierte Leistung der Kälteerzeugung in der Lebensmittelbranche oder der vermehrte Einsatz von Pumpen in den Branchen Chemie und Papier.

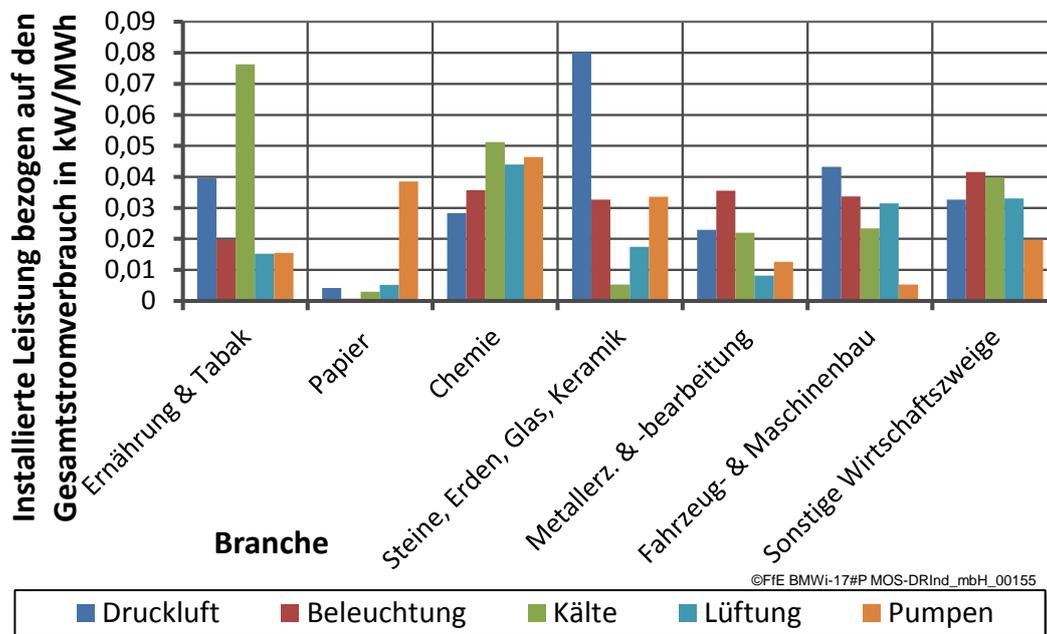


Abbildung 5-17: *Installierte Leistung je Branche und Querschnittstechnologie bezogen auf den Gesamtstromverbrauch /FFE-49 16/*

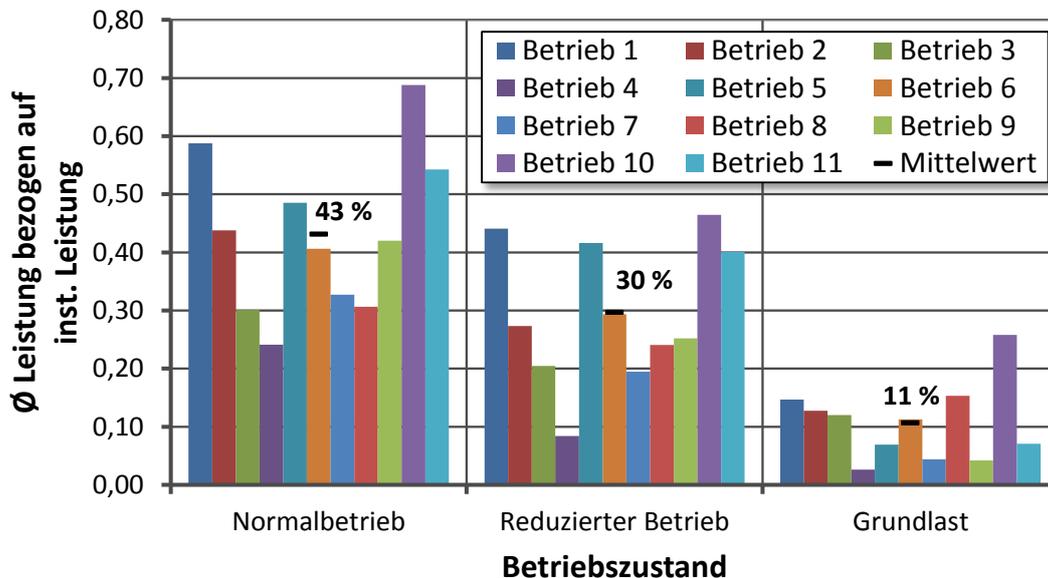
Die gesamte installierte Leistung je Querschnittstechnologie wird anhand des Stromverbrauchs je Branche bestimmt und das Ergebnis wiederum mit Literaturdaten abgeglichen. Ein Abgleich ist jedoch nur bedingt möglich, da in der Literatur nur wenige Daten vorhanden sind. Nach den Auswertungen der LEEN-Teilnehmer beläuft sich die installierte Leistung zur Kälteerzeugung auf etwa 5.400 MW_{el} für das Jahr 2012. Bei einem mittleren EER¹⁷ von 2,5¹⁸ entspricht das in etwa einer Kälteleistung von 13.500 MW. Nach /BMWi-01 02/ beläuft sich die installierte Kälteleistung im Jahr 2000

¹⁷ EER – energy efficiency ratio bzw. Leistungszahl von Kältemaschinen (analog zum COP (coefficient of performance) bei Wärmepumpen)

¹⁸ Der mittlere EER beruht auf einer Expertenschätzung auf Basis der LEEN-Daten der FfE GmbH.

auf etwa 12.000 MW. Für einen Vergleich der Werte muss berücksichtigt werden, dass der mittlere EER zwischen 2,5 und 4 liegen kann und dass zwischen den beiden Erhebungen eine Zeitspanne von ca. 15 Jahren liegt. Es zeigt sich jedoch, dass die Hochrechnung auf Basis der Werte der Netzwerkteilnehmer in einem ähnlichen Bereich liegt wie die Angaben aus der Literatur. Für die anderen Querschnittstechnologien existieren keine ausreichend detaillierten Angaben zur Validierung der installierten Leistung mit Literaturangaben. Ein Vergleich mit den auf EU-Ebene erhobenen Daten in /EC-01 00/ ist nicht zielführend, da eine Rückrechnung auf die installierte Leistung in Deutschland anhand der vorliegenden Daten nicht möglich ist.

Im nächsten Schritt wird die mittlere Last je Querschnittstechnologie und Branche ermittelt. Diese ist stark abhängig von den im jeweiligen Unternehmen installierten Anlagen und dem tatsächlichen Bedarf, wie auch **Abbildung 5-18** zeigt. Am Beispiel des Maschinen- und Fahrzeugbaus wird die mittlere Last der Druckluftkompressoren bezogen auf die installierte Leistung der Anlagen dargestellt. Dieser Wert wird für die verschiedenen Betriebszustände Normalbetrieb, reduzierter Betrieb und Grundlast ausgewiesen.



©FfE BMWi-17#P MOS-DRInd_mbH_00202

Abbildung 5-18: *Mittlere Last der Druckluftkompressoren bezogen auf die installierte Leistung in Abhängigkeit des Betriebszustands am Beispiel des Maschinen- und Fahrzeugbaus / FFE-49 16/*

Im Normalbetrieb beläuft sich die mittlere Last der Kompressoren im Maschinen- und Fahrzeugbau auf etwa 43 % der installierten Leistung. Das bedeutet, dass noch ausreichend Redundanzen im Fall eines Kompressorausfalls vorhanden sind.

Der Anteil der mittleren Last, welcher für eine flexible Betriebsweise zur Verfügung steht, wird durch den Flexibilitätsfaktor z ausgedrückt (vgl. Formel (42)). Dieser wird durch verschiedene limitierende Faktoren beeinflusst, welche bereits in Kapitel 4.2.2 beschrieben wurden.

In **Abbildung 5-19** ist über alle Branchen dargestellt, wie hoch die mittlere Last (blaue Rauten) je Querschnittstechnologie im Normalbetrieb ist. Das zusätzlich abgebildete Delta zwischen mittlerer Last und Mindestlast (rote Quadrate) entspricht dem positiven Potenzial, die Differenz zwischen mittlerer Last und Maximallast (grüne Dreiecke) dem negativen Potenzial. Beispielsweise wäre aus technischer Sicht eine kurzzeitige Reduktion der gesamten Last der Lüftungsanlagen auf etwa die Hälfte der mittleren Last möglich. Dies impliziert eine kurzzeitige Abschaltung einzelner Anlagen, aber auch eine Absenkung des Volumenstroms bei anderen Anlagen. Im Bereich der Kälteerzeugung kann die mittlere Leistungsaufnahme um etwa die Hälfte abgesenkt, aber auch um ein Drittel erhöht werden. Der Großteil der Anlagen wird dazu ganz oder in Stufen ab- oder zugeschaltet, da nur wenige Kompressionskältemaschinen mit einer Drehzahlregelung ausgestattet sind. Bei Pumpen verhält es sich ähnlich: eine Flexibilisierung ist häufig mit einer Zu- oder Abschaltung verbunden. Eine Verringerung oder Erhöhung des Volumenstroms ist bei Kühlkreisläufen, welche Produktionsanlagen versorgen, meist nicht gewünscht. Eine generelle Anpassung des Volumenstroms an den Bedarf entspräche einer Energieeffizienzmaßnahme und wird nicht als Flexibilität angesehen. Eine flexible Fahrweise von Pumpen kommt am ehesten für die Füllung von Behältern zum Einsatz.

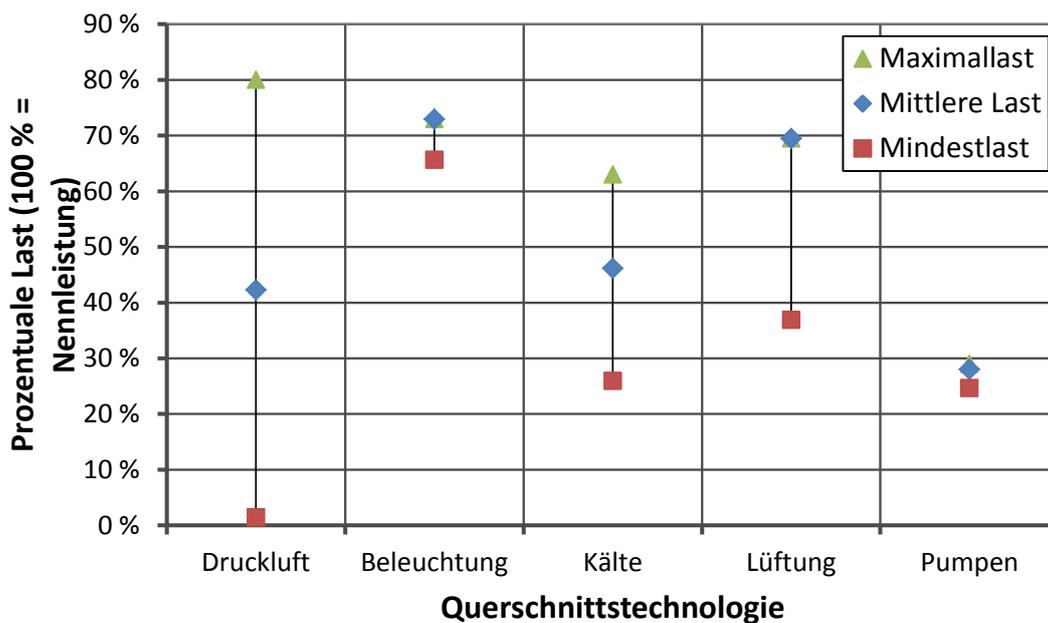


Abbildung 5-19: *Mögliche Lasterhöhung und -reduktion je Querschnittstechnologie, bezogen auf die Nennleistung (Normalbetrieb)*

Der verwendete Flexibilitätsfaktor z für die Quantifizierung des positiven und negativen Lastflexibilisierungspotenzials basiert auf Aussagen der Unternehmen in den Interviews sowie auf Expertenschätzungen aus den Erfahrungen in den LEEN im Rahmen des betrieblichen Lastmanagements. Er wird für jede Querschnittstechnologie und Branche sowie für die einzelnen Betriebszustände ausgewiesen.

Unter Berücksichtigung des Flexibilitätsfaktors können anschließend das positive sowie das negative Lastflexibilisierungspotenzial bestimmt werden. In **Abbildung 5-20** und **Abbildung 5-21** sind die mittlere Last der Querschnittstechnologien ohne

Berücksichtigung der Prozesse sowie die positiven und negativen Lastflexibilisierungspotenziale ohne Zeitbezug dargestellt. Je nach Branche kann die mittlere Last der Querschnittstechnologien aus technischer Sicht um etwa 25 bis 50 % abgesenkt werden. Im Vergleich dazu kann die Last der Querschnittstechnologien in den einzelnen Branchen auch um 15 bis 65 % erhöht werden.

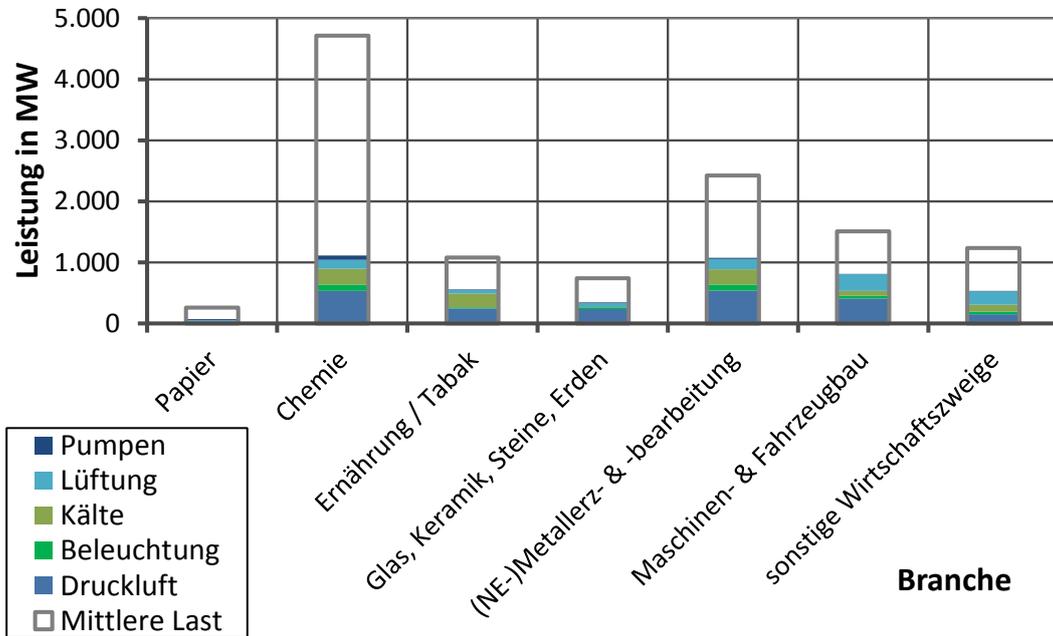


Abbildung 5-20: Positives Lastflexibilisierungspotenzial von QST ohne Zeitbezug (Normalbetrieb)

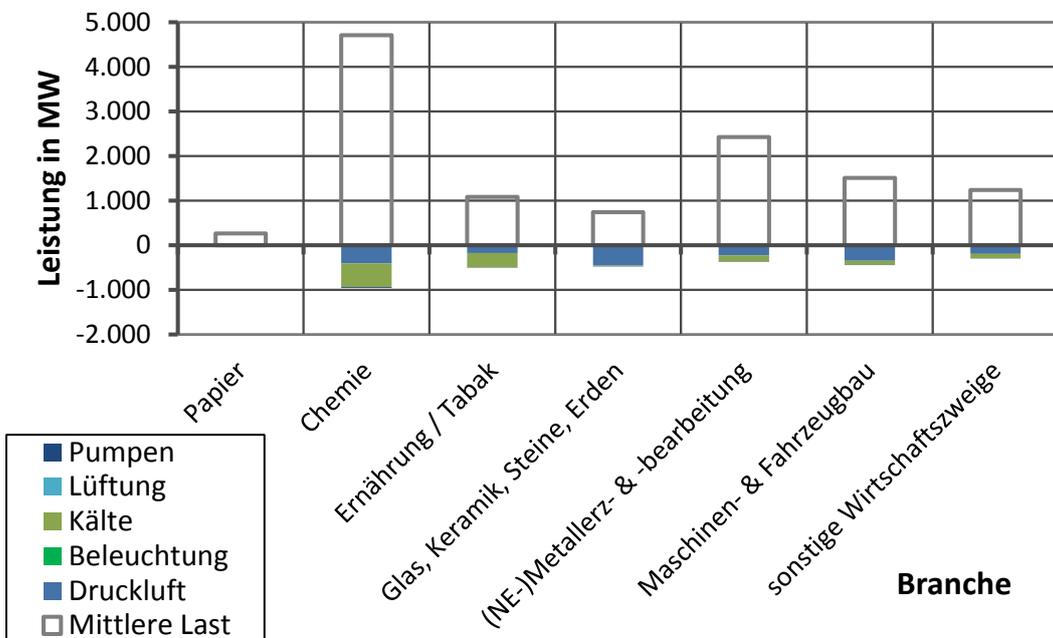


Abbildung 5-21: Negatives Lastflexibilisierungspotenzial von QST ohne Zeitbezug (Normalbetrieb)

5.2.3 Zeitliche Verfügbarkeit

Da jedoch die zeitliche Verfügbarkeit eine entscheidende Rolle bei der Potenzialermittlung spielt, werden diese Einflüsse im folgenden Abschnitt im Detail erläutert.

Lastgradient

Der Lastgradient der einzelnen Querschnittstechnologien ist je nach Anlage unterschiedlich hoch, jedoch kann nach Aussage der Unternehmen in den meisten Fällen eine Schaltung innerhalb von wenigen Minuten erfolgen. Neuere Anlagen sind oft in der Lage, die Leistungsaufnahme innerhalb von Sekunden zu verändern. Dies gilt für Druckluftkompressoren, Kältemaschinen, Lüftungsanlagen, Pumpen und Leuchtmittel. Teilweise wird diese kurzfristige Schaltbarkeit für das betriebliche Lastmanagement oder bereits für die Vermarktung am Regelleistungsmarkt (Minutenreserve und vereinzelt auch Sekundärregelleistung) genutzt. Bei älteren Anlagen ist die Reaktionsgeschwindigkeit abhängig von der Signalübertragung, was bedeutet, dass für die Leistungsänderung in Einzelfällen auch mehr als 15 Minuten nötig sein können.

Abrufdauer

Entscheidenden Einfluss auf die Höhe des tatsächlich verfügbaren Potenzials hat die Abrufdauer. **Abbildung 5-22** zeigt die Ergebnisse einer Befragung von Unternehmen in /FFE-09 13/ hinsichtlich der maximal möglichen Abrufdauer. Nahezu alle Betriebe gaben an, Flexibilität bis zu 30 Minuten zur Verfügung stellen zu können. Nur noch 60 % der Befragten konnten die Leistung bis zu zwei Stunden anbieten, bis zu vier Stunden waren es noch knapp 20 %.

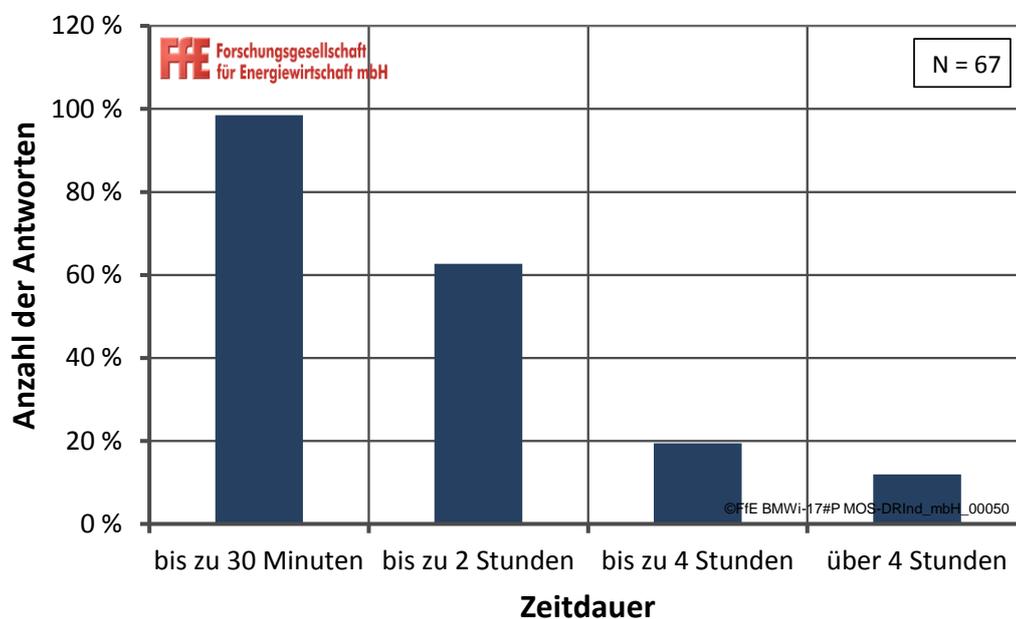


Abbildung 5-22: *Maximale Abrufdauer für Lastflexibilisierungsmaßnahmen: Antworten der Befragung in /FFE-09 13/*

Die Ergebnisse der 27 Vor-Ort-Interviews zeigen ähnliche Erkenntnisse hinsichtlich der Abrufdauer wie die oben genannte Befragung. Die Abrufdauer für die Erbringung positiver Leistung beträgt demnach bei **Lüftungsanlagen** zwischen wenigen Minuten

und zwei Stunden (vgl. **Abbildung 5-23**), größtenteils liegen die Angaben bei bis zu 30 Minuten. In den meisten Fällen wird der Volumenstrom reduziert, eine Abschaltung wird nur in wenigen Betrieben als Flexibilitätsoption genannt.

Bei **Kältemaschinen** liegt die Abrufdauer in einem ähnlichen Bereich. Die Angabe der Betriebe reichte von 15 Minuten bis zu zwei Stunden, je nach Größe und Temperaturniveau bzw. Füllstand des Speichers.

Die Reduzierung der **Beleuchtungsstärke** kann über eine bis acht Stunden erfolgen. Dieses lange Zeitintervall wird damit begründet, dass ein häufiger Wechsel der Beleuchtungsstärke von den Mitarbeitern stärker als störend empfunden wird als ein einmaliger Wechsel während der Schicht. Einzelne Unternehmen gaben an, bereits einen Teil der Beleuchtung für das betriebsinterne Spitzenlastmanagementsystem zu nutzen. Eine Abschaltung ist jedoch, wie bereits erwähnt, nur in Ausnahmefällen möglich.

Zur Abschaltedauer bei **Pumpen** wurden im Rahmen der Interviews keine ausreichend genauen Angaben gemacht. Aus den Erfahrungen in den Betriebsbegehungen im Rahmen der LEEN zeigt sich jedoch, dass Pumpen, welche nicht bereits anderen Bereichen (z.B. Wärme- und Kälteverteilung) zugeordnet sind, meist über wenige Minuten bis hin zu 30 Minuten abgeschaltet bzw. reduziert werden können /FFE-31 14/.

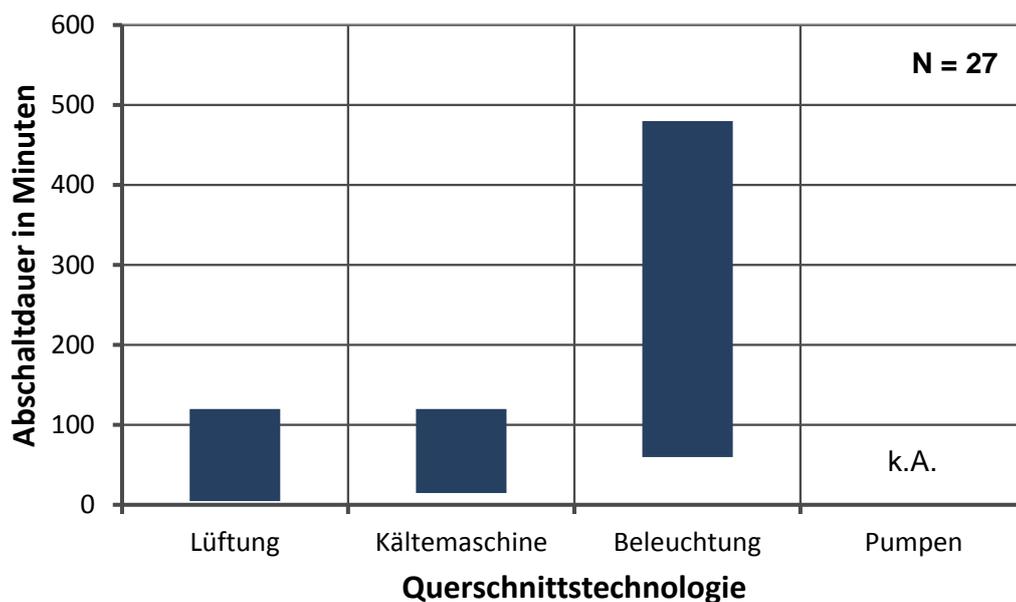


Abbildung 5-23: Angaben der befragten Unternehmen zur Abschaltedauer bei Querschnittstechnologien

Die **Zuschaltdauer** von **Kältemaschinen** kann nach Angaben der Betriebe zwischen 15 Minuten und acht Stunden liegen, wobei der Großteil der Befragten geringe Abrufdauern nannte.

Da auch hier keine genauen Angaben zur Zuschaltdauer von **Pumpen** getätigt wurden, wird auf die Erkenntnisse aus den LEEN zurückgegriffen /FFE-31 14/. Eine Zuschaltung über bis zu einer Stunde ist nach Angaben von Unternehmen möglich. Dies ist jedoch davon abhängig, ob nachgelagerte Speicher vorhanden sind.

Eine Zu- oder Abschaltung von **Druckluftkompressoren** wird zwar in der Unternehmensbefragung nicht als Flexibilitätsoption genannt, aufgrund einzelner Angaben von Betrieben im Rahmen anderer Studien, wie beispielsweise in /FFE-09 13/ oder /FORE-01 15/ wird dies jedoch nochmals geprüft. Eine Absenkung des Netzdruckes um 0,5 bar oder eine Erhöhung um bis zu 2 bar ist technisch möglich. Allerdings hätte ein weiteres Absenken des Netzdruckes unterhalb eines definierten Grenzwertes ggf. einen Produktionsstillstand zur Folge. Die oben genannte Variation des Netzdruckes bewirkt jedoch nur eine Abschaltung bzw. Zuschaltung der Kompressoren für wenige Sekunden. Zudem erhöht sich bei steigendem Druckniveau der spezifische Energieverbrauch. Um eine wesentlich längere Abrufdauer zu erreichen, müssten Druckluftspeicher im großen Maßstab nachgerüstet werden. Eine Ausnahme stellt die Druckluftherzeugung dar, bei der statt dem Druckniveau die Druckluftmenge entscheidend ist. Dies ist beispielsweise bei der Abwasseraufbereitung in Kläranlagen der Fall. Dort wird diskontinuierlich ein definierter Volumenstrom an Druckluft in verschiedene Becken eingeblasen. Die Diskontinuität wird zur Lastflexibilisierung genutzt, es ist möglich, die Druckluftherzeugung zwischen 15 Minuten und zwei Stunden abzuschalten /FFE-26 16/. Da dies jedoch ein Sonderfall ist, wird diese Option im weiteren Verlauf der Arbeit nicht betrachtet.

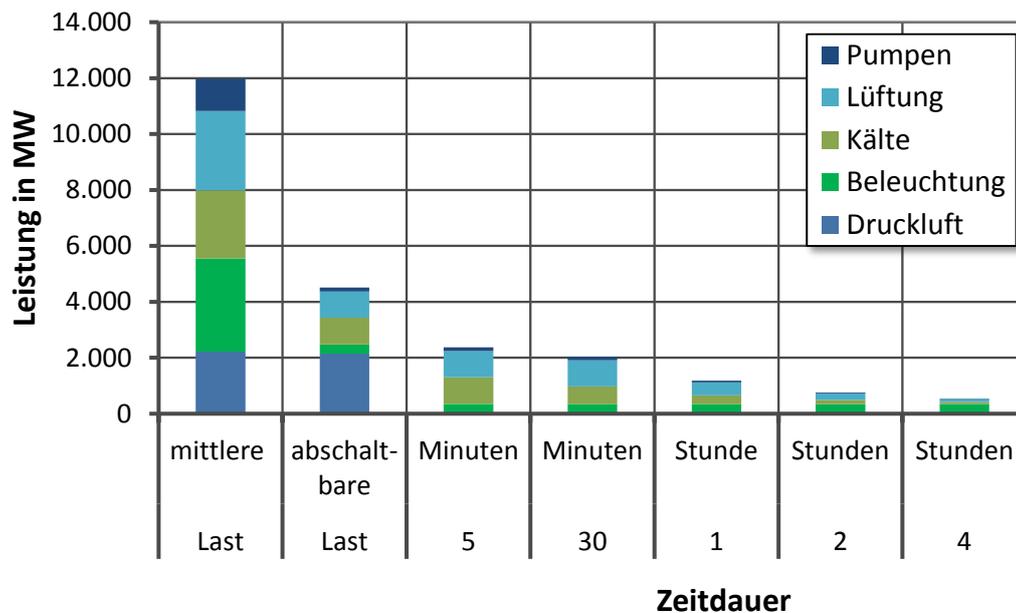
Die angesetzte maximale Abrufdauer für positive und negative Lastflexibilisierung im Normalbetrieb ist in **Tabelle 5-14** dargestellt. Diese sowie die Abrufdauern in den weiteren Betriebszuständen werden auch für die Modellierung des Anwendungsfalls in Kapitel 6 zugrunde gelegt. Die Angaben stellen den Mittelwert je Querschnittstechnologie über alle Branchen dar. Die im Weiteren verwendeten Werte liegen teilweise deutlich unter den maximalen Angaben in der Befragung, da die Mehrheit der Befragten sowie der LEEN-Teilnehmer deutlich kürzere Abrufdauern angegeben hatte.

Tabelle 5-14: *Mittlere Abrufdauer je Querschnittstechnologie bei Erbringung positiver oder negativer Leistung*

Querschnittstechnologie	Mittlere Abrufdauer in h bei Erbringung	
	Positiver Leistung	Negativer Leistung
Druckluft	< 1 Min.	< 1 Min.
Beleuchtung	4,0	Entfällt
Kälte	0,3	0,5
Lüftung	0,5	Entfällt
Pumpen	0,5	0,8

Findet nun diese mittlere Abrufdauer der einzelnen Querschnittstechnologien Berücksichtigung, hat dies bei längeren Abrufdauern einen deutlich mindernden Einfluss auf das Lastflexibilisierungspotenzial. Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse basieren auf der Zusammenfassung in /FFE-49 16/, werden jedoch um Detailanalysen ergänzt. **Abbildung 5-24** zeigt eine sich ergebende mittlere Last der Querschnittstechnologien im Normalbetrieb von ca. 12.000 MW in Deutschland, die abschaltbare Leistung ohne Zeitbezug beläuft sich auf etwa 4.500 MW. Bei einer Abrufdauer von einer Stunde reduziert sich das Potenzial auf knapp 1.200 MW, was

etwa 10 % der mittleren Last entspricht. Bei einem Abruf von vier Stunden liegt es noch bei ca. 550 MW. Deutlich ersichtlich ist auch, dass etwa die Hälfte der abschaltbaren Leistung auf der Flexibilisierung von Druckluftkompressoren basiert. Da deren Abrufdauer jedoch nur wenige Sekunden beträgt, ist deren Beitrag zum Gesamtpotenzial bereits bei Abschaltdauern von fünf Minuten verschwindend gering. Nennenswerten Anteil haben die Bereiche Lüftungsanlagen und Kältemaschinen. Die flexibilisierbare Leistung der Beleuchtung bleibt aufgrund der längeren Abrufdauer unabhängig der Zeitdauer über bis zu vier Stunden konstant.



©FFE BMWi-17#P MOS-DRInd_mbH_00227

Abbildung 5-24: Abschaltbare Leistung durch Flexibilisierung von Querschnittstechnologien in Deutschland (Normalbetrieb) in Abhängigkeit der Abrufdauer – akzeptiertes Potenzial / FFE-49 16/

Bei der zuschaltbaren Leistung verhält es sich analog. Auch hier hat die Abrufdauer entscheidenden Einfluss auf das Lastflexibilisierungspotenzial. Ohne Berücksichtigung der Abrufdauer beläuft sich das negative Potenzial auf etwa 3.100 MW. Bei einer Abrufdauer von einer Stunde reduziert sich das Potenzial bereits auf ca. 630 MW, was etwa 5 % der mittleren Last entspricht, über vier Stunden sind es noch 160 MW. Nahezu das gesamte negative Potenzial wird durch die Zuschaltung von Kältemaschinen erreicht.

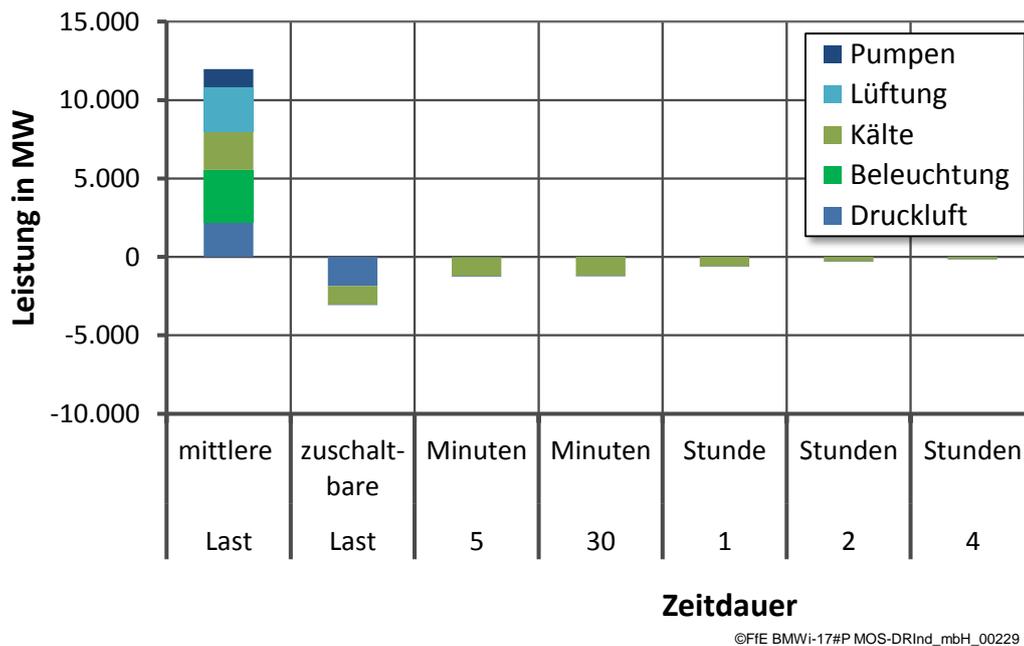


Abbildung 5-25: *Zuschaltbare Leistung durch Flexibilisierung von Querschnittstechnologien in Deutschland (Normalbetrieb) in Abhängigkeit der Abrufdauer – akzeptiertes Potenzial*

Sperrzeit

Wird positive oder negative Leistung durch die Flexibilisierung von Querschnittstechnologien erbracht, stehen diese Anlagen im Nachgang üblicherweise nicht sofort wieder für einen Abruf zur Verfügung. Dies kann unterschiedliche Gründe haben. Bei einigen Anlagen, wie beispielsweise der Kälte- oder Druckluftherzeugung sowie bei Pumpen ist ein Nachholen nötig. Bei positiver Leistungserbringung wird weniger Kälte oder Druckluft erzeugt bzw. Wasser umgepumpt, diese entgangene Menge muss während der Sperrzeit zusätzlich produziert oder transportiert werden. Bei negativer Leistungserbringung wurde während des Abrufs eine zu große Menge produziert oder transportiert, diese führt bei konstanter Abnahme der Verbraucher zu einem Überschuss. In diesem Fall ist es nötig, die Erzeugung oder Umwälzung während der Sperrzeit etwas zu mindern oder kurzzeitig abzuschalten.

Doch auch wenn kein Nachholbedarf besteht, ist in der Regel eine Sperrzeit einzuhalten. Dies ist beispielsweise bei der positiven Leistungserbringung durch Lüftungsanlagen oder Beleuchtungssysteme der Fall. Da hier mit Ausnahme der Temperierung von Hallen keine Speicherwirkung vorhanden ist, entfällt das Nachholen. Gäbe es nach einem Abruf keine Sperrzeit, käme dies einer Energieeffizienzmaßnahme gleich. Der reduzierte Volumenstrom oder die verringerte Beleuchtungsstärke wird nur kurzzeitig zur Vermarktung von Flexibilität toleriert, eine kontinuierliche Absenkung würde sich z.B. negativ auf die Luftqualität oder die Produktqualität auswirken.

Ist ein Nachholen erforderlich, so sollte dies am gleichen Tag erfolgen. Üblicherweise wird das Nachholen innerhalb weniger Stunden nach einem Abruf durchgeführt.

Die Angaben der befragten Unternehmen zur Sperrzeit nach einer positiven oder negativen Leistungserbringung sind sehr unterschiedlich. So wurden beispielsweise bei der Beleuchtung Werte zwischen einer und 24 Stunden genannt. Auch bei der

Zuschaltung von Kältemaschinen liegt die Sperrzeit zwischen einer und acht Stunden. Die Ergebnisse der Interviews werden daher mit den Angaben der LEEN-Teilnehmer abgeglichen, da auch im Rahmen des Spitzenlastmanagements über Sperrzeiten diskutiert wurde. **Tabelle 5-15** zeigt die für die anschließende Modellierung des Anwendungsfalls verwendeten Sperrzeiten je Querschnittstechnologie, jeweils unterschieden nach positiver oder negativer Leistungserbringung. Bei Beleuchtungssystemen oder der Kälteerzeugung liegt die Sperrzeit nach einem Abruf positiver Leistung bei etwa vier Stunden, bei Lüftungsanlagen oder Pumpen nur bei etwa zwei Stunden. Im Fall der negativen Leistungserbringung liegen die Sperrzeiten im gleichen Bereich wie bei der positiven Leistungserbringung. Da diese Art von Flexibilität mit Beleuchtungssystemen und Lüftungsanlagen nicht angeboten wird, entfällt hier die Angabe einer Sperrzeit.

Tabelle 5-15: *Mittlere Sperrzeit je Querschnittstechnologie bei Erbringung positiver oder negativer Leistung*

Querschnittstechnologie	Mittlere Sperrzeit in h nach Erbringung	
	Positiver Leistung	Negativer Leistung
Druckluft	0,1	0,1
Beleuchtung	4,0	Entfällt
Kälte	4,0	4,0
Lüftung	2,0	Entfällt
Pumpen	2,0	2,0

Abrufhäufigkeit

Die maximal mögliche Anzahl an Abrufen bzw. die Abrufhäufigkeit ergibt sich bei Querschnittstechnologien theoretisch aus den Stunden eines Jahres dividiert durch die Summe der maximalen Zeit für einen Abruf und die Sperrzeit. Es besteht jedoch die Möglichkeit, dass sich die Abrufhäufigkeit beispielsweise durch eine ungeplante Nichtverfügbarkeit aufgrund eines Anlagenausfalls reduziert.

An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass die bisherige Vermarktung am Regelleistungsmarkt üblicherweise durch Setzen eines verhältnismäßig hohen Arbeitspreises so gewählt wird, dass die Anzahl an Abrufen möglichst gering ist. Allerdings berichten einige bereits in der Vermarktung aktive Betriebe, dass ein Abruf bei Querschnittstechnologien häufig nicht bemerkt wird, da dieser keinen Einfluss auf nachgelagerte Prozesse hat. Daher wird im Rahmen der weiteren Modellierung zugrunde gelegt, dass ein häufigerer Abruf von ein- bis mehrmals pro Tag aus technischer Sicht durchaus möglich ist.

Einfluss von Tageszeit, Typtag und saisonalen Faktoren

Einige zeitliche Einflüsse, welche sich auf die Höhe des Lastflexibilisierungspotenzials auswirken, wurden bereits beschrieben. Hinzu kommt die Abhängigkeit des Potenzials von Typtag oder Tageszeit. Die Höhe der Differenz hängt unter anderem vom Schichtmodell ab. In Branchen, in welchen auch samstags und sonntags rund um die Uhr produziert wird, reduziert sich das Flexibilitätspotenzial nicht so stark wie in Branchen, in welchen typischerweise im Ein- oder Zweischichtmodell gearbeitet wird.

Die Veränderung der mittleren Last in Abhängigkeit des Betriebszustands je Querschnittstechnologie ist in **Abbildung 5-26** dargestellt. Die Werte sind jeweils als Mittelwert aller Branchen zu verstehen. Im reduzierten Betrieb beträgt die mittlere Last noch etwa 50 bis 60 % des Wertes des Normalbetriebs, im Grundlastfall sind es nur noch gut 20 %. Das hat zur Folge, dass auch das positive Potenzial im reduzierten Betrieb und bei Grundlast abnimmt. Das negative Potenzial steigt theoretisch an, da weniger Anlagen in Betrieb sind. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass die erzeugten Medien auch gespeichert werden müssen. Die Erhöhung des negativen Potenzials ist daher stark davon abhängig, ob Speicher vorhanden sind. Berücksichtigung in der Potenzialermittlung findet die Abhängigkeit von Typtag und Tageszeit somit durch eine Veränderung der mittleren Last in Abhängigkeit des Betriebszustands.

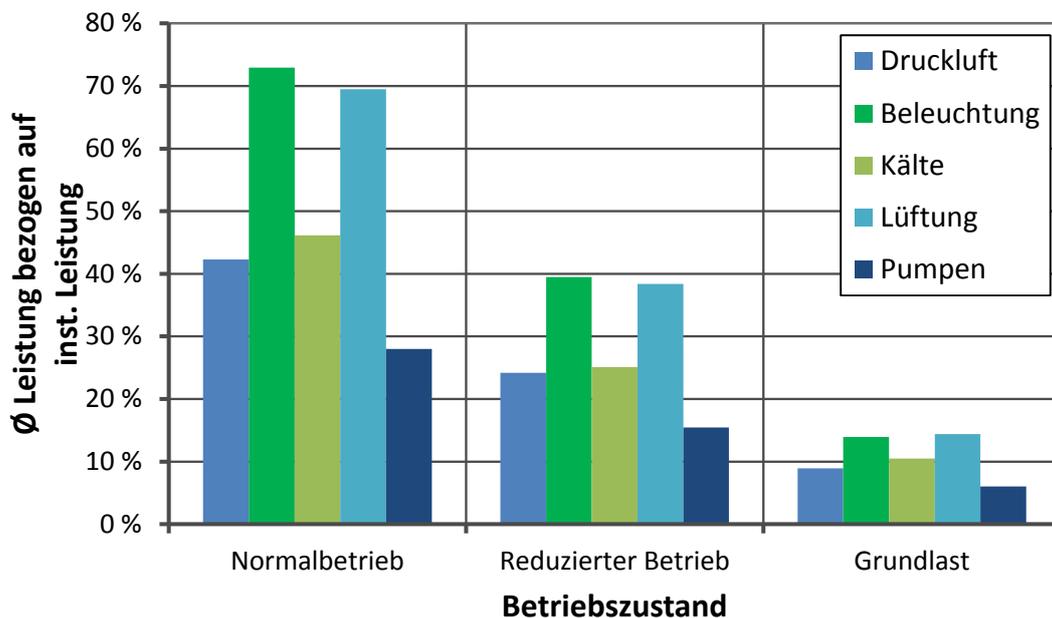
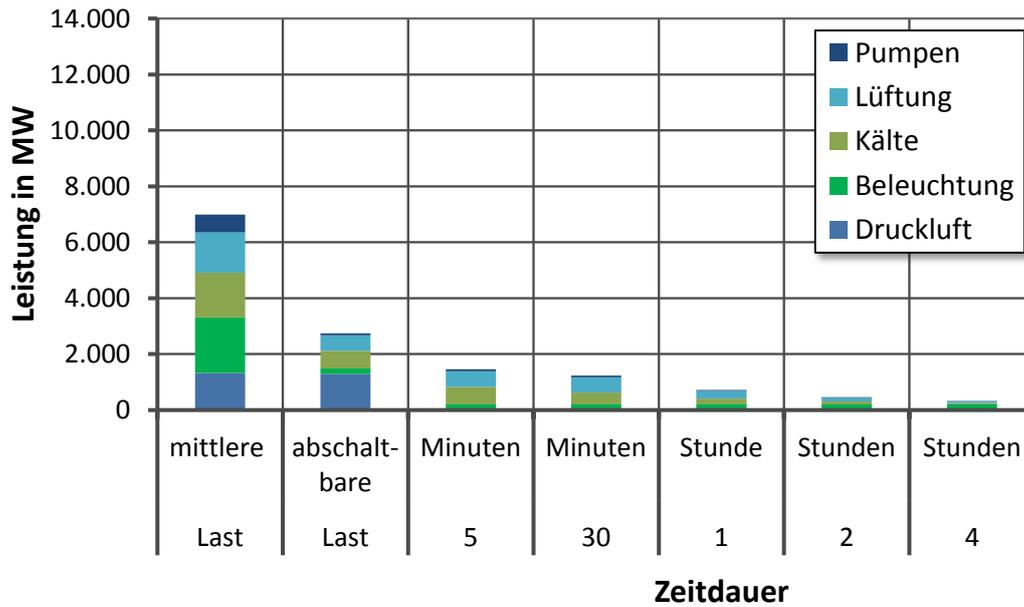


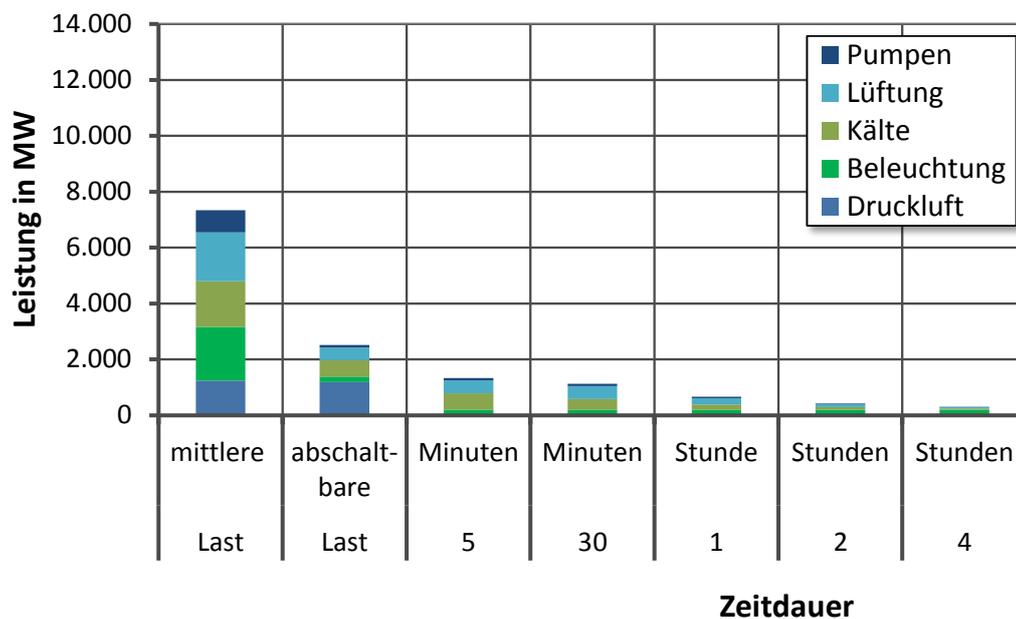
Abbildung 5-26: *Mittlere Last bezogen auf die installierte Leistung in Abhängigkeit des Betriebszustands je Querschnittstechnologie (dargestellt ist jeweils der Mittelwert über alle Branchen)*

Die Veränderung des positiven und negativen Lastflexibilisierungspotenzials in Abhängigkeit des Betriebszustands ist in **Abbildung 5-27** bis **Abbildung 5-30** dargestellt. Während das positive Potenzial im Normalbetrieb noch bei ca. 1.200 MW über eine Stunde Abruf lag, verringert es sich im reduzierten Betrieb auf ca. 720 MW und liegt im Grundlastfall nur noch bei 300 MW bei gleicher Abrufdauer. Für den Sonntagnachmittag liegt das abschaltbare Potenzial über eine Stunde bei etwa 660 MW.



©FIE BMWi-17#P MOS-DRInd_mbH_00228

Abbildung 5-27: Abschaltbare Leistung durch Flexibilisierung von Querschnittstechnologien in Deutschland (reduzierter Betrieb) in Abhängigkeit der Abrufdauer – akzeptiertes Potenzial / FFE-49 16/



©FIE BMWi-17#P MOS-DRInd_mbH_00236

Abbildung 5-28: Abschaltbare Leistung durch Flexibilisierung von Querschnittstechnologien in Deutschland (Sonntagnachmittag) in Abhängigkeit der Abrufdauer – akzeptiertes Potenzial

Das negative Lastflexibilisierungspotenzial reduziert sich von 630 MW im Normalbetrieb auf 470 MW über eine Stunde im reduzierten Betrieb. Im Grundlastfall liegt es bei einer Abrufdauer von einer Stunde etwa auf dem gleichen Niveau wie im reduzierten Betrieb. Für den Sonntagnachmittag steigt es auf ca. 530 MW an.

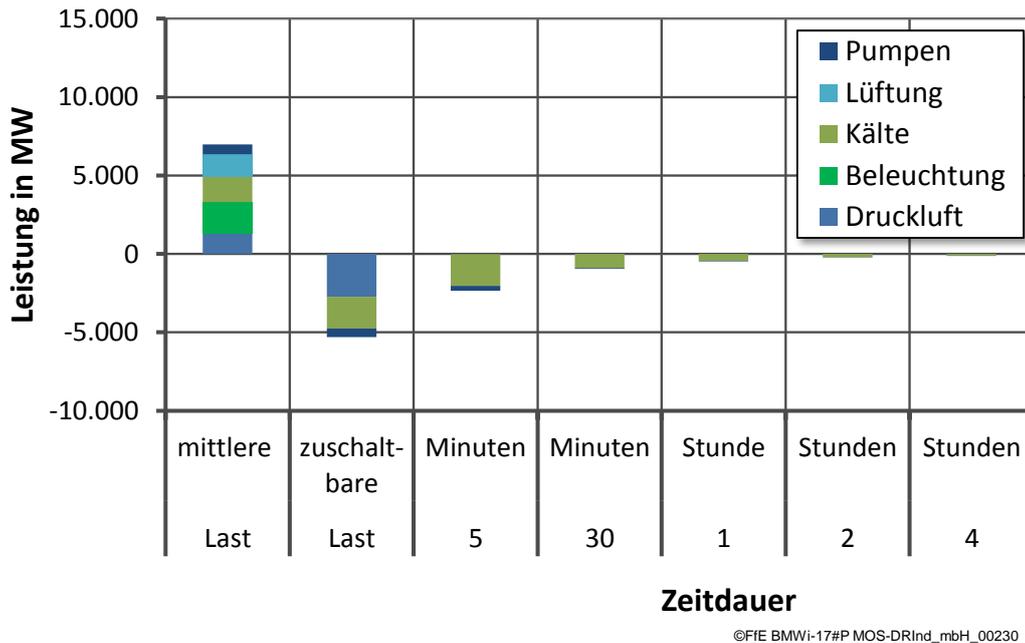


Abbildung 5-29: *Zuschaltbare Leistung durch Flexibilisierung von Querschnittstechnologien in Deutschland (reduzierter Betrieb) in Abhängigkeit der Abrufdauer – akzeptiertes Potenzial*

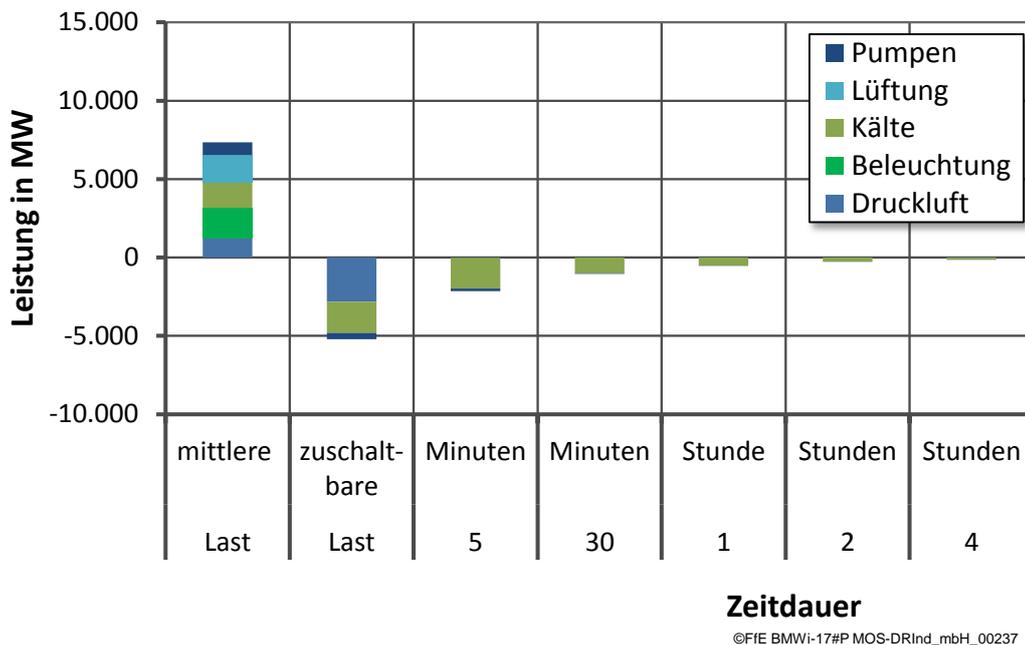


Abbildung 5-30: *Zuschaltbare Leistung durch Flexibilisierung von Querschnittstechnologien in Deutschland (Sonntagnachmittag) in Abhängigkeit der Abrufdauer – akzeptiertes Potenzial*

Auch saisonale Aspekte können sich auf das Potenzial auswirken. Beispielsweise bewirkt die im Sommer benötigte Klimatisierung eine Erhöhung des positiven Potenzials. Bei Lüftungsanlagen ist es in einigen Betrieben üblich, den Volumenstrom je nach Jahreszeit zu verändern. Allerdings wird häufig nur der Frischluftanteil angepasst, im Winter wird beispielsweise der Umluftanteil erhöht. Dies wirkt sich jedoch nicht in

nennenswertem Maß auf die Leistungsaufnahme der Ventilatoren aus. Die saisonale Beeinflussung wird, wie oben erwähnt, bei der Kälteerzeugung zur Klimatisierung durch einen saisonalen Faktor berücksichtigt. Die Leistungsaufnahme von Druckluftkompressoren unterliegt üblicherweise keinen saisonalen Schwankungen, sie ist lediglich abhängig von der Produktionsauslastung. Eine Veränderung der Leistungsaufnahme ist beispielsweise in der Branche Steine und Erden erkennbar, da dort in den Wintermonaten nicht oder nur in geringem Umfang produziert wird. Dies wirkt sich auch in sehr geringem Umfang auf die Querschnittstechnologien aus. Die Leistungsaufnahme der Beleuchtung sowie der Pumpen ist in den meisten Fällen ebenfalls unabhängig von saisonalen Einflüssen. Einzig die Beleuchtung von Außenanlagen kann bei dämmerungsabhängiger Schaltung unterschiedlich lange Betriebszeiten aufweisen. Pumpen, welche im Prozess selbst eingesetzt werden, weisen keine saisonale Abhängigkeit auf. Zur Klimatisierung vorhandene Kühlkreislaufpumpen oder Heizungsumwälzpumpen zur Raumtemperierung unterliegen zwar einer saisonalen Abhängigkeit, jedoch nehmen vor allem Heizungsumwälzpumpen nur eine untergeordnete Bedeutung hinsichtlich der Leistungsaufnahme ein, so dass dieser Aspekt vernachlässigbar ist.

5.2.4 Räumliche Verfügbarkeit

Abbildung 5-31 und **Abbildung 5-32** zeigen, basierend auf /FFE-49 16/, die maximal abschaltbare sowie die maximal zuschaltbare Leistung der Querschnittstechnologien je Branche je Landkreis. Beide maximalen Potenziale werden an einem Werktag erreicht. Es ist ersichtlich, dass die größten positiven wie auch negativen Potenziale in Nordrhein-Westfalen (ca. 320 MW positives und 170 MW negatives Potenzial) und Bayern (ca. 180 MW positives und 100 MW negatives Potenzial) liegen. Die Potenziale korrelieren stark mit dem industriellen Stromverbrauch auf regionaler Ebene. Deutlich ersichtlich ist das hohe positive Potenzial der Branchen Chemie, (Nichteisen-)Metallerzeugung und -bearbeitung, Maschinen- und Fahrzeugbau sowie der Gruppe der sonstigen Wirtschaftszweige. Das negative Potenzial ist überwiegend in den Branchen Chemie und Ernährung und Tabak vorhanden. Dort ist die Lastflexibilisierung größtenteils auf das Zuschalten bzw. die Lasterhöhung der Kälteerzeugung zurückzuführen.

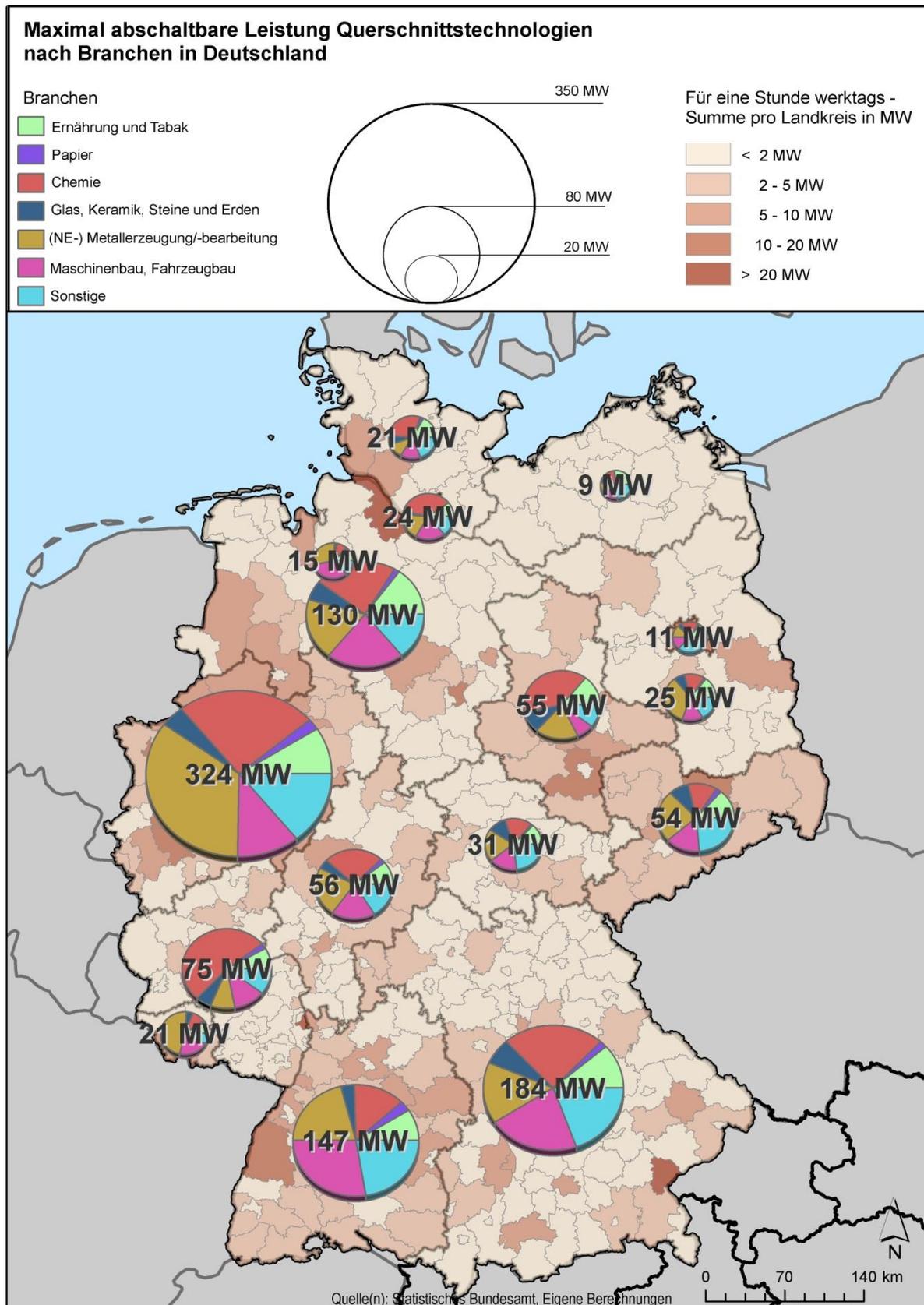


Abbildung 5-31: *Maximal abschaltbares Potenzial bei Querschnittstechnologien über eine Stunde am Werktag / FFE-49 16/*

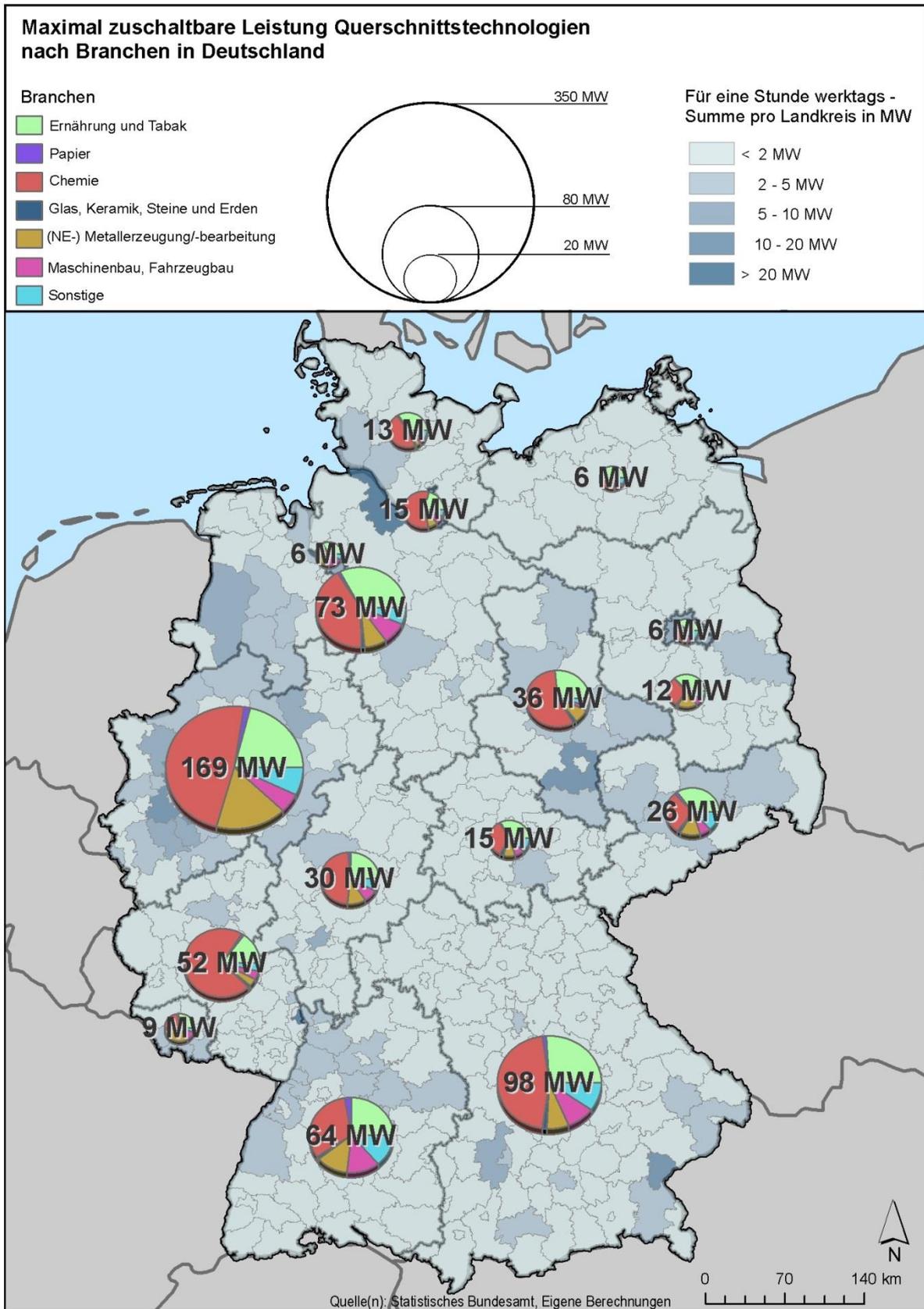


Abbildung 5-32: *Maximal zuschaltbares Potenzial bei Querschnittstechnologien über eine Stunde am Werktag*

5.2.5 Kosten

In **Abbildung 5-33** ist dargestellt, welche Kostenpositionen aus Sicht der befragten Unternehmen für die Erschließung der Flexibilitäten anfallen. Diese Ergebnisse werden bereits in /FFE-49 16/ und /FFE-27 13/ dargestellt. In den meisten Fällen muss Kommunikationstechnologie nachgerüstet werden. Üblicherweise wird hier eine Kommunikationsbox installiert, welche die Verbindung mit einem externen Vermarkter herstellt. Zudem sind häufig Anpassungen in der Steuerungs- und Regelungstechnik erforderlich, um die Anlagen von extern ansteuern zu können.

Eine Schulung von Mitarbeitern beinhaltet zum einen die Auswahl flexibilisierbarer Anlagen, zum anderen die Entwicklung einer Vermarktungsstrategie. Auch die rechtliche Überprüfung von Vertragsinhalten kann anfangs zu zusätzlichem Personalaufwand führen. Sofern keine übergeordnete Steuerung, wie beispielsweise eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS), vorhanden ist, kann es nötig sein, diese nachzurüsten.

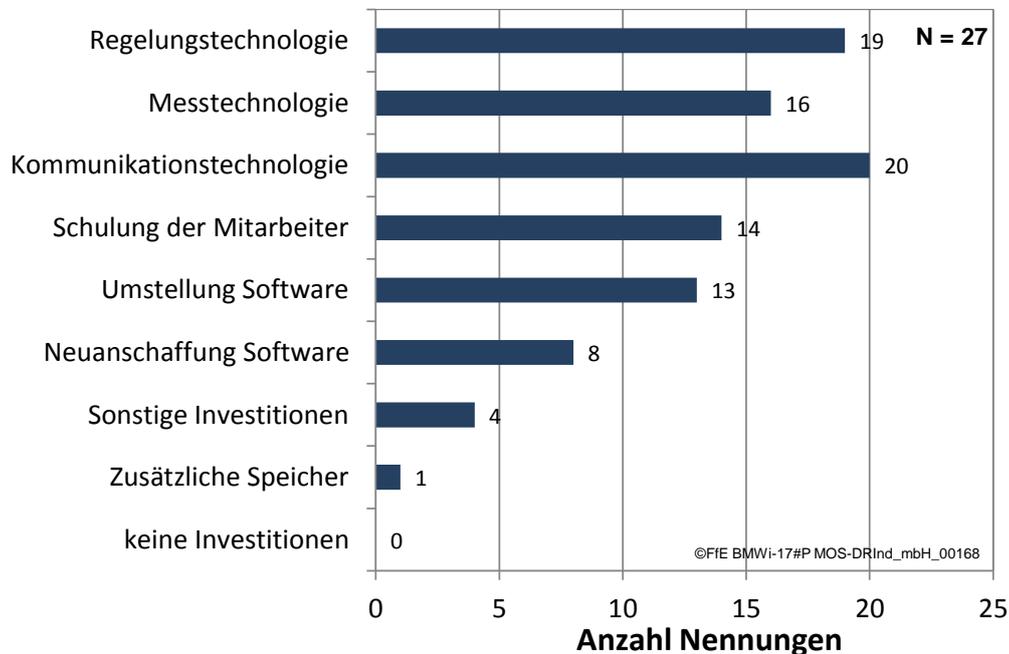


Abbildung 5-33: *Investitionen für die Erschließung der Flexibilität von Querschnittstechnologien (Befragung von Unternehmen mit stromintensiven Prozessen und Querschnittstechnologien) /FFE-49 16/*

Die Höhe der von den Befragten angegebenen Kosten für die Erschließung der Flexibilitäten zeigt **Abbildung 5-34**. Der Großteil der Befragten nannte Gesamtinvestitionen zwischen 4.000 und 6.000 €. Nur in wenigen Fällen lagen diese bei mehr als 10.000 €.

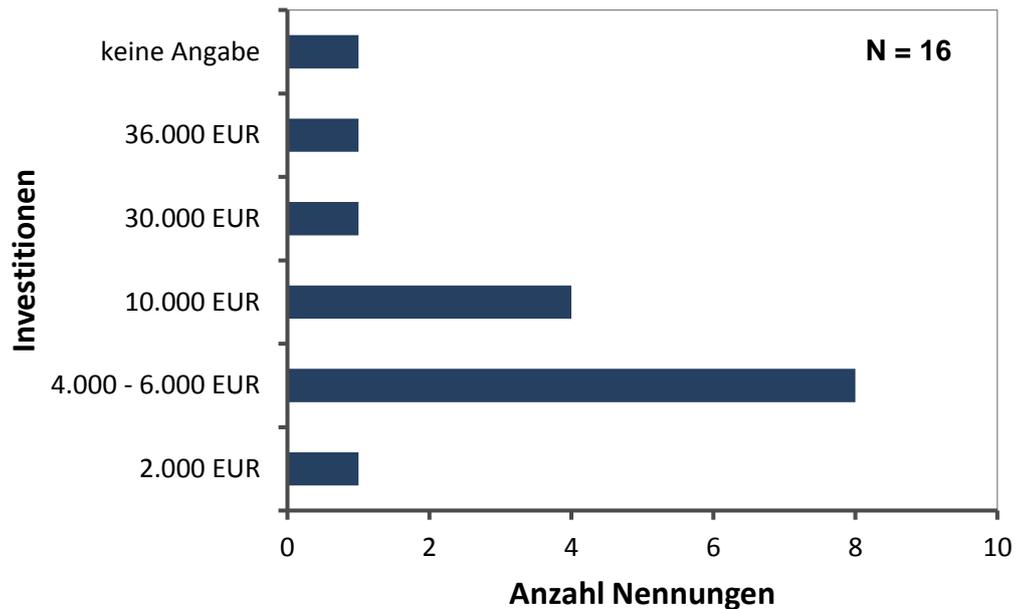


Abbildung 5-34: Abschätzung der Investitionen für die Erschließung /FFE-27 13/

Unter Berücksichtigung der Anzahl an flexibilisierbaren Anlagen sowie deren flexibilisierbarer Leistung liegen die spezifischen Investitionen zwischen 1 und 9 €/kW, wie es nachfolgend in **Abbildung 5-35** ersichtlich ist. Der Mittelwert beläuft sich auf etwa 6,2 €/kW, wobei ein einzelner Ausreißer von knapp 18 €/kW wiederum aufgrund einer unterschiedlichen Bilanzgrenze im Unternehmen nicht in die Mittelwertbildung eingeht.

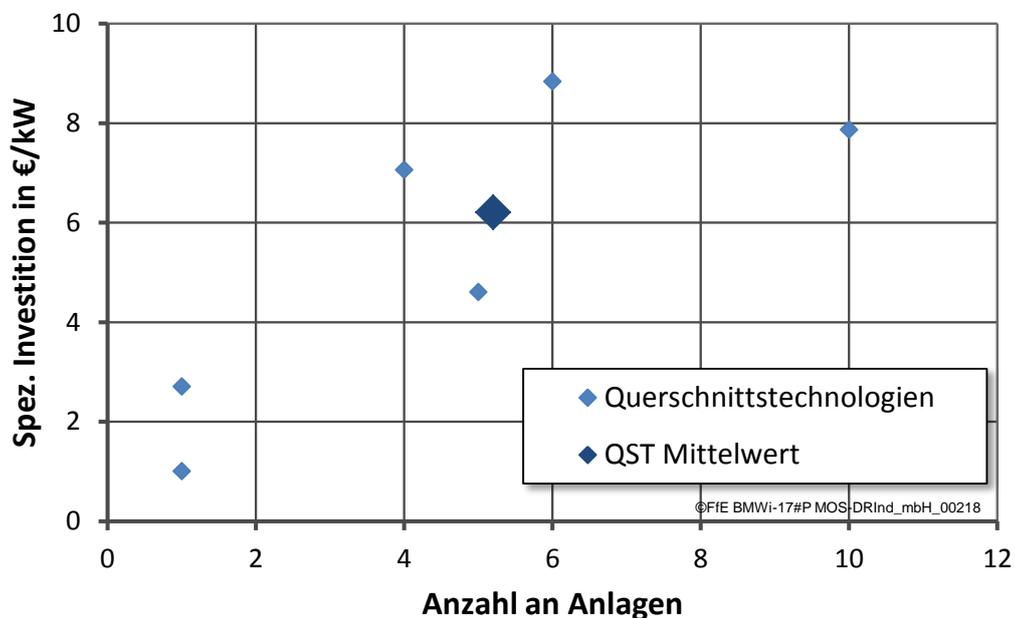


Abbildung 5-35: Ausschnitt aus den spezifischen Investitionen für die Erschließung der Flexibilität von Querschnittstechnologien in Abhängigkeit der Anzahl an Anlagen /FFE-49 16/

Die Angaben der Befragten zu den fixen Betriebskosten, welche überwiegend aus Personalkosten bestehen, sind in **Abbildung 5-36** dargestellt. Die meisten Unternehmen gaben eine Spannweite von insgesamt 2.000 bis 5.000 € pro Jahr an fixen Betriebskosten an. Nur in wenigen Betrieben liegen die Personalkosten in Einzelfällen deutlich höher. Im Mittel belaufen sich die spezifischen fixen Betriebskosten auf etwa 0,45 €/kW·a).

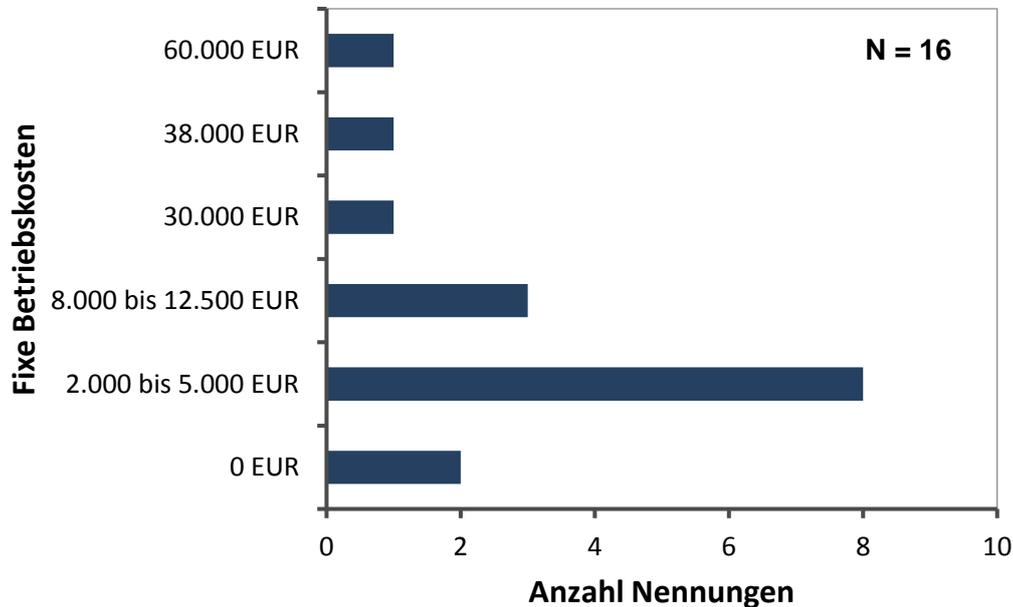


Abbildung 5-36: *Quantifizierung der jährlichen fixen Betriebskosten (vor allem Personalkosten) /FFE-27 13/*

Die variablen Kosten im Falle eines Abrufs wurden in den Befragungen überwiegend als sehr gering bis nicht vorhanden eingestuft. In vielen Fällen wird nicht bemerkt, dass ein Abruf stattgefunden hat, da die Produktion keine Einschränkungen erfährt.

Wechselwirkungen zwischen Flexibilität und Energieeffizienz

Analog zur Vorgehensweise bei den stromintensiven Prozessen wird untersucht, ob die Flexibilisierung von Querschnittstechnologien einen Einfluss auf deren Energieeffizienz hat. Falls dem so ist, kann dies einen Einfluss auf die variablen Kosten haben. Auch hier werden die Ergebnisse der theoretischen Analyse von /FFE-26 16/ zusammengefasst.

Die typische Betriebsweise der Querschnittstechnologien sowie der übliche Betriebszustand bei Vorhaltung und Abruf sind in **Tabelle 5-16** zusammengefasst. Häufig sind Druckluftkompressoren als Last-/Leerlauf-Maschinen ausgeführt, daher befinden sich diese überwiegend im Volllastbetrieb. Auch Kältemaschinen bestehen häufig aus einem oder mehreren Verdichtern, die stufenweise zu- und abgeschaltet werden. Eine flexible Betriebsweise ist bei Pumpen, welche beispielsweise Behälter auf einem konstanten Füllstand halten, möglich. Ventilatoren von Lüftungsanlagen sowie Beleuchtungssysteme werden je nach Bedarf unter Voll- oder Teillast betrieben. Beleuchtungssysteme sind überwiegend mit Leuchtstoffröhren oder LED ausgestattet. In diesem Fall kann die Reduzierung der Leistungsaufnahme der Leuchtmittel beim Dimmen annähernd linear angesetzt werden. Daher ist auch hier durch die Flexibilisierung kein Einfluss auf die Energieeffizienz zu erwarten.

Da die Flexibilisierung von Kältemaschinen mit einer reinen Zu- oder Abschaltung von Anlagen verbunden ist, wird die Effizienz an dieser Stelle nahezu nicht beeinflusst.

Tabelle 5-16: *Typische Betriebsweise von Querschnittstechnologien und Änderung der Betriebsweise bei Vermarktung von Flexibilität / FFE-26 16/*

Anlage je Querschnittstechnologie	Typischer Betriebsfall	Theoretische Vermarktungsart	Vorhaltung (typ. Betriebsfall)	Abruf (typ. Betriebsfall)	Vorhaltezeit in h/a
Druckluftkompressor	Voll- / Teillast	+ / - Leistung	Volllast	Teillast	6.000
Kältemaschine	Voll- / Teillast	+ / - Leistung	Volllast	Abschaltung	6.000
Pumpe	Volllast	+ / - Leistung	Volllast	Teillast	6.000
Ventilator (Lüftungsanlage)	Volllast	+ Leistung	Volllast	Teillast	6.000
Beleuchtungssystem	Volllast	+ Leistung	Volllast	Teillast	6.000

+ = positive

- = negative

Tabelle 5-17 beinhaltet den Volumenstrom verschiedener Medien sowie die Leistungsaufnahme beispielhafter Anlagen je Querschnittstechnologie für verschiedene Betriebsfälle. Neben dem typischen Betriebsfall ist auch der veränderte Arbeitspunkt dargestellt, welcher bei der Vorhaltung oder dem Abruf von Flexibilität eingenommen wird. Bei der Ermittlung der elektrischen Leistungsaufnahme der verschiedenen Arbeitspunkte wurden stets der Wirkungsgrad des Elektromotors, der Kraftübertragung sowie der Technologie selbst berücksichtigt. Allen dargestellten Querschnittstechnologien gemein ist eine integrierte Drehzahlregelung. Daher geht die Veränderung der Leistungsaufnahme im Teillastbetrieb bei einer Drehzahlregelung ebenfalls in die Berechnung ein.

Der durch Vorhaltung oder Abruf veränderte Arbeitspunkt wird zum besseren Verständnis am Beispiel eines Druckluftkompressors erläutert:

Für die Versorgung verschiedener Produktionsanlagen mit Druckluft ist ein drehzahl geregelter Kompressor installiert. Dieser liefert im typischen Betriebsfall ca. 70 % des maximal möglichen Volumenstroms. Die Vorhaltung positiver Leistung entspricht dem typischen Betriebsfall, erst bei einem Abruf wird ein Produktionsschritt einer Anlage abgeschaltet, wodurch sich die erzeugte Druckluftmenge um etwa ein Drittel reduziert. Das entspricht einem neuen Volumenstrom von 47 %, bezogen auf den maximalen Volumenstrom, und einer Leistungsaufnahme von 49 %, bezogen auf die Nennleistung. Die Erhöhung der spezifischen Leistungsaufnahme ist darauf zurück zu führen, dass sich der Arbeitspunkt des Verdichterblocks nicht mehr im Optimum befindet. Bei Vermarktung negativer Leistung wird der verschiebbare Produktionsschritt erst bei einem Abruf der Flexibilität begonnen, während der Vorhaltung ist dieser nicht aktiv.

Tabelle 5-17: *Volumenstrom und Leistungsaufnahme im typischen Betriebsfall sowie bei Lastflexibilisierung ausgewählter Querschnittstechnologien*

	Ventilator	Pumpe	Druckluftkompressor
Volumenstrom im typischen Betriebsfall	100 %	100 %	70 %
Leistungsaufnahme im typischen Betriebsfall	100 %	100 %	70 %
Volumenstrom bei Flexibilisierung	50 %	67 %	47 %
Leistungsaufnahme bei Flexibilisierung	17 %	30 %	49 %

Die Ergebnisse der theoretischen Betrachtung sind in **Abbildung 5-37** und **Abbildung 5-38** zusammengefasst. Die Vorhaltezeit wurde mit 4.000 bis 8.000 Stunden pro Jahr angesetzt.

Die Vermarktung positiver Leistung hat bei einer geringen Anzahl an jährlichen Abrufstunden nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Energieeffizienz der einzelnen Querschnittstechnologien. Erhöhen sich die Stunden jedoch deutlich, hat dies auch eine Erhöhung der Energieeffizienz bei Ventilatoren und Pumpen von im Mittel 6 bis 7 % zur Folge. Die Energieeffizienzsteigerung kann eindeutig auf die deutlich geringere Leistungsaufnahme des Elektromotors im Teillastbetrieb zurückgeführt werden. Durch den Frequenzumrichter wird die Drehzahl im Teillastfall bzw. bei Abruf reduziert. Die Leistungsaufnahme ändert sich in dritter Potenz zum Volumenstrom, was bedeutet, dass bei beispielsweise halbiertem Volumenstrom nur noch etwa 12,5 % der maximalen Leistung benötigt werden. Je häufiger also ein Abruf an positiver Leistung und damit ein Teillastbetrieb erfolgt, desto effizienter kann eine definierte Menge eines Mediums transportiert werden. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass dies eine rein theoretische Betrachtung ist. Kann die veränderte Fahrweise ganzjährig beibehalten werden, kommt dies einer Effizienzmaßnahme gleich. Diese werden jedoch für eine Flexibilitätsvermarktung, wie bereits erläutert, ausgeschlossen.

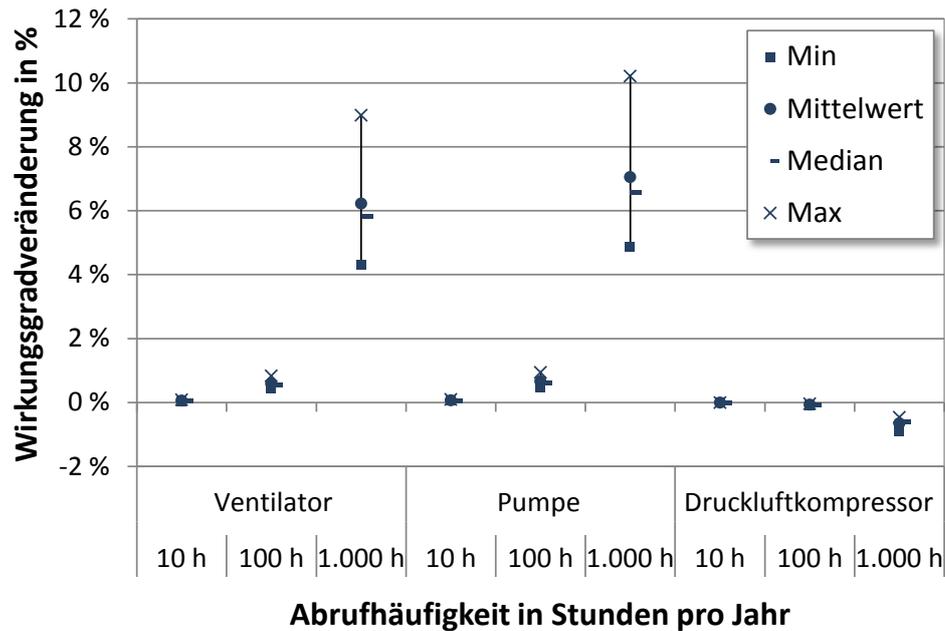


Abbildung 5-37: *Veränderung des Gesamtwirkungsgrades von Ventilatoren, Pumpen und Druckluftkompressoren bei Vermarktung positiver Leistung*

Der Fall der negativen Leistungserbringung ist lediglich für Pumpen und Druckluftkompressoren dargestellt, da bei Ventilatoren von Lüftungsanlagen üblicherweise keine Speichermöglichkeit besteht. Während die Ergebnisse bei Druckluftkompressoren in einem Bereich von unter 10 % Energieeffizienzverschlechterung liegen, zeigt die flexible Betriebsweise bei Pumpen eine deutliche Energieeffizienzsteigerung. Auch hier ist die Ursache wiederum die Drehzahlregelung. Zur Vorhaltung negativer Leistung wird der Volumenstrom abgesenkt, was zu einer deutlich geringeren Leistungsaufnahme führt. Bei einem Abruf wird der Volumenstrom auf den Ausgangszustand erhöht, dabei steigt auch die Leistungsaufnahme mit der dritten Potenz des Volumenstroms. Je höher bei Pumpen die Anzahl an jährlichen Abrufstunden und somit die Volllastbetriebszeit ist, desto geringer ist die Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades.

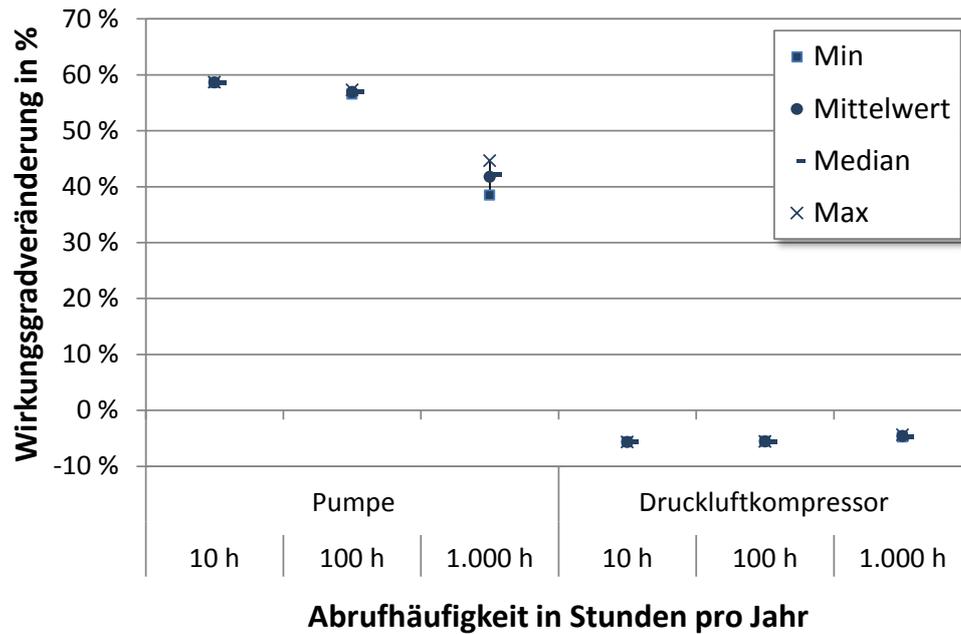


Abbildung 5-38: *Veränderung des Gesamtwirkungsgrades von Pumpen und Druckluftkompressoren bei Vermarktung negativer Leistung*

In Summe zeigt sich, dass die Auswirkungen der Flexibilisierung auf die Energieeffizienz im realen Betriebsfall über ein Jahr betrachtet nur sehr gering sind.

Die Verschlechterung des Wirkungsgrades bei einem einzelnen Abruf hat jedoch variable Kosten zur Folge, welche bei der Vermarktung berücksichtigt werden müssen. In **Tabelle 5-18** sind die Wirkungsgradveränderung sowie die variablen Kosten¹⁹ für einen Abruf bei der Flexibilisierung von Querschnittstechnologien dargestellt. Der Abruf positiver Leistung bei einem Druckluftkompressor führt zu einer Wirkungsgradverschlechterung um 3,7 %, was variablen Kosten von 18,8 €/MWh entspricht. Ein Abruf negativer Leistung verschlechtert den Wirkungsgrad um 6,0 %, was 32,8 €/MWh ausmacht. Wird aus Flexibilitätsgründen die Last einer Pumpe in der Vorhaltung oder bei Abruf reduziert, ergibt sich eine Wirkungsgradverbesserung im Vergleich zum ursprünglichen Betriebszustand. Allerdings wird darauf hingewiesen, dass die hier ausgegebenen Werte auf einer theoretischen Betrachtung basieren. Eine Volumenstromänderung von Pumpen aus Gründen der Flexibilisierung ist nur selten der Fall. Häufiger wird die Zu- oder Abschaltung von Pumpen in Abhängigkeit des Speicherfüllstandes flexibel betrieben. In diesem Fall entsteht keine Wirkungsgradveränderung.

Auch hier beeinflusst eine zusätzliche Variation der Vorhaltezeit die Ergebnisse in den meisten Fällen nicht. Eine wesentliche Erhöhung der variablen Kosten ergibt sich bei dem Abruf negativer Leistung für Druckluftkompressoren. Der Einfluss des spezifisch höheren Energieverbrauchs des geringen Teillastbetriebs erhöht sich mit steigender Vorhaltezeit. Bei einer Vorhaltezeit von 1.000 Stunden und einem nur einstündigen Abruf ergeben sich variable Kosten bei Druckluftkompressoren von ca. 32.800 €/MWh.

¹⁹ Der Strompreis wird überschlägig mit 150 €/MWh angesetzt.

Tabelle 5-18: *Variable Kosten von Querschnittstechnologien durch Wirkungsgradverschlechterung bei einem Abruf (Produktionsmenge entspricht der typischen Produktionsmenge einer Stunde)*

Anlage je Querschnittstechnologie	Abruf positiver Leistung		Abruf negativer Leistung	
	Wirkungsgradveränderung in %	Variable Kosten in €/MWh	Wirkungsgradveränderung in %	Variable Kosten in €/MWh
Druckluftkompressor	-3,7 %	18,8	-6,0 %	32,8
Kältemaschine	Entfällt	Entfällt	Entfällt	Entfällt
Pumpe	37,0 %	Entfällt	37,0 %	Entfällt
Ventilator (Lüftungsanlage)	83,0 %	Entfällt	Entfällt	Entfällt
Beleuchtungssystem	Entfällt	Entfällt	Entfällt	Entfällt

5.2.6 Zukünftige Entwicklung

Die Faktoren, welche die zukünftige Entwicklung des Potenzials sowie der Kosten beeinflussen, wurden bereits in Kapitel 4.2.6 herausgearbeitet. Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der möglichen zukünftigen Entwicklung bis zum Jahr 2030 dargestellt.

Beeinflussung des akzeptierten Potenzials

Im ersten Schritt wird die Wirkung einzelner Energieeffizienzmaßnahmen je Querschnittstechnologie auf den industriellen Stromverbrauch quantifiziert. In /FFE-71 13/ wurde hierzu bereits eine detaillierte Analyse von Maßnahmen und deren Einsparpotenzial bis zum Jahr 2020 durchgeführt (vgl. **Tabelle 5-19**). Je Querschnittstechnologie wurden hier anhand von drei Kriterien fünf Maßnahmen ausgewählt, welche die höchste Umsetzungswahrscheinlichkeit aufweisen. Diese führen zu einem um etwa 15 bis 30 % geringeren Energieverbrauch je Querschnittstechnologie, wobei bereits ein Anwendungsfaktor für die Energieeffizienzmaßnahmen berücksichtigt wird. Dieser schließt auch die bisherige Durchdringungsrate der einzelnen Maßnahmen ein und beinhaltet zudem eine mögliche Nichtrealisierung von Maßnahmen aufgrund technischer Hemmnisse, wie z.B. erhöhtem Platzbedarf.

Tabelle 5-19: *Stromverbrauch nach Realisierung verschiedener Energieeffizienzmaßnahmen je Querschnittstechnologie bis 2020 nach /FFE-71 13/*

	Maßnahme 1	Maßnahme 2	Maßnahme 3	Maßnahme 4	Maßnahme 5
Beleuchtung	92 %	84 %	78 %	76 %	71 %
Druckluft	84 %	83 %	81 %	80 %	73 %
Fördertechnik	97 %	92 %	87 %	86 %	84 %
Kälteanlagen	96 %	93 %	91 %	85 %	76 %
Lüftung	97 %	95 %	94 %	86 %	85 %
Pumpen	98 %	95 %	94 %	92 %	83 %

Eine Veränderung der Höhe des Lastflexibilisierungspotenzials findet statt, wenn die Maßnahme Auswirkungen auf die Nennleistung hat. Daher wird die Wirkung der

Einzelmaßnahmen auf die maximale Leistungsaufnahme einer Anlage geprüft. Ein kleiner dimensionierter Motor zum Antrieb einer Pumpe bewirkt eine geringere maximale Last. Dies führt wiederum zu einer niedrigeren mittleren Last, wodurch sich auch das positive Potenzial reduziert. Gleichzeitig sinkt auch das negative Potenzial für die Lasterhöhung, da die Motordimensionierung besser auf den tatsächlichen Arbeitspunkt abgestimmt ist. **Tabelle 5-20** zeigt die Auswirkung der einzelnen Maßnahmen auf die Nennleistung. Gut ein Drittel der Maßnahmen vermindert demnach die Nennleistung, alle anderen Maßnahmen haben keinen Einfluss auf die Nennleistung.

Tabelle 5-20: *Einfluss von Energieeffizienzmaßnahmen auf die maximale Leistungsaufnahme einer unregelten Anlage /FFE-71 13/*

Ungeregelte Anlage					
Nr.	Maßnahme	P _{Nenn}	Nr.	Maßnahme	P _{Nenn}
Beleuchtung			Druckluftanlagen		
1	Einsatz neuer Leuchten	-	1	Reduktion von Leckagen	0
2	Einsatz elektronischer Vorschaltgeräte	-	2	Austausch alter Kupplungen	0
3	Einsatz neuer Leuchtmittel	-	3	Austausch von Filtern und regelmäßige Wartung	-
4	Nutzung von Präsenzmeldern	0	4	Anpassung der Druckluftreinheit	0
5	Tageslichtabhängige Steuerung	0	5	Drehzahlregelung	0
Fördertechnik			Kälteanlagen		
1	Austausch von Keilriemen	-	1	Absenkung der Verflüssigertemperatur	-
2	Drehzahlregelung	0	2	Reinigen der Wärmetauscher	0
3	Einsatz von Gleitbelägen und Rollenunterstützung	-	3	Abtausteuern	0
4	Vermeidung von Überdimensionierung	-	4	Drehzahlregelung	0
5	Einsatz hocheffizienter Motoren	-	5	Einsatz einer Absorptionskältemaschine	-
Lüftungsanlagen			Pumpen		
1	Nachspannen bzw. Wartung von Keilriemen	-	1	Regelmäßige Wartung	-
2	Regelmäßiges Schmieren des Getriebes	-	2	Einsatz von breiten, flachen Wasserspeichern	-
3	Anpassung des Volumenstroms	-	3	Einsatz von an den Bedarf angepassten Pumpen	-
4	Drehzahlregelung	0	4	Einsatz hocheffizienter Motoren	-
5	Einsatz hocheffizienter Motoren	-	5	Drehzahlregelung	0

- = Reduzierung der Nennleistung

0 = kein Einfluss auf Nennleistung

Im nächsten Schritt wird quantifiziert, wie sich der zukünftige industrielle Stromverbrauch aufgrund der Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen entwickelt. In diesem Zusammenhang wird bewertet, welchen Einfluss dieser Umstand auf das zukünftige Lastflexibilisierungspotenzial hat. Die Fortschreibung des Stromverbrauchs bis 2030 erfolgt in Anlehnung an /BMU-11 11/ und /ISI-03 13/. Durch Verknüpfung der Entwicklung des Stromverbrauchs mit dem Einfluss von Energieeffizienzmaßnahmen auf das Lastflexibilisierungspotenzial ergibt sich die in **Tabelle 5-21** dargestellte

Veränderung des zukünftigen Lastflexibilisierungspotenzials von Querschnittstechnologien.

Tabelle 5-21: *Veränderung des Lastflexibilisierungspotenzials durch Energieeffizienzmaßnahmen bis 2030 in /FFE-49 16/ nach /FFE-71 13/, /BMU-11 11/ und /ISI-03 13/*

Veränderung positives Potenzial (2012 = 100 %)		Jahr		
		2020	2025	2030
QST	Druckluft	73 %	69 %	65 %
	Beleuchtung	101 %	101 %	101 %
	Kälte	76 %	71 %	67 %
	Lüftung	85 %	82 %	78 %
	Pumpen	83 %	79 %	76 %
Veränderung negatives Potenzial (2012 = 100 %)		2020	2025	2030
QST	Druckluft	145 %	152 %	158 %
	Beleuchtung	128 %	132 %	137 %
	Kälte	95 %	94 %	93 %
	Lüftung	120 %	125 %	129 %
	Pumpen	103 %	103 %	104 %

Es zeigt sich, dass das positive Potenzial bei allen Technologien außer der Beleuchtung rückläufig ist. Im Gegensatz dazu erhöht sich das negative Potenzial in allen Bereichen außer der Kälteerzeugung. Die Gründe hierfür sind folgende:

Der Rückgang des positiven Potenzials ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass überdimensionierte Anlagen bei Ersatz besser an den tatsächlichen Bedarf angepasst und Maschinen mit einer Drehzahlregelung ausgestattet werden. Die Drehzahlregelung führt zu einem optimierten Arbeitspunkt bei geringerer Leistungsaufnahme, was wiederum das positive Potenzial reduziert.

Das negative Potenzial erhöht sich, da bisher nicht regelbare Anlagen umgerüstet und somit besser an den Bedarf angepasst werden können. Ein Großteil dieser Maschinen war bisher nicht flexibilisierbar und kann durch die nachgerüstete Regelung (meist Drehzahlregelung) nun als Flexibilität genutzt werden. Hinzu kommt, dass sich die mittlere Leistungsaufnahme von Bestandsanlagen durch Energieeffizienzmaßnahmen häufig etwas reduziert. Da jedoch die Nennleistung gleich bleibt, steigt das negative Potenzial.

Ein Technologie- oder Medienwechsel bei Querschnittstechnologien wird im Rahmen der Arbeit nicht betrachtet, da die verwendeten Technologien bereits den Stand der Technik abbilden und hier keine großen Veränderungen zu erwarten sind. Auch werden keine Änderungen regulatorischer Rahmenbedingungen untersucht, da hierzu in den Szenarien nach /BMU-11 11/ bereits Annahmen getroffen wurden.

In der bisherigen zukünftigen Entwicklung wurde die Erweiterung der Flexibilität nicht berücksichtigt. In Rahmen des Projektes DSM Bayern wurde in diesem Zusammenhang unter anderem untersucht, weshalb vorhandene Flexibilitäten aktuell nicht genutzt werden /DENA-01 16/. Als Hemmnisse nennen die Verantwortlichen in /DENA-01 16/

vor allem fehlende Kenntnisse im Hinblick auf die Flexibilisierung von industriellen Anlagen. In /DENA-01 16/ wird vorgeschlagen, diese Hemmnisse durch Infokampagnen, die Implementierung einer Flexibilitätsprüfung im Rahmen von Energieberatungen oder die Bildung von Netzwerken mit dem Fokus der Lastflexibilisierung abzubauen bzw. zu reduzieren. Dieser Aspekt sowie die Tatsache, dass zukünftig mehr Anlagen mit Mess- und Regelungstechnik ausgerüstet werden, führen zu einem besseren Verständnis des einzelnen Prozesses im Unternehmen. Künftig werden deshalb mehr Anlagen für eine Lastflexibilisierung zur Verfügung stehen. Dies wird in der Potenzialermittlung durch einen zusätzlichen Flexibilitäts-Anwendungsfaktor abgebildet. Der Faktor beruht auf einer Expertenschätzung und dient lediglich dazu, eine Tendenz für die zukünftige Entwicklung zu geben. Je nach Querschnittstechnologie und Branchengruppe bleibt das Potenzial auf gleichem Niveau oder erhöht sich um bis zu 40 %.

Insgesamt betrachtet reduziert sich das positive Potenzial in 2020 und 2025 leicht, steigt aber bis 2030 wieder auf das Niveau von 2012 an (vgl. **Tabelle 5-22**). Das negative Potenzial erhöht sich bis 2030 um knapp 60 MW auf ca. 690 MW.

Tabelle 5-22: *Lastflexibilisierungspotenzial von Querschnittstechnologien in Deutschland bis 2030 (Normalbetrieb)*

	2012	2020	2025	2030
Pos. Lastflexibilisierungspotenzial in MW	1.183	1.106	1.148	1.185
Neg. Lastflexibilisierungspotenzial in MW	629	634	660	686

Für Querschnittstechnologien wird bereits in /FFE-06 15/ untersucht, in welchen Bereichen möglicherweise eine Elektrifizierung bzw. Hybridisierung der Wärmeerzeugung stattfinden kann. Diese setzt sich zusammen aus der Raumwärmeerzeugung sowie der Warmwasserbereitung. In Summe belief sich der Endenergieverbrauch für die Raumwärmeerzeugung und die Warmwasserbereitung im Jahr 2012 auf etwa 70 TWh, davon entfielen etwa 9 TWh auf Erneuerbare /ISI-03 13/. Aus technischer Sicht ist es prinzipiell möglich, die gesamte industrielle Raumwärme- und Warmwasserbereitung ebenfalls zu hybridisieren und somit zu elektrifizieren. Zum Einsatz kommen hierfür Elektro- und Elektrodenkessel, elektrische Heizstäbe und Wärmepumpen. Die zusätzliche Leistung kann aufgrund der bivalenten Erzeugung auch als Flexibilität genutzt werden. Das Lastflexibilisierungspotenzial erhöht sich nach /FFE-06 15/ bei Einsatz von elektrischen Heizstäben, Elektro- und Elektrodenkesseln um etwa 53 TWh/a bzw. bei ausschließlicher Einsatz von Wärmepumpen um etwa 18 TWh/a (vgl. **Abbildung 5-39**). Das entspricht einer Lasterhöhung um etwa 15 GW bzw. 5 GW (inkl. Wärmepumpen). Dieses Potenzial steht jedoch überwiegend in den Wintermonaten sowie der Übergangszeit zur Verfügung /FFE-06 15/.

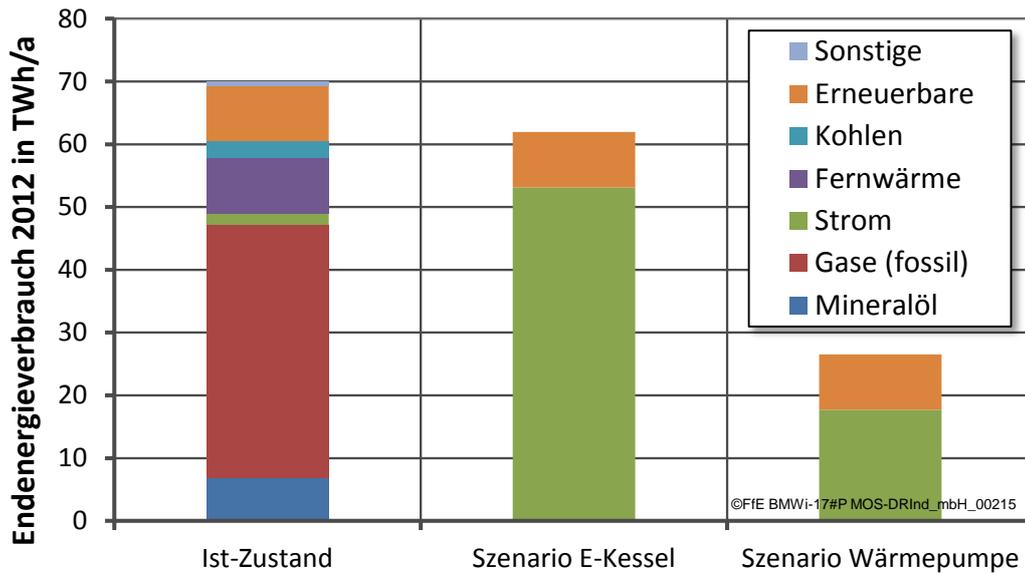


Abbildung 5-39: *Endenergieverbrauch zur Raumwärme- und Warmwassererzeugung im Ist-Zustand und durch Elektrifizierung bzw. Hybridisierung /FFE-06 15/*

Beeinflussung der Kosten

Neben dem Potenzial wird auch die zukünftige Entwicklung der Kosten betrachtet. Basierend auf den Erkenntnissen aus /FFE-49 16/ ist davon auszugehen, dass die spezifischen Investitionen rückläufig sind. Gründe hierfür sind die bessere steuerungstechnische Ausrüstung von Neuanlagen, geringere Investitionen für Informations- und Kommunikationstechnologie sowie der rückläufige Personalaufwand für die Erschließung der Flexibilität (beispielsweise für die Umprogrammierung von Anlagen). Nach /FFE-49 16/ wird für Informations- und Kommunikationstechnologie eine Preisdegression von 10 % in fünf Jahren angesetzt. In den ersten fünf Jahren geht der Personalaufwand um 10 % zurück, da der Lerneffekt anfangs höher ist. Ab 2020 wird dieser Rückgang noch um 5 % über je fünf Jahre angesetzt. Bei den Kosten für die Kommunikationsbox ist eine überschlägige Preisdegression von 15 % über fünf Jahre zu erwarten. Die Entwicklung der spezifischen Investitionen ist in **Tabelle 5-23** zusammengefasst. Die spezifischen Kosten gelten für Flexibilitäten ab 500 kW, unter 500 kW sind in jedem Fall die Investitionen für eine Kommunikationsbox zu tätigen. Während die spezifischen Investitionen in 2015 noch etwa 6,2 €/kW betragen, reduzieren sie sich in 2030 auf etwa 4,9 €/kW.

Tabelle 5-23: *Entwicklung der spezifischen Investitionen bis 2030 /FFE-49 16/*

	2015	2020	2025	2030
Investitionen für Anlagen mit einer Leistung von unter 500 kW in €	3.000	2.550	2.100	1.650
Spezifische Investitionen (ab 500 kW) in €/kW	6,2	5,6	5,3	4,9

Für die fixen Betriebskosten wird bis 2030 keine Veränderung angesetzt, da diese bereits heute auf sehr geringem Niveau liegen. Auch bei den variablen Kosten ist nicht von einer starken Erhöhung der Kosten auszugehen. Berücksichtigt werden muss der zukünftige Strompreis für Industriekunden. Im Fall eines Abrufs können variable Kosten durch eine Wirkungsgradverschlechterung auftreten. Findet der Einfluss der Flexibilität auf die Energieeffizienz Berücksichtigung, zeigt sich, wie in Kapitel 5.2.5 dargestellt, dass in Einzelfällen ein wesentlicher Effizienzgewinn erreicht werden kann, wenn durch die Nutzung einer Drehzahlregelung eine deutliche Abweichung vom ursprünglichen Vollast-Arbeitspunkt in den Teillastbereich erfolgt. Die Höhe hängt stark von den jährlichen Vorhalte- sowie den Abrufstunden ab. Eine längerfristige Veränderung des Arbeitspunktes wird als Energieeffizienzmaßnahme angesehen und daher nicht im Rahmen der Flexibilitätsvermarktung betrachtet.

6 Anwendungsfall Engpassmanagement

Wie in Kapitel 3.2 erläutert, nehmen industrielle Flexibilitäten derzeit überwiegend am Regelleistungsmarkt teil, vereinzelt werden die Anlagen auch im Rahmen der Verordnung zu abschaltbaren Lasten (AbLaV) vermarktet. Eine Analyse der Teilnahme am Regelleistungsmarkt wurde bereits in verschiedenen Studien, wie beispielsweise in /FFE-26 16/ oder /UBA-05 15/, thematisiert, weshalb in dieser Arbeit davon abgesehen wird. Eine weitere Möglichkeit, industrielle Flexibilitäten systemdienlich zu nutzen, kann darin bestehen, einen Beitrag zum Engpassmanagement zu leisten. Hierfür relevant ist die regionale Verfügbarkeit der industriellen Flexibilitäten in Bezug auf Netzengpässe. Nachfolgend wird konkret untersucht, welchen Beitrag industrielle Flexibilitäten zum Engpassmanagement leisten können.

Im Detail werden industrielle Flexibilitäten den beiden Maßnahmen Redispatch und Einspeisemanagement gegenübergestellt. Dabei wird die Annahme getroffen, dass die Flexibilitätspotenziale für das Jahr 2015 den für 2012 ausgewiesenen Potenzialen entsprechen. Als Ergebnis wird die Minderung der jährlichen Redispatch- und Einspeisemanagementarbeit durch die Aktivierung industrieller Flexibilitäten ausgegeben. Anhand dieser quantifizierten Erkenntnisse kann eine Aussage hinsichtlich der Eignung industrieller Flexibilitäten als Beitrag zum Engpassmanagement getätigt werden. Zudem zeigen die Ergebnisse, ob sich das Engpassmanagement zukünftig prinzipiell als weitere Option für die Vermarktung von Flexibilitäten eignet.

6.1 Redispatch

Für Redispatch werden nach §13 Abs. 1a EnWG konventionelle Anlagen mit einer Leistung größer 10 MW eingesetzt /ENWG-01 15/. Im Jahr 2015 lag die gesamte positive und negative Redispatcharbeit²⁰ nach Angaben der Bundesnetzagentur bei 16,0 TWh. Davon entfielen nach Angaben der vier Übertragungsnetzbetreiber etwa 11,2 TWh auf Maßnahmen innerhalb der Landesgrenzen, der Rest wurde durch ausländische Kraftwerke erbracht. Etwas mehr als ein Drittel der Arbeit entfällt auf die Erhöhung der Wirkleistung von Kraftwerken, die verbleibenden knapp zwei Drittel werden der Reduzierung der Wirkleistungseinspeisung von Kraftwerken zugeordnet /BDEW-04 16/.

Da keine besonderen Anforderungen an den Leistungsgradient der Kraftwerke bestehen, ist davon auszugehen, dass die vergleichsweise hohen Lastgradienten der im Rahmen der Arbeit betrachteten industriellen Flexibilitäten genügen, um als Alternative zu Redispatcheinsätzen betrachtet zu werden.

Wie in **Abbildung 6-1** ersichtlich, werden nahezu täglich positive sowie negative Redispatcheinsätze im Netzgebiet gemeldet.

²⁰ Bei einem positiven Redispatcheinsatz wird die Leistung eines Kraftwerkes, welches hinter dem Engpass sitzt, erhöht. Ein negativer Redispatcheinsatz bedingt die Reduzierung der Einspeiseleistung eines Kraftwerkes, welches vor dem Engpass lokalisiert ist /BDEW-04 16/.

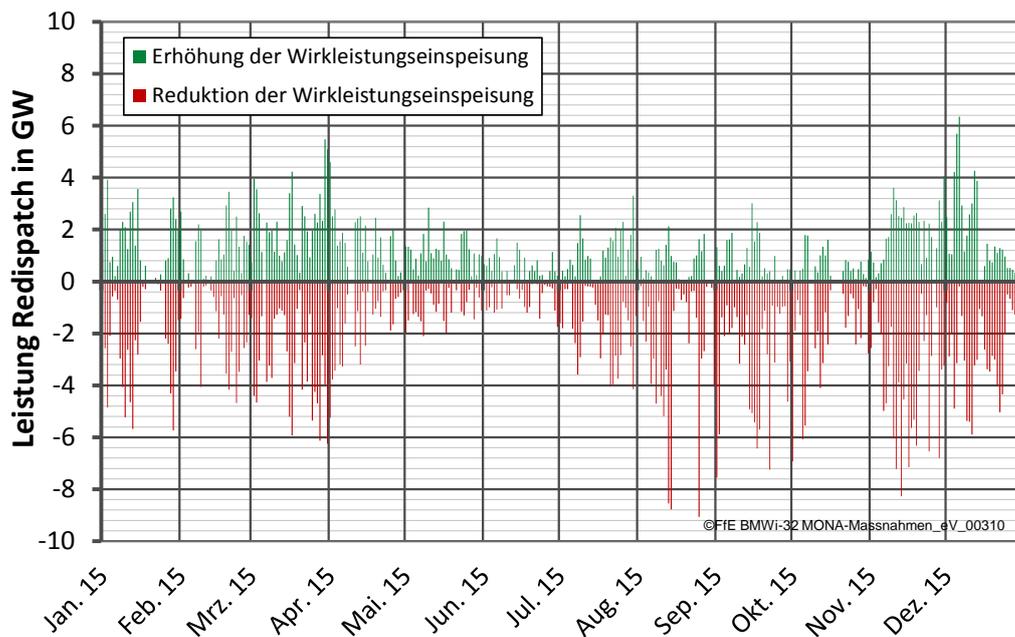


Abbildung 6-1: *Gemeldete Redispatch-Einsätze der Übertragungsnetzbetreiber in Deutschland im Jahr 2015 /FFE-15 17/*

Die Dauer sowie die mittlere Leistung je Redispatcheinsatz sind in **Abbildung 6-2** dargestellt. Es zeigt sich, dass etwa die Hälfte der Redispatchabrufe eine Dauer von maximal vier Stunden aufweist, wobei ein Großteil der Abrufe zwischen ein und drei Stunden liegt. Bei über 60 % der Einsätze beträgt die mittlere Leistung bis zu 250 MW.

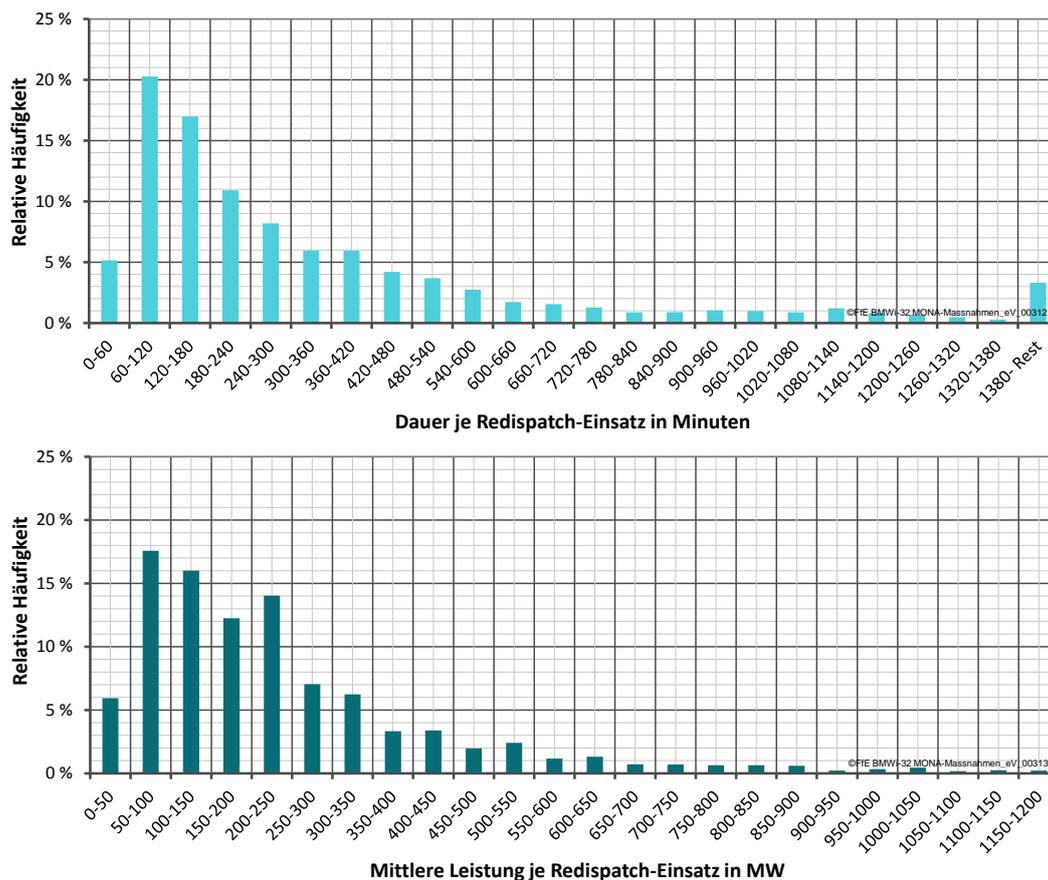


Abbildung 6-2: Häufigkeitsverteilung der Dauer (oben) sowie der mittleren Leistung (unten) je Redispatch-Einsatz im Jahr 2015 / FFE-15 17/

Insgesamt konnten knapp 10,6 TWh der gemeldeten nationalen Redispatcheinsätze den jeweils betroffenen Kraftwerken zugeordnet werden. Das entspricht ca. 95 % der gemeldeten Redispatcharbeit in Deutschland. Die regionale Verteilung der Redispatcharbeit zeigt nachfolgend **Abbildung 6-3**. Während eine Reduzierung der Wirkleistungseinspeisung 2015 vor allem im Osten und Norden Deutschlands erfolgte, wurde im Süden die Wirkleistungseinspeisung in den meisten Fällen erhöht. Im Vergleich der Redispatcheinsätze mit einer Reduzierung der Wirkleistungseinspeisung mit dem positiven Lastverschiebepotenzial stromintensiver Prozesse wird deutlich, dass nur geringe Lastflexibilisierungspotenziale in den Regionen mit hohem Redispatchaufkommen vorliegen.

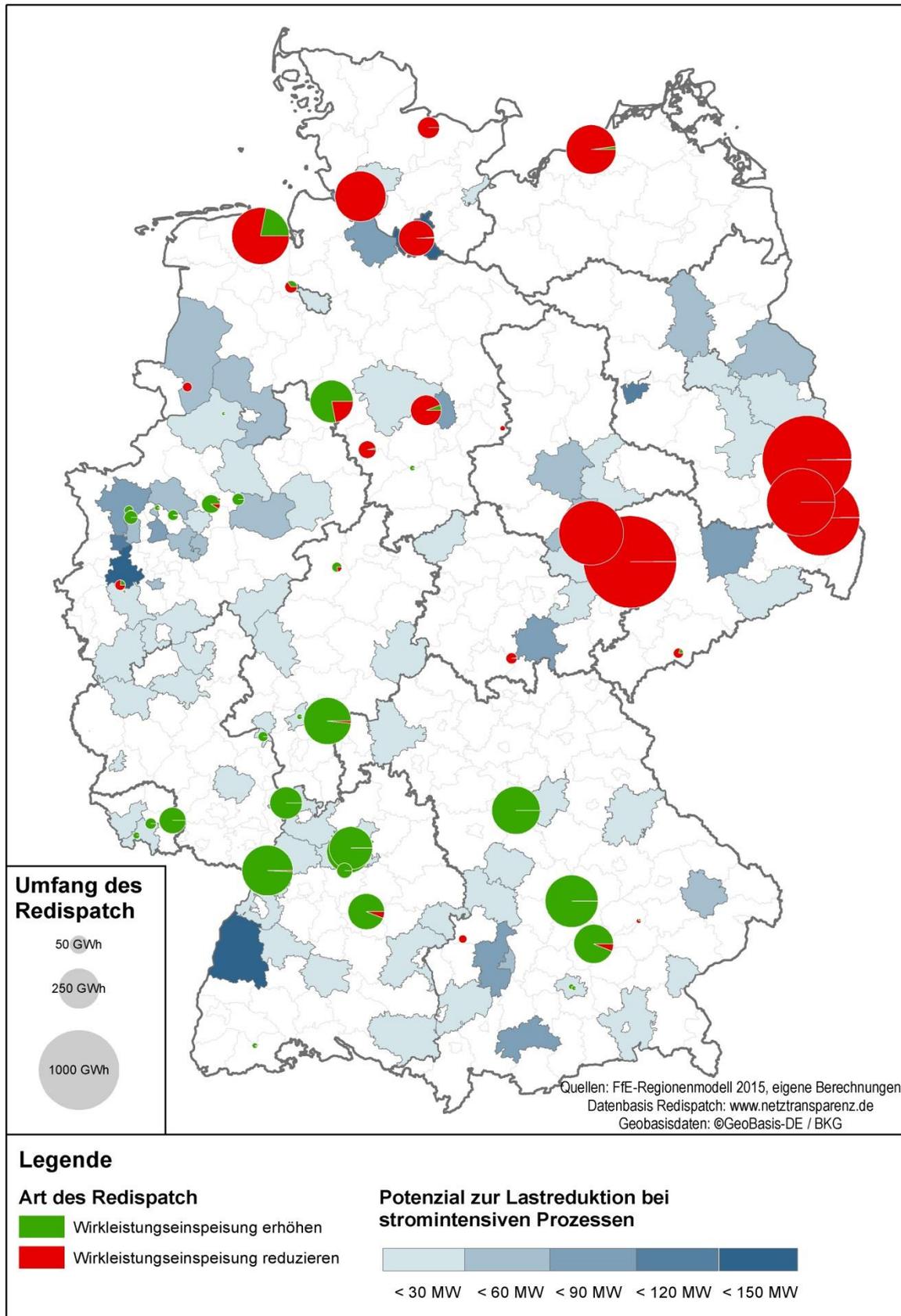


Abbildung 6-3: *Redispatcharbeit in Deutschland je Kraftwerk für das Jahr 2015 und positives Lastverschiebepotenzial stromintensiver Prozesse*

Die insgesamt in 2015 entstandenen Kosten für Redispatcheinsätze belaufen sich nach Angaben der Bundesnetzagentur auf 402,5 Mio. € /BNETZA-15 16/.

6.1.1 Beitrag stromintensiver Prozesse

Für stromintensive Prozesse wird für den Fall der Lastverschiebung in der Modellierung angesetzt, dass ein Abruf der Flexibilität nur einmal wöchentlich getätigt werden darf. Dadurch ist sichergestellt, dass ausreichend Zeit für ein Nachholen einer ggf. entgangenen Produktion vorhanden ist.

Ein Abruf stromintensiver Prozesse in der beispielhaft ausgewählten Netzregion 72 (siehe Anhang) ist in **Abbildung 6-4** dargestellt. In dieser Region sind alle der im Detail betrachteten stromintensiven Prozesse vorhanden und zugleich als Flexibilität nutzbar. Insgesamt stehen dort ca. 590 MW an positivem Lastflexibilisierungspotenzial zur Verfügung. Im gezeigten Abruf werden für die ersten 90 Minuten ca. 255 MW an Flexibilität genutzt: Nach etwa 120 Minuten kann die gesamte Redispatchmaßnahme von ca. 315 MW über rund 80 Minuten durch die Flexibilisierung stromintensiver Prozesse vermieden werden. Mit steigender Abrufdauer reduziert sich die Flexibilität, da nicht alle Prozesse über mehrere Stunden genutzt werden können. Nach etwa 200 Minuten stehen noch etwa 240 MW zur Verfügung, nach 240 Minuten sind es noch 165 MW.

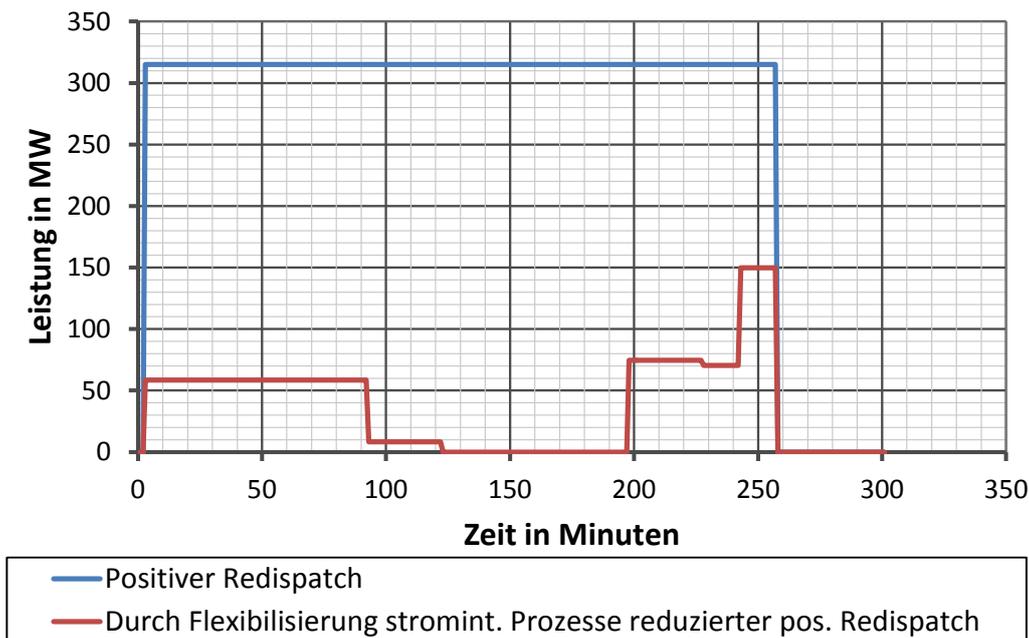


Abbildung 6-4: *Beispielhafte Reduzierung eines positiven Redispatchabrufes durch Flexibilisierung stromintensiver Prozesse in der dena-Netzregion 72*

Werden die analysierten stromintensiven Prozesse in der Modellierung ganzjährig jeweils einmal wöchentlich genutzt, um die in diesem Zeitschritt höchsten Redispatcheinsätze zu reduzieren, so stellen sich folgende Ergebnisse ein:

Das positive Redispatchaufkommen kann je nach Region um 0,3 bis maximal 43,9 Prozentpunkte verringert werden, das Negative um maximal 4,6 Prozentpunkte. Insgesamt betrachtet ist der Beitrag der stromintensiven Prozesse jedoch vergleichsweise gering, da das positive Redispatchaufkommen im Mittel nur um

1,8 Prozentpunkte und das Negative lediglich um im Mittel 0,1 Prozentpunkte vermindert werden können (vgl. **Tabelle 6-1**).

Tabelle 6-1: *Reduzierung des Redispatchaufkommens durch Flexibilisierung stromintensiver Prozesse*

	Positiver Redispatch			Negativer Redispatch		
	Redispatch in MWh/a	Durch stromintensive Prozesse reduzierter Redispatch in MWh/a	Veränderung in Prozentpunkten	Redispatch in MWh/a	Durch stromintensive Prozesse reduzierter Redispatch in MWh/a	Veränderung in Prozentpunkten
Region 21	155	153	-1,3 %	-477.721	-477.335	-0,1 %
Region 22	121.336	117.021	-3,6 %	-417.239	-417.194	0,0 %
Region 23	230.642	226.249	-1,9 %	-252.612	-252.133	-0,2 %
Region 24	377.970	372.223	-1,5 %	-8.899	-8.749	-1,7 %
Region 25	481.373	480.146	-0,3 %	0	0	
Region 26	747.162	738.354	-1,2 %	-17.226	-16.745	-2,8 %
Region 41	1.217.491	1.213.991	-0,3 %	-1.895	-1.808	-4,6 %
Region 42	206.483	195.923	-5,1 %	-11.533	-11.195	-2,9 %
Region 71	4.681	4.498	-3,9 %	-13.846	-13.825	-0,2 %
Region 72	94.204	74.210	-21,2 %	-14.014	-13.920	-0,7 %
Region 73	80.585	79.026	-1,9 %	-6.145	-5.987	-2,6 %
Region 74	1.262	992	-21,4 %	-500	-495	-1,0 %
Region 75	166.132	160.156	-3,6 %	0	0	
Region 76	0	0		-11.915	-11.432	-4,1 %
Region 81	0	0		-377.417	-376.269	-0,3 %
Region 82	1.674	1.434	-14,3 %	-203.591	-203.591	0,0 %
Region 83	0	0		-691.439	-689.125	-0,3 %
Region 84	424	238	-43,9 %	-4.344.130	-4.343.445	0,0 %
Summe / Mittelwert	3.731.574	3.664.614	-1,8 %	-6.850.122	-6.843.248	-0,1 %

6.1.2 Beitrag von Querschnittstechnologien

Bei der Modellierung der Querschnittstechnologien zeigt sich ein erheblicher Unterschied. Die jeweils nur sehr kurze Abrufdauer von wesentlich weniger als einer Stunde und die deutlich kürzere Sperrzeit führen zu einer merklich höheren Anzahl an Abrufen innerhalb eines Redispatcheinsatzes. Allerdings ist die verfügbare Höhe an Flexibilität deutlich geringer als bei stromintensiven Prozessen. (vgl. **Abbildung 6-5**).

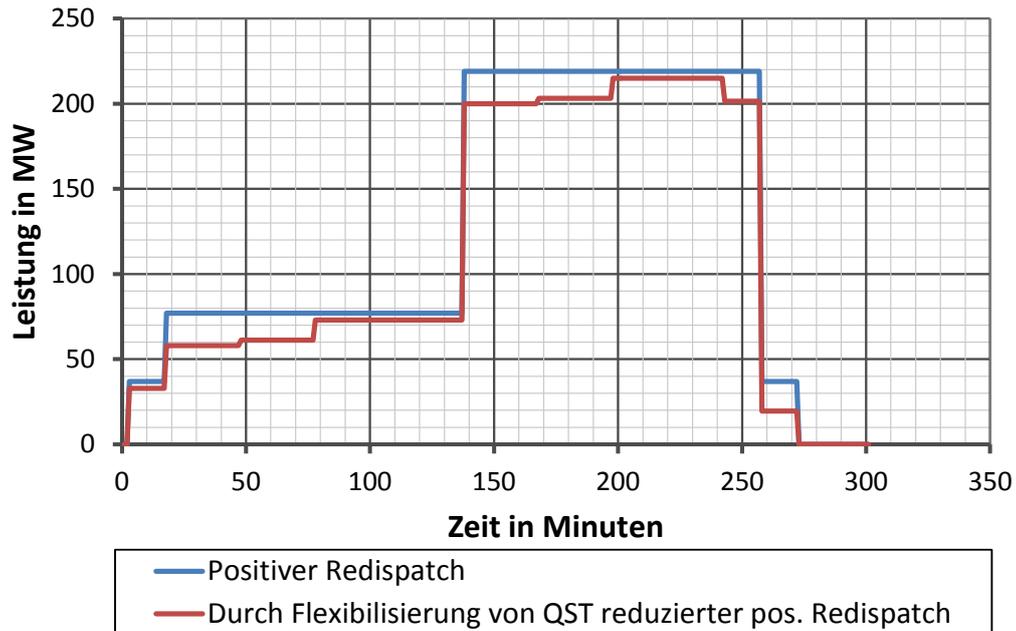


Abbildung 6-5: *Beispielhafte Reduzierung eines positiven Redispatchabrufes durch Flexibilisierung industrieller Querschnittstechnologien in der dena-Netzregion 72*

Der Vergleich des Redispatchaufkommens ohne und mit Nutzung der Flexibilitäten je Region zeigt ein ähnliches Ergebnis wie bei den stromintensiven Prozessen.

Das positive Redispatchaufkommen kann um bis zu 34,9 Prozentpunkte verringert werden, das Negative um maximal 11,0 Prozentpunkte. Im Mittel wird jedoch auch hier nur eine geringe Menge des Redispatchaufkommens reduziert. Die positive Redispatchmenge nimmt im Mittel um 7,8 Prozentpunkte ab, die Negative lediglich um 0,4 Prozentpunkte.

Tabelle 6-2: *Reduzierung des Redispatchaufkommens durch Flexibilisierung industrieller Querschnittstechnologien*

	Positiver Redispatch			Negativer Redispatch		
	Redispatch in MWh/a	Durch Querschnittstechnologien reduzierter Redispatch in MWh/a	Veränderung in Prozentpunkten	Redispatch in MWh/a	Durch Querschnittstechnologien reduzierter Redispatch in MWh/a	Veränderung in Prozentpunkten
Region 21	155	155	0,0 %	-477.721	-477.719	0,0 %
Region 22	121.336	117.426	-3,2 %	-417.239	-415.578	-0,4 %
Region 23	230.642	208.261	-9,7 %	-252.612	-247.205	-2,1 %
Region 24	377.970	338.069	-10,6 %	-8.899	-8.355	-6,1 %
Region 25	481.373	448.251	-6,9 %	0	0	
Region 26	747.162	696.075	-6,8 %	-17.226	-16.710	-3,0 %
Region 41	1.217.491	1.136.038	-6,7 %	-1.895	-1.769	-6,6 %
Region 42	206.483	188.745	-8,6 %	-11.533	-11.212	-2,8 %
Region 71	4.681	4.011	-14,3 %	-13.846	-13.502	-2,5 %
Region 72	94.204	90.432	-4,0 %	-14.014	-13.913	-0,7 %
Region 73	80.585	57.908	-28,1 %	-6.145	-5.466	-11,0 %
Region 74	1.262	1.065	-15,6 %	-500	-464	-7,2 %
Region 75	166.132	153.255	-7,8 %	0	0	
Region 76	0	0		-11.915	-11.302	-5,1 %
Region 81	0	0		-377.417	-374.925	-0,7 %
Region 82	1.674	1.434	-14,3 %	-203.591	-202.264	-0,7 %
Region 83	0	0		-691.439	-688.491	-0,4 %
Region 84	424	276	-34,9 %	-4.344.130	-4.332.617	-0,3 %
Summe / Mittelwert	3.731.574	3.441.401	-7,8 %	-6.850.122	-6.821.492	-0,4 %

6.2 Einspeisemanagement

Im Rahmen des Einspeisemanagements sind diverse Erzeugungsanlagen gesetzlich dazu verpflichtet, ihre Wirkleistungserzeugung bei Bedarf abzuregeln. Der Gruppe 2 des Einspeisemanagements sind verschiedene Erneuerbare Energien Anlagen zugeordnet, wie beispielsweise Windkraft-, Photovoltaik- oder Biomasseanlagen. Deren Abregelung erfolgt entweder in zwei (100 % auf 0%) oder vier Stufen (100 % / 60 % / 30 % / 0 %) /FFE-15 17/.

Insgesamt entstanden 2015 nach Angaben der Bundesnetzagentur etwa 4,7 TWh an Ausfallarbeit aus EEG- und KWK-Anlagen /BNETZA-15 16/. **Abbildung 6-6** zeigt die Dauer und die mittlere Leistung je Einspeisemanagementabruf. Knapp 30 % der Abrufe weisen eine Dauer von maximal einer Stunde auf. Bei etwa 60 % der Einsätze liegt die mittlere Leistung bei maximal 40 MW.

Die Vorankündigungszeit beträgt etwa fünf bis zehn Minuten für die Vorbereitung der Abregelung zuzüglich einer Minute Reaktionszeit der Anlage. Industrielle Flexibilitäten erfüllen diese Anforderungen in mehr als 90 % der Fälle.

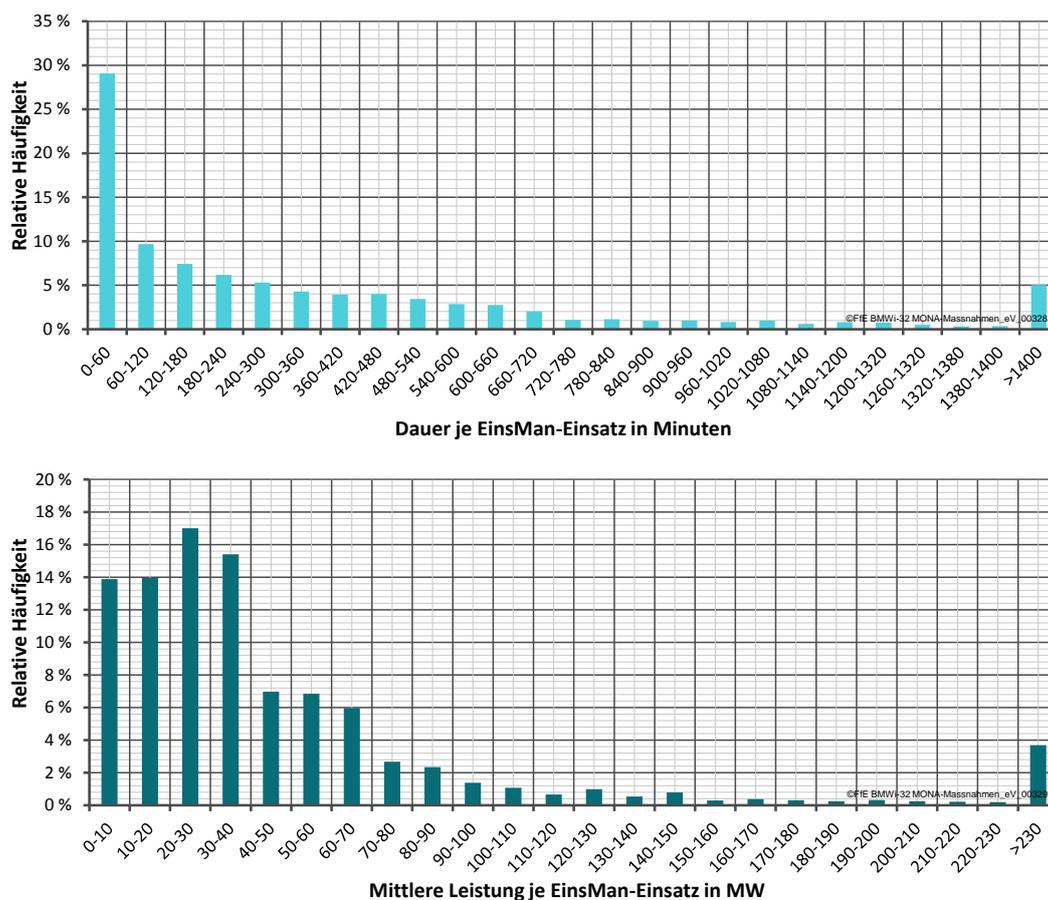


Abbildung 6-6: Häufigkeitsverteilung der Dauer (oben) sowie mittleren Leistung (unten) je Einspeisemanagementeinsatz im Jahr 2015 /FFE-15 17/

Für die Modellierung werden die von den Verteilnetzbetreibern veröffentlichten Einspeisemanagementdaten georeferenziert. Allerdings liegen die Daten nicht von allen Netzbetreibern in ausreichender Detailtiefe vor, um diese regional verorten zu können. Für die weitere Modellierung werden daher die veröffentlichten Daten der Verteilnetzbetreiber Avacon, Bayernwerk, E.DIS und Schleswig Holstein Netz genutzt, da diese regional zugeordnet werden können (vgl. **Abbildung 6-7** links) /AVACON-01 16/, /BAYAG-02 16/, /EDIS-01 16/, /SHN-01 16/. Insgesamt beläuft sich die regional verortbare Ausfallarbeit auf ca. 1,4 TWh, was etwa 30 % der Gesamtmenge von 4,7 TWh in 2015 entspricht. Der überwiegende Anteil der abgeregelten Energiemenge kann den nördlichen Bundesländern zugeordnet werden, wo vor allem Windkraftanlagen betroffen sind. Im Süden hingegen ist die absolute Menge deutlich geringer, hier werden überwiegend Photovoltaikanlagen abgeregelt (vgl. hierzu die abgeregelte Energiemenge in MWh/km² in **Abbildung 6-7** rechts).

Da die jeweilige tatsächliche Erzeugungsleistung je Zeitpunkt nicht bekannt ist, werden regionale Wind- und Photovoltaik-Erzeugungsgänge für das Jahr 2015 mit den Einspeisemanagementdaten verschnitten. Da jeweils ein mittlerer Erzeugungsgang je Region für die einzelnen Anlagen hinterlegt wird, kann dies im Einzelfall bedeuten, dass die abgeregelte Menge im Rahmen des Einspeisemanagements unterschätzt wird. Diese Daten gehen anschließend in die Modellierung ein.

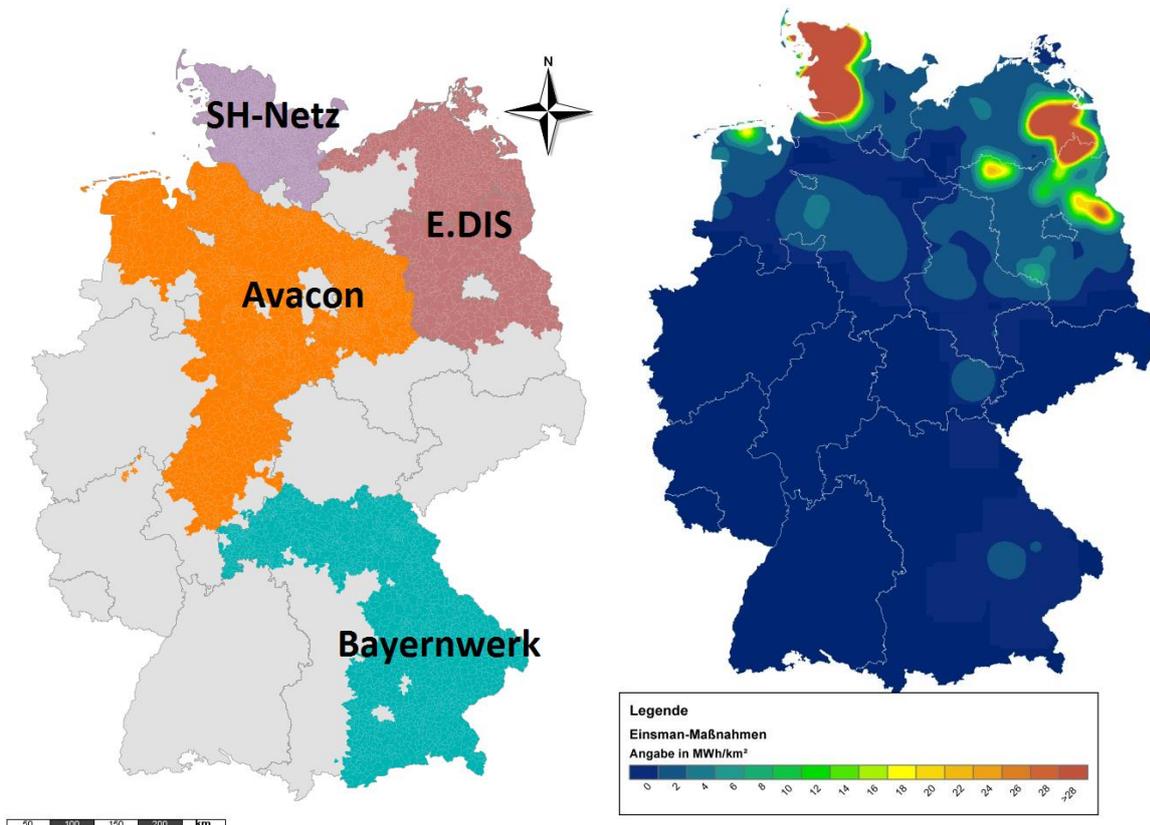


Abbildung 6-7: Netzgebiete mit regional verortbaren Einspeisemanagementmaßnahmen (links) nach /FFE-15 17/ und Ausfallarbeit durch Einspeisemanagement im Jahr 2015 (rechts)

Wird eine Anlage im Rahmen des Einspeisemanagements abgeregelt, erhält der Betreiber der Erneuerbaren Energien Anlage eine Entschädigung für den Ausfall. Diese entspricht der Differenz zwischen der zu dem Zeitpunkt möglichen und der tatsächlichen Einspeisung, wobei pauschale Vergütungssätze angesetzt werden /FFE-15 17/. Insgesamt belaufen sich die Entschädigungszahlungen in 2015 auf 478 Mio. € /BNETZA-15 16/.

6.2.1 Beitrag stromintensiver Prozesse

Für die Minderung der Einspeisemanagementmaßnahmen werden in der Modellierung im Folgenden lediglich die negativen Lastflexibilisierungspotenziale betrachtet. Die Erhöhung industrieller Lasten wird als Alternative zum Einspeisemanagement angesetzt.

Tabelle 6-3 zeigt die Ergebnisse der Modellierung. Die Flexibilisierung stromintensiver Prozesse kann in einzelnen Regionen zwar einen wesentlichen Beitrag leisten, jedoch sind die abgeregelteten Energiemengen dort im Vergleich zur Gesamtmenge marginal. In Summe betrachtet kann die Ausfallarbeit im Rahmen des Einspeisemanagements kaum reduziert werden. Insgesamt wird eine Verminderung um lediglich 0,2 Prozentpunkte erreicht.

Tabelle 6-3: *Reduzierung des Einspeisemanagementaufkommens durch Flexibilisierung stromintensiver Prozesse*

	Einspeisemanagement in MWh/a	Durch stromintensive Prozesse reduziertes Einspeisemanagement in MWh/a	Veränderung in Prozent- punkten
Region 21	-1.063.306	-1.062.797	0,0 %
Region 22	-13.808	-13.771	-0,3 %
Region 23	-6.845	-6.581	-3,9 %
Region 24	0	0	
Region 25	-3	-1	-66,7 %
Region 26	-186	-155	-16,7 %
Region 41	0	0	
Region 42	0	0	
Region 71	-116	-78	-32,8 %
Region 72	0	0	
Region 73	0	0	
Region 74	0	0	
Region 75	0	0	
Region 76	0	0	
Region 81	-258.534	-256.820	-0,7 %
Region 82	0	0	
Region 83	-372	-140	-62,4 %
Region 84	-3.120	-2.790	-10,6 %
Summe / Mittelwert	-1.346.290	-1.343.133	-0,2 %

6.2.2 Beitrag von Querschnittstechnologien

Auch die Nutzung industrieller Querschnittstechnologien als Alternative zum Einspeisemanagement liefert ähnliche Erkenntnisse. Der Beitrag der Flexibilitäten zur Minderung der abgeregelten Energiemenge mit 0,3 Prozentpunkten ist ebenfalls vernachlässigbar (vgl. **Tabelle 6-4**).

Tabelle 6-4: *Reduzierung des Einspeisemanagementaufkommens durch Flexibilisierung industrieller Querschnittstechnologien*

	Einspeisemanagement in MWh/a	Durch Querschnittstechnologien reduziertes Einspeisemanagement in MWh/a	Veränderung in Prozent- punkten
Region 21	-1.063.306	-1.063.303	0,0 %
Region 22	-13.808	-13.318	-3,5 %
Region 23	-6.845	-6.457	-5,7 %
Region 24	0	0	
Region 25	-3	-2	-33,3 %
Region 26	-186	-141	-24,2 %
Region 41	0	0	
Region 42	0	0	
Region 71	-116	-108	-6,9 %
Region 72	0	0	
Region 73	0	0	
Region 74	0	0	
Region 75	0	0	
Region 76	0	0	
Region 81	-258.534	-255.469	-1,2 %
Region 82	0	0	
Region 83	-372	-297	-20,2 %
Region 84	-3.120	-2.711	-13,1 %
Summe / Mittelwert	-1.346.290	-1.341.806	-0,3 %

Von einer detaillierten Kostenbetrachtung wird an dieser Stelle abgesehen, da die Ergebnisse der Modellierung zeigen, dass durch die Nutzung der derzeit vorhandenen industriellen Lastflexibilisierungspotenziale kein nennenswerter Beitrag zum Engpassmanagement geleistet werden kann. Bei einer Änderung der technischen Kennwerte der stromintensiven Prozesse und Querschnittstechnologien kann eine wirtschaftliche Betrachtung erfolgen.

7 Zusammenfassung und Fazit

Der steigende Anteil volatiler Stromerzeugung aus Erneuerbare Energien Anlagen führt zu erhöhten Anforderungen an die Flexibilität auf der Erzeugungsseite. Eine verstärkte Integration Erneuerbarer Energien kann auch durch Flexibilität auf der Nachfrageseite ermöglicht werden. Einen ersten Schritt in diese Richtung hat die Industrie bereits vollzogen. Industrielle Flexibilitäten werden beispielsweise am Regelleistungsmarkt angeboten. Dort reagieren industrielle Verbraucher und Erzeugungsanlagen auf die Anforderungen aus Marktsicht. Während bisher überwiegend stromintensive Prozesse für eine flexible Fahrweise genutzt wurden, werden nun auch vermehrt Querschnittstechnologien, wie zum Beispiel Kältemaschinen, Pumpen oder Lüftungsanlagen, systemdienlich eingesetzt.

Im Rahmen der Arbeit wird analysiert, welchen Beitrag stromintensive Prozesse und Querschnittstechnologien zur Integration Erneuerbarer Energien leisten können. Im ersten Schritt werden die aus technischer Sicht für eine Lastflexibilisierung geeigneten Anlagen identifiziert. Im Bereich der stromintensiven Prozesse sind Aluminiumelektrolyse, Elektrolichtbogenofen, Holzschleifer und Refiner in der Papierindustrie, Roh- und Zementmühlen sowie Chlorelektrolyse für eine flexible Betriebsweise geeignet. Die Anwendung der im Rahmen der Arbeit entwickelten Methodik zeigt, dass diese Prozesse insgesamt ein technisches Potenzial von ca. 2.400 MW an positiver Leistung sowie 530 MW an negativer Leistung über jeweils eine Stunde aufweisen. Allerdings stehen diese Anlagen pro Abruf jeweils nur für eine Dauer von ein bis maximal vier Stunden in Abhängigkeit der Technologie zur Verfügung. Hinzu kommt, dass ein Produktionsausfall in jedem Fall vermieden werden muss, so dass sich die Abrufhäufigkeit im Mittel auf einmal pro Woche beschränkt. Die regionale Verteilung der Lastflexibilisierungspotenziale zeigt, dass vor allem in Gebieten mit hohem Industrieanteil Potenziale vorhanden sind, diese jedoch nicht zwingend mit Regionen mit hohem Redispatch- oder Einspeisemanagementaufkommen korrelieren. Das führt dazu, dass stromintensive Prozesse zwar aus wirtschaftlicher Sicht aufgrund sehr geringer variabler Kosten eine attraktive Möglichkeit zur Minderung des Engpassmanagements darstellen, diese in der Praxis jedoch unter den derzeitigen technischen Aspekten, wie Abrufdauer und -häufigkeit, bisher keinen wesentlichen Mehrwert auf regionaler Ebene liefern können.

Querschnittstechnologien standen in bisherigen Studien nicht im Fokus, daher werden hier anfangs unterschiedliche Technologien auf deren Eignung für eine flexible Betriebsweise untersucht. Während einzelne Technologien, wie Kältemaschinen, Lüftungsanlagen, Pumpen oder Beleuchtungssysteme, gut bis sehr gut für eine Flexibilisierung geeignet sind, werden andere im Rahmen der Befragung von Industriebetrieben als eher schwierig flexibilisierbar eingeordnet. Dazu gehören beispielsweise Druckluftkompressoren, da diese in den meisten Fällen für die Druckniveauhaltung im Netz eingesetzt werden. Auch bei Heizungsumwälzpumpen steht der verhältnismäßig hohe Aufwand für die Erschließung der Flexibilität in keinem Verhältnis zur technisch nutzbaren Leistung je Pumpe. BHKWs und Netzersatzanlagen werden zwar häufig zur Flexibilisierung eingesetzt, jedoch ist die vorhandene Datenbasis nicht ausreichend für eine Hochrechnung der Potenziale auf Deutschland.

Für die im Detail analysierten Technologien wird eine Methodik zur Bestimmung des akzeptierten Potenzials auf regionaler Ebene entwickelt. Diese basiert zum einen auf der Auswertung umfangreicher Daten der LEEN-Teilnehmer, zum anderen auf der Befragung von Energieverantwortlichen verschiedenster Unternehmen. Insgesamt steht im Bereich der Querschnittstechnologien werktags ein akzeptiertes Potenzial von 1.180 MW an positiver Leistung sowie 630 MW an negativer Leistung über eine Abrufdauer von jeweils einer Stunde zur Verfügung. Da die Abrufdauer je Technologie zwischen wenigen Minuten und wenigen Stunden liegt, kann jeweils nur eine geringe Energiemenge genutzt werden. Im Vergleich zu stromintensiven Prozessen kann ein deutlich häufigerer Abruf erfolgen, da die Flexibilisierung einzelner Anlagen zur Medienversorgung keinen direkten Einfluss auf die Produktion bzw. die Produktqualität hat. Die Regionalisierung verdeutlicht das nahezu flächendeckende Potenzial der Querschnittstechnologien. Aus technischer Sicht sind in Gebieten mit hohem Redispatch- oder Einspeisemanagementaufkommen zwar flexibilisierbare Querschnittstechnologien vorhanden, deren Höhe ist jedoch im Vergleich zur abgerufenen Leistung im Rahmen des Engpassmanagements gering. Der Beitrag der Querschnittstechnologien zum Engpassmanagement ist zudem aufgrund der sehr kurzen Abrufdauer marginal, obwohl auch diese aufgrund sehr geringer variabler Kosten eine wirtschaftliche Alternative darstellen.

Aus derzeitiger Sicht stellt das Engpassmanagement keine zusätzliche Vermarktungsmöglichkeit für industrielle Flexibilitäten dar. Um diese in Zukunft auf regionaler Ebene nutzen zu können, bedarf es vor allem einer noch detaillierteren Analyse der stromintensiven Prozesse hinsichtlich Höhe des Potenzials, Abrufdauer und Abrufhäufigkeit. Die bisherigen Ergebnisse im Bereich der Querschnittstechnologien stellen das akzeptierte Potenzial der Unternehmen dar. Es ist zu erwarten, dass das technische Potenzial jedoch um einiges höher liegt. Auch hier sind weitere Analysen zu Abrufdauer und Abrufhäufigkeit nötig.

Aus wirtschaftlicher Sicht liegen die notwendigen Investitionen zur Erschließung der Flexibilität bereits auf einem sehr geringen Niveau. Es ist zudem anzunehmen, dass diese aufgrund einer bereits hohen Durchdringungsrate der Digitalisierung nicht mehr in nennenswertem Umfang sinken. Die Befragung der Unternehmen im Rahmen der Arbeit hat jedoch gezeigt, dass häufig nicht wirtschaftliche Aspekte entscheidend sind sondern vielmehr diverse andere Hemmnisse dazu beitragen, von einer externen Vermarktung der Flexibilitäten abzusehen. Diese können beispielsweise durch gezielte Öffentlichkeitsarbeit reduziert werden.

Für die zukünftige Entwicklung der Potenziale bleibt abzuwarten, wie sich die industrielle Wärmeerzeugung entwickelt. Bei einer starken Hybridisierung der Raum- und Prozesswärmeerzeugung kann davon ausgegangen werden, dass sich die industriellen Flexibilitäten deutlich erhöhen. Wesentlichen Einfluss haben auch verfahrenstechnische Veränderungen von Produktionsschritten. Alle weiteren betrachteten Entwicklungen, wie beispielsweise die Steigerung der Energieeffizienz, beeinflussen das Potenzial nur in geringem Umfang.

8 Weiterer Forschungsbedarf

Die entwickelten Methoden erlauben die Potenzialbestimmung für stromintensive Prozesse und Querschnittstechnologien auf regionaler Ebene. Unter Berücksichtigung der weiteren technischen und ökonomischen Kennwerte, wie beispielsweise Abrufdauer, Abrufhäufigkeit, Investitionen oder variable Kosten, können industrielle Flexibilitäten z.B. in Energiesystemmodellen abgebildet und deren Beitrag für verschiedene Vermarktungsoptionen bewertet werden.

Um die Potenziale auf regionaler Ebene noch realitätsnaher abbilden zu können, bedarf es in einem weiteren Schritt einer noch detaillierteren Analyse der ausgewiesenen Potenziale.

Bei stromintensiven Prozessen muss davon ausgegangen werden, dass die vorhandenen Anlagen an den verschiedenen Standorten unterschiedlich flexibel agieren. Während einzelne Anlagen aufgrund von kontinuierlich betriebenen Folgeprozessen nahezu keine Flexibilität aufweisen, können andere gegebenenfalls vorhandene Speichermöglichkeiten für eine flexible Betriebsweise nutzen. Eine detaillierte Untersuchung der betrachteten Prozesse in einzelnen Unternehmen sowie deren Einbindung in den gesamten Prozessablauf kann weitere Erkenntnisse hinsichtlich des Potenzials je Standort liefern und ermöglicht eine sehr realitätsnahe Darstellung des Gesamtpotenzials für Deutschland.

Die Potenzialermittlung bei Querschnittstechnologien kann um eine Sensitivitätsanalyse ergänzt werden. Bisher stellt die zugrundeliegende Datenbasis für die Ermittlung der Potenziale von Querschnittstechnologien aus statistischer Sicht keine repräsentative Größe dar. In einer Sensitivitätsanalyse kann ermittelt werden, welche Parameter das Ergebnis in welcher Höhe beeinflussen und wie hoch die maximale Spannweite des Potenzials ist.

Auch im Hinblick auf Abrufdauer und -häufigkeit besteht weiterer Untersuchungsbedarf, da die bisherigen Ergebnisse vor allem auf den Angaben von Unternehmen basieren. Diese können jedoch teilweise aufgrund mangelnder eigener Erfahrung in der Vermarktung sehr subjektiv sein.

Hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung besteht vor allem zusätzlicher Forschungsbedarf im Bereich der Elektrifizierung bzw. Hybridisierung der industriellen Wärmezeugung. Die im Rahmen der Arbeit ausgewiesenen Potenziale für eine Elektrifizierung sollten hinsichtlich der Hybridisierung im Detail untersucht werden, da dies das Flexibilisierungspotenzial gegebenenfalls deutlich erhöhen kann.

9 Anhang

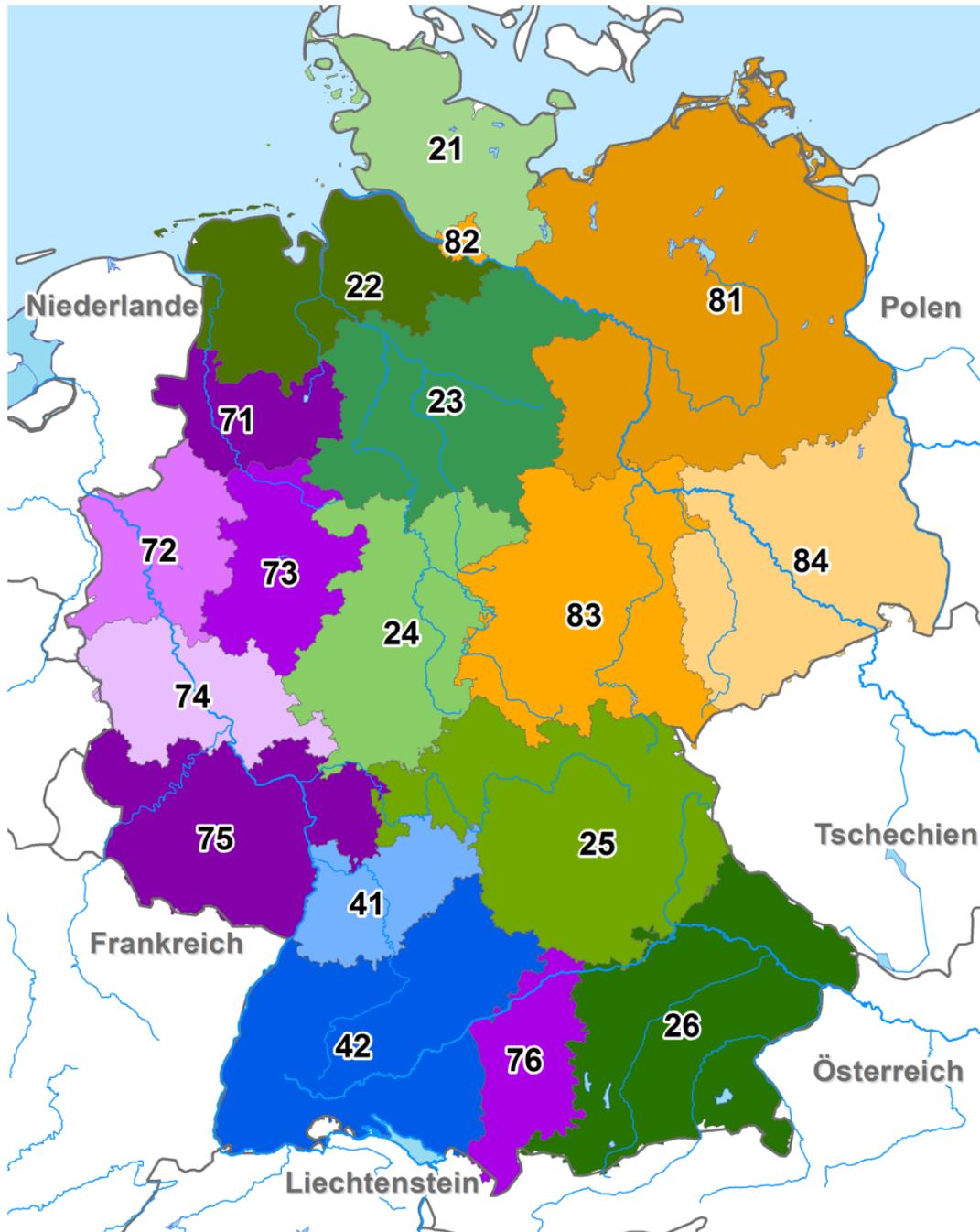


Abbildung 9-1: dena-Netzregionen nach /FFE-02 12/

10 Literaturverzeichnis

- AGORA-01 14** Gerhardt, Norman; Müller, Thorsten; Schulz, Wolfgang et al.: Power-to-Heat zur Integration von ansonsten abgeregeltem Strom aus Erneuerbaren Energien. Berlin: Agora Energiewende, 2014
- AGORA-05 16** Nabe, Christian: Flex-Efficiency - Ein Konzept zur Integration von Effizienz und Flexibilität bei industriellen Verbrauchern. Berlin: Agora Energiewende, 2016
- AVACON-01 16** Einspeisemanagement - Veröffentlichung abgeschlossener Maßnahmen. [Online]: <https://www.avacon.de/cps/rde/xchg/avacon/hs.xsl/3266.htm>. (Abruf:15.07.2016). Helmstedt: Avacon AG, 2016
- BAYAG-02 16** Einspeisemanagement - Veröffentlichung abgeschlossener Maßnahmen. [Online]: <https://www.bayernwerk.de/cps/rde/xchg/bayernwerk/hs.xsl/1010.htm> (Abruf: 27.07.2016). Regensburg: Bayernwerk, 2016
- BDEW-04 16** Laux, Matthias: Fakten und Argumente - Redispatch in Deutschland. In: [https://www.bdew.de/internet.nsf/id/20160629-fakten-und-argumente-redispatch-in-deutschland-de/\\$file/Fakten%20und%20Argumente%20-%20Redispatch%20in%20Deutschland.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/20160629-fakten-und-argumente-redispatch-in-deutschland-de/$file/Fakten%20und%20Argumente%20-%20Redispatch%20in%20Deutschland.pdf) (Abruf: 18.10.2016) Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6lLgyjm1G>. Berlin: BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., 2016
- BDEW-05 08** Technische Richtlinie Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz - Richtlinie für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz. Berlin: Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW), 2008
- BLESL-01 13** Blesl, Markus; Kessler, Alois: Energieeffizienz in der Industrie in: Springer Verlag. Berlin Heidelberg: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart, EnBW Energie Baden-Württemberg AG, Forschung und Innovation, Karlsruhe, 2013.
- BMBF-01 16** Industrieprozesse - Kopernikus-Projekt SynErgie in: <https://www.kopernikus-projekte.de/projekte/industrieprozesse> (Abruf: 01.05.2017) Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6qxi7wGzh>. Bonn: Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), 2016

- BMU-11 11** Pehnt, Martin; Schlomann, Barbara: Energieeffizienz: Potenziale, volkswirtschaftliche Effekte und innovative Handlungs- und Förderfelder für die Nationale Klimaschutzinitiative - Wissenschaftliche Begleitforschung zu übergreifenden technischen, ökologischen, ökonomischen und strategischen Aspekten des nationalen Teils der Klimaschutzinitiative. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), 2011
- BMWI-01 02** Steimle, Fritz; Kruse, Horst; Jahn, Karin; Wobst, Eberhard: Energiebedarf bei der technischen Erzeugung von Kälte in der Bundesrepublik Deutschland. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), 2002
- BNETZA-02 11** Festlegungsverfahren zu den Ausschreibungsbedingungen und Veröffentlichungspflichten für Sekundärregelleistung - Az: BK6-10-098. Bonn: Bundesnetzagentur Beschlusskammer 6, 2011
- BNETZA-15 16** 3. Quartalsbericht 2015 zu Netz- und Systemsicherheitsmaßnahmen - Viertes Quartal 2015 sowie Gesamtjahresbetrachtung 2015. Bonn: Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, 2016
- BUN-02 12** Verordnung über Vereinbarungen zu abschaltbaren Lasten AbLaV. Berlin: Bundesregierung, 2012
- CONR-01 93** Conrad, H.; Mühlbauer, A.; Thomas, R.: Elektrothermische Verfahrenstechnik. Essen: Vulkan-Verlag, 1993
- DENA-01 16** Seidl, Hannes; Schenuit, Carolin; Teichmann, Mario: Roadmap Demand Side Management - Industrielles Lastmanagement für ein zukunftsfähiges Energiesystem. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2016
- DENA-07 10** Agricola, Annegret-Cl.; Kohler, Stephan; Seidl, Hannes: dena-Netzstudie II - Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015 – 2020 mit Ausblick 2025. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), 2010
- DESTATIS-03 14** Energieverwendung der Betriebe im Verarbeitenden Gewerbe 2012 in:
<https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/Energie/Verwendung/Tabellen/KohleErdgasStrom.html>. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt (destatis), 2014
- DESTATIS-07 08** Klassifikationen - Gliederung der Klassifikation der Wirtschaftszweige, Ausgabe 2008 (WZ 2008). Wiesbaden: Statistische Bundesamt, 2008

-
- EC-01 00** De Almeida, Anibal T.; Guisse, Florence; Previ, Alfredo; Falkner, Hugh; Reichert, Jürgen; Malmose, Klaus: Improving the Penetration of Energy-Efficient Motors and Drives. Brussels: European Commission, 2000
- EDIS-01 16** Veröffentlichung abgeschlossener Maßnahmen. In: <https://www.edis.de/cps/rde/xchg/edis/hs.xsl/715.htm>. E.DIS AG, 2016
- ENWG-01 15** Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung (Energiewirtschaftsgesetz - EnWG). Berlin: Bundesrepublik Deutschland, 2015
- EPEX-02 14** European Power Exchange: Historische Marktdaten. [Online] ftp-Server: <ftp.epexspot.com>, laufende Aktualisierung seit 2014
- ETH-01 07** Klobasa, Marian: Dynamische Simulation eines Lastmanagements und Integration von Windenergie in ein Elektrizitätsnetz auf Landesebene unter regelungstechnischen und Kostengesichtspunkten. Zürich: Dissertation, Eidgenössisch Technische Hochschule Zürich (ETH), 2007
- EU-09 13** Durchführungsbeschluss der Kommission - vom 9. Dezember 2013 über Schlussfolgerungen zu den besten verfügbaren Techniken (BVT) gemäß der Richtlinie 2010/75/EU des Europäischen Parlaments und des Rates über Industrieemissionen in Bezug auf die Chloralkaliindustrie in: Amtsblatt der Europäischen Union, L332/34. Brüssel: Europäische Union, 2013
- EUC-01 13** Chlorine Industry Review 2012-2013. Brüssel: Euro Chlor, 2013
- EWI-09 10** Paulus, Moritz; Borggreffe, Frieder: The potential of demand-side management in energy-intensive industries for electricity markets in Germany in: Applied Energy. Köln: Institute of Energy Economics (EWI), 2010
- FFE-01 14** Gruber, Anna; Biedermann, Franziska; von Roon, Serafin: Regionale Lastmanagement-Potenziale stromintensiver Prozesse in: Paper und Vortrag beim 13. Symposium Energieinnovation in Graz. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, 2014
- FFE-01 89** Wagner, U.: Leistungs- und Lastbedarfssteuerung, in: FfE-Schriftenreihe 19:.. München: Gesellschaft für praktische Energiekunde (GfPE), München, 1989
- FFE-02 12** Schmid, Tobias; et al.: Masterplan: Optimierte Energieversorgung - Projekt im Verbund "Eneff:Stadt - Chancen und Risiken von KWK im politischen Umfeld". München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), 2012. URL: <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb14/779649419.pdf>

- FFE-04 16** Pellingner, Christoph; Schmid, Tobias; et al.: Merit Order der Energiespeicherung im Jahr 2030 - Hauptbericht. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), 2016
- FFE-05 17** Dufter, Christa; Guminski, Andrej; Orthofer, Clara; von Roon, Serafin; Gruber, Anna: Lastflexibilisierung in der Industrie – Metastudienanalyse zur Identifikation relevanter Aspekte bei der Potenzialermittlung in: Paper und Vortrag bei der IEWT 2017 in Wien. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, 2017
- FFE-06 15** Gruber, Anna; Biedermann, Franziska; von Roon, Serafin: Industrielles Power-to-Heat Potenzial in: Paper und Vortrag bei der IEWT 2015 in Wien. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, 2015
- FFE-09 13** Buber, Tim; Gruber, Anna; von Roon, Serafin; Hüneke, Marie; Klobasa, Marian; Angerer, Gerhard; Schleich, Joachim; Friedrichsen, Nele; Lüllmann, Arne: Lastmanagement als Beitrag zur Deckung des Spitzenlastbedarfs in Süddeutschland. Berlin: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) 2013
- FFE-10 14** Gruber, Anna; Biedermann, Franziska; von Roon, Serafin: The Merit Order of Demand Response in Industry in: Paper und Vortrag beim 9. ENERDAY - Conference on energy economics and technology in Dresden. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, 2014
- FFE-15 17** Samweber, Florian; Köppl, Simon; Bogensperger, Alexander; et al.: Projekt Merit Order Netz-Ausbau 2030 - Teilbericht Maßnahmenklassifizierung. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), 2017
- FFE-24 09** Beer, Michael et al.: Energiezukunft 2050, Teil I - Methodik und IST-Zustand. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., 2009
- FFE-26 16** Gruber, Anna; Von Roon, Serafin; Fattler, Steffen: Wissenschaftliche Projektbegleitung des Projektes DSM Bayern. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, 2016
- FFE-27 13** Kreuder, Lukas; Gruber, Anna; Von Roon, Serafin: Quantifying the Costs of Demand Response for Industrial Businesses in: 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, 2013

- FFE-31 14** Lernende Energieeffizienz-Netzwerke (LEEN): München-Oberbayern, Südbayern, Vorarlberg I und II, Chiemgau-Rupertiwinkel, Bayerngas, Verbund - laufende Projekte. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, 2014
- FFE-37 13** von Roon, Serafin; Steinert, Corinna: Energienetze in Bayern - Handlungsbedarf bis 2022. München: Bayerischer Industrie- und Handelskammertag BIHK e.V., Verband der Bayerischen Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (VBEW), 2013
- FFE-38 11** Gruber, Anna: Integrierte Produktpolitik (IPP) Demonstrationsvorhaben - Leitfaden zur Optimierung elektrischer Antriebe. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), 2011
- FFE-39 14** Gallet, Marc; Schmid, Tobias et al.: Globale Herausforderungen, regionale Lösungen - FfE-Regionalisiertes-Energiesystem-Modell (FREM): Flächendeckendes, räumlich und zeitlich hoch aufgelöstes Energiesystemmodell. In: BWK Ausgabe 12/2014, S. 28-33. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag, 2014
- FFE-42 10** von Roon, Serafin; Gobmaier, Thomas: Demand Response in der Industrie - Status und Potenziale in Deutschland. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (FfE), 2010
- FFE-49 16** Gruber, Anna; Biedermann, Franziska: Merit Order der Energiespeicherung im Jahr 2030 - Teilbericht: Technoökonomische Analyse Funktionaler Energiespeicher - Lastflexibilisierung in Industrie und GHD. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., 2016
- FFE-71 13** Gruber, Anna; Von Roon, Serafin; Peraus, Sebastian; Buber, Tim; Gobmaier, Thomas: Lastflexibilisierungspotenziale industrieller Querschnittstechnologien unter Berücksichtigung zunehmender Energieeffizienz - Entwicklungen des Energiebedarfs im Industriebereich in: Paper und Vortrag bei der IEWT 2013 in Wien. München: Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, 2013
- FORE-01 15** Atabay, Dennis: FOREnergy - Teilprojekt 3: Energiespeicherung und dezentrale Erzeugung in <http://forenergy.de/de/projektverbund/teilprojekte/tp3.html> (Abruf: 16.05.2016) Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6qbKRhFPa>. München: Bayerische Forschungsstiftung, 2015
- GDA-01 12** Aluminium im Dialog - GDA Jahresbericht 2012. Düsseldorf: Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V., 2012

- HAV-01 09** Haverkamp, Vico: Prädiktive dynamische Lastkontrolle für ein Elektrostahlwerk. Hamburg: Dissertation, Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg, 2009
- HOE-01 14** Hölling, Marc: Flexibilisierung von Elektrolichtbogenöfen. Persönliches Gespräch. Hamburg: ArcelorMittal Hamburg GmbH, 2014
- HYDRO-01 13** Hydro Aluminium Rolled Products GmbH, Werk Neuss in: <http://www.hydro.com/de/hydro-in-deutschland/Uber-uns/standorte/neuss/hydro-aluminium-rolled-products-gmbh-werk-neuss/> (Abruf 12.11.2013) Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6q2BhgAQB>. Grevenbroich: Hydro Aluminium Rolled Products GmbH, 2013
- IEA-01 04** Reinaud, Julia: Industrial Competitiveness under the European Union Emissions Trading Scheme. Paris: International Energy Agency (IEA) Publications, 2004
- ISI-03 09** Wille-Haussmann, Bernhard; Erge, Thomas; Klobasa, Marian: Integration von Windenergie in ein zukünftiges Energiesystem unterstützt durch Lastmanagement. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), 2009
- ISI-03 13** Rohde, Clemens: Erstellung von Anwendungsbilanzen für das Jahr 2012 für das verarbeitende Gewerbe mit Aktualisierungen für die Jahre 2009-2011. Karlsruhe: Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), 2013
- ISI-06 11** Schlomann, Barbara; Jochem, Eberhard; Andrés Toro, Felipe; Hassan, Ali: Möglichkeiten, Potenziale, Hemmnisse und Instrumente zur Senkung des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen von industriellen Branchentechnologien durch Prozessoptimierung und Einführung neuer Verfahrenstechniken. Berlin: Umweltbundesamt (UBA), 2011
- PRA-01 13** Praktijnjo, Aaron: Sicherheit der Elektrizitätsversorgung - Das Spannungsfeld von Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013
- REC-01 11** Schramek, Ernst-Rudolf: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik - einschließlich Warmwasser und Kältetechnik. München: Oldenbourg Industrieverlag GmbH, 2011
- SHN-01 16** Einspeisemanagement - Veröffentlichung abgeschlossener Maßnahmen. [Online]: <https://www.sh-netz.com/cps/rde/xchg/sh-netz/hs.xsl/2472.htm>. Schleswig-Holstein Netz, 2016

- STROMNEV-01 13** Verordnung zur Änderung von Verordnungen auf dem Gebiet des Energiewirtschaftsrechts. Berlin: Bundesregierung Deutschland, 2013
- TRI-01 14** Hauck, Heribert: Flexibilisierung von Aluminiumelektrolysezellen. Persönliches Gespräch. Essen: Trimet Aluminium SE, 2014
- TRI-02 13** Hauck, Heribert: Aluminiumelektrolyse als virtueller Stromspeicher - ein Beitrag zum Gelingen der Energiewende in: 4. Dow Jones Aluminium-Forum 2013. Essen: Trimet Aluminium AG, 2013
- TRI-04 13** Sie arbeiten mit Primäraluminium – in Voerde produzieren wir es mit großer Zuverlässigkeit in:
http://www.trimet.eu/de/ueber_trimet/standorte/voerde (Abruf: 12.11.2013) Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6q29aXU7u>. Essen: Trimet Aluminium SE, 2013
- TRI-05 13** Sie möchten unser Herzstück kennenlernen – wir stellen Ihnen unser Werk in Essen vor in:
http://www.trimet.eu/de/ueber_trimet/standorte/essen_production (Abruf: 12.11.2013) Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6q2BG6Xpb>. Essen: Trimet Aluminium SE, 2013
- TRI-06 13** Sie benötigen hochreines Aluminium – unser Hamburger Werk erfüllt die höchsten Anforderungen in:
http://www.trimet.eu/de/ueber_trimet/standorte/hamburg (Abruf: 12.11.2013) Archived by WebCite® at <http://www.webcitation.org/6q2BJ5ADv>. Essen: Trimet Aluminium SE, 2013
- TUD-03 12** von Scheven, A.; Hartkopf, T.; Prella, M.: Lastmanagementpotenziale der stromintensiven Industrie zur Maximierung des Anteils regenerativer Energien im bezogenen Strommix. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt - Fachgebiet Elektrische Energieversorgung unter Einsatz erneuerbarer Energien (TUD), 2012
- TUM-01 89** Rudolph, M.; Schaefer, H.: Elektrothermische Verfahren - Grundlagen, Technologien, Anwendungen. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 1989
- UBA-05 15** Langrock, Thomas; Achner, Sigggi; Jungbluth, Christian; Marambio, Constanze; Michels, Armin; Weinhard, Paul; Baumgart, Bastian; Otto, Achim: Potentiale regelbarer Lasten in einem Energieversorgungssystem mit wachsendem Anteil erneuerbarer Energien. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2015

- UNIKA-01 05** Stadler, Ingo: Demand Response - Nichtelektrische Speicher für Elektrizitätsversorgungssysteme mit hohem Anteil erneuerbarer Energien. Kassel: Universität Kassel, Fachbereich Elektrotechnik, 2005
- ÜNB-01 14** Netztransparenz.de - Informationsplattform der deutschen Übertragungsnetzbetreiber in:
<http://www.netztransparenz.de/de/index.htm>. 50Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TransnetBW GmbH, TenneT TSO GmbH, 2014
- ÜNB-02 16** 50Hertz Transmission GmbH; Amprion GmbH; TransnetBW GmbH; TenneT TSO GmbH: Übersicht der Änderungen der Verordnung über Vereinbarungen zu abschaltbaren Lasten (AbLaV). Bayreuth: TenneT TSO GmbH, 2016
- VCI-01 13** Chemiewirtschaft in Zahlen 2013. Frankfurt: Verband der Chemischen Industrie e. V., 2013
- VDE-01 12** Apel, Rolf: Demand Side Integration - Lastverschiebungspotenziale in Deutschland. Frankfurt am Main: Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (VDE), 2012
- VDZ-01 13** Zahlen und Daten - Zementindustrie in Deutschland 2013. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2013
- VDP-01 13** Papier 2013 - Ein Leistungsbericht. Bonn: Verband Deutscher Papierfabriken e.V., 2013
- WOB-01 05** Primer on demand-side management - with an emphasis on price-responsive programs in:
<http://documents.worldbank.org/curated/en/2005/02/16286612/primer-demand-side-management-emphasis-price-responsive-programs> (abgerufen am 26.03.2015). Washington, DC: World Bank, 2005
- WVS-01 13** Die bedeutendsten Standorte der Stahlerzeugung in Deutschland. Düsseldorf: Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2013