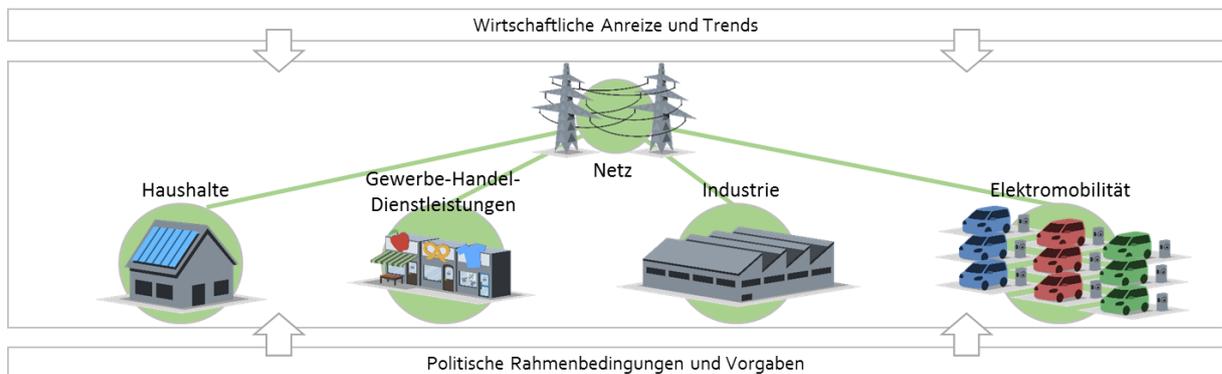


flexess

Entwicklung von Strategien und Lösungen zur Ausschöpfung zukünftiger Flexibilitätspotenziale vollelektrischer Haushalte, Gewerbe, Industrien und Elektromobilität

AP 1.2 Identifikation von Flexibilitätspotentialen - heute und zukünftig



Ersteller:

Technische Universität Braunschweig

Mattias Hadlak
Christian Reinhold
Jonathan Ries
Christine Schulze
Malte Schäfer
Lukas Siemon
Benjamin Uhlig

Förderkennzeichen:

03E14005A

Projektlaufzeit:

01.12.2019 – 30.11.2022

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

1	Potenzialanalyse im Kontext Energieflexibilität	1
1.1	Grundlagen der Potenzialanalyse im Kontext Energieflexibilität.....	1
1.2	Gesamtpotenzial zur Flexibilisierung auf Verbraucherseite	4
2	Industrie.....	8
2.1	Gesamtpotenzial zur Flexibilisierung des Energiebedarfs in der deutschen Industrie	8
2.2	Heutiges und zukünftiges Potenzial von stromintensiven Prozessen und Querschnittstechnologien	12
2.2.1	Stromintensive Prozesse.....	13
2.2.2	Produktionsinfrastruktur und Querschnittstechnologien.....	20
2.3	Identifizierung und Dokumentation aktueller Strategien zur Flexibilisierung der Wirkleistung auf Verbraucherseite	30
2.4	Zwischenfazit Industrie	31
3	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen.....	34
3.1	Gesamter Sektor	34
3.1.1	Gesamtenergieverbrauch.....	35
3.1.2	Flexibilitätspotenzial	39
3.2	Flexibilitätspotenzial der Sektorgruppen und Anwendungsbereiche.....	40
3.2.1	Flexibilitätspotenzial nach Anwendungsbereichen.....	40
3.2.2	Flexibilitätspotenzial nach Sektorgruppen.....	42
3.3	Zusammenfassung	44
4	Wohnsektor	45
4.1	Überblick	45
4.2	Technologien	46
4.2.1	Brennstoffzelle.....	46
4.2.2	Elektrische Speicherheizung	47
4.2.3	Elektrochemische Energiespeicher	48
4.2.4	Klimaanlage.....	48
4.2.5	Lüftungssystem	49
4.2.6	Mini-BHKW.....	50

4.2.7	Wärmepumpe.....	52
4.2.8	Elektromobilität.....	53
4.3	Ergebnisse	54
5	Elektromobilität.....	56
5.1	Rahmenbedingungen.....	56
5.2	Technologien	57
5.2.1	Fahrzeuge	57
5.2.2	Ladestationen.....	59
5.3	Ergebnisse	62
6	Fazit.....	64
7	Literaturverzeichnis.....	65

1 Potenzialanalyse im Kontext Energieflexibilität

Im Rahmen des vorliegenden Dokuments erfolgt eine Potenzialanalyse für die verbraucherseitige Energieflexibilität. Zu diesem Zweck werden erst einige Grundlagen erörtert, gefolgt von einer Analyse des Potenzials zur Energieflexibilisierung für die Fallstudien Industrie, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) sowie Haushalte und Verkehr und schließlich einem kurzen Fazit.

Das nachfolgende Dokument dient dazu, das Flexibilitätspotenzial auf Verbraucherseite zu analysieren. Dazu wird, je nach Informations- und Datenverfügbarkeit, das theoretische oder technische Potenzial für jede der untersuchten Fallstudien (Industrie, Gewerbe/Handel/Dienstleistungen, Haushalte, Elektromobilität) separat ermittelt. Außerdem werden, sofern bereits möglich, Strategien und Maßnahmen zur Flexibilisierung von Verbrauchern sowie Best-Available Technologies (BAT) für die betrachteten Fallstudien identifiziert.

Im folgenden Abschnitt werden zunächst einige für die Potenzialanalyse im Kontext der Energieflexibilität relevanten Grundlagen erörtert.

1.1 Grundlagen der Potenzialanalyse im Kontext Energieflexibilität

Im Kontext von Energieflexibilität auf Verbraucherseite (*Demand Response, DR*) lassen sich verschiedene **Arten von Potenzialen** unterscheiden. Gemäß der Einteilung von [DUF17] – welche für den Anwendungsbereich Industrie erstellt wurde, aber eine hohe Übertragbarkeit auf andere Sektoren aufweist – lassen sich vier verschiedene Potenzialarten unterscheiden, siehe Abbildung 1 [DUF17].

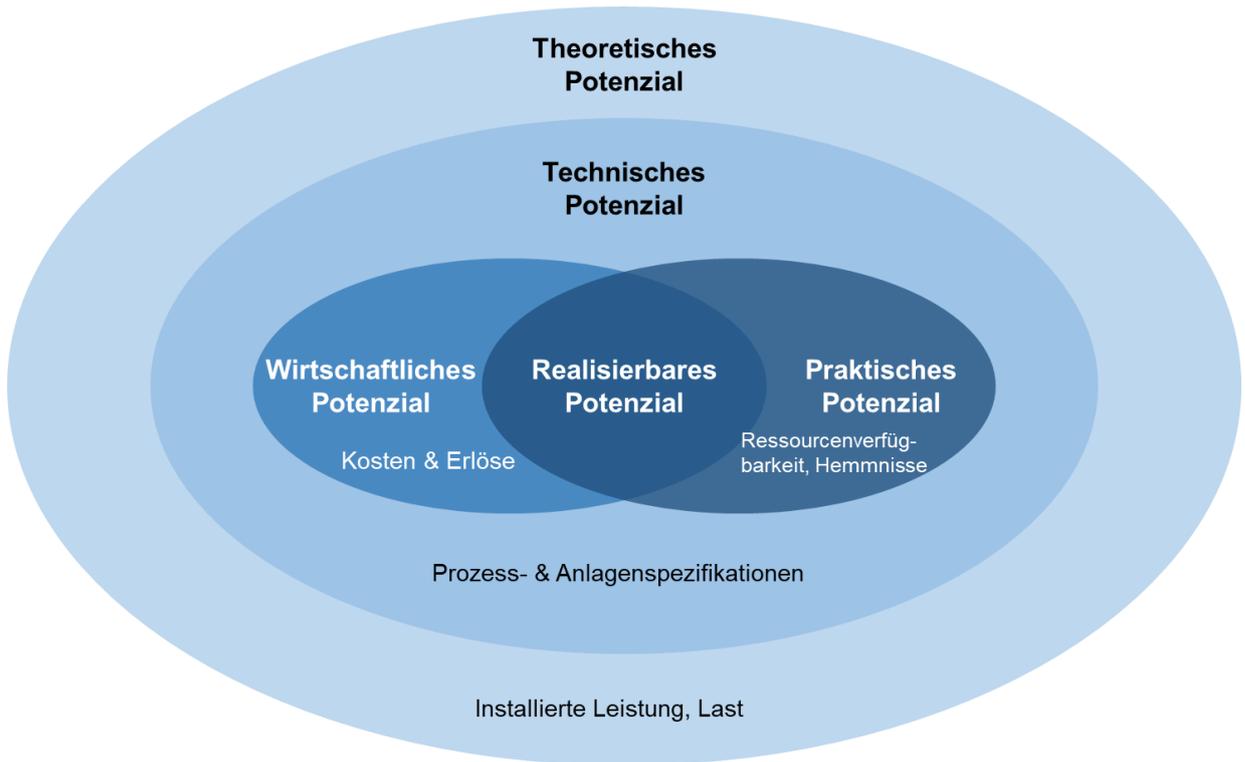


Abbildung 1: Die Beziehung zwischen den verschiedenen Potenzialbegriffen im Kontext Energieflexibilität (nach [DUF17]; (VDI-Richtlinie VDI 5207))

Die einzelnen Potenzialarten sind, wie in der VDI Richtlinie 5207 („Energieflexible Fabrik – Grundlagen“) festgehalten, wie folgt definiert (VDI-Richtlinie VDI 5207):

- *theoretisches Potenzial*: rechnerische Größe, die durch die Anschlussleistung aller Formen von Endenergie bestimmt wird
- *technisches Potenzial*: Möglichkeit, den Leistungsbedarf im Rahmen der technologischen Rahmenbedingungen zu variieren
- *wirtschaftliches Potenzial*: Anteil des technischen Potenzials, der wirtschaftlich genutzt werden kann
- *praktisches Potenzial*: Teilmenge des technischen Potenzials, worin weiche Faktoren wie regulatorische und administrative Hemmnisse berücksichtigt werden
- *realisierbares Potenzial*: Schnittmenge aus dem wirtschaftlichen und dem praktischen Potenzial

Den genannten Potenzialbegriffen lassen sich verschiedene **Parameter** zuordnen, welche es zur Potenzialbestimmung zu erheben gilt, siehe Abbildung 1 (z.B. „Installierte Leistung“). Diese Parameter sind spezifisch für den Industriesektor, lassen sich aber ohne weiteres auf die **Sektoren** Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD), Haushalte und Verkehr übertragen. Gemäß der Vorhabenbeschreibung für das Projekt flexess beschränkt sich die Potenzialanalyse im Arbeitspaket (AP) 1.2 überwiegend auf das theoretische und das technische Potenzial. Je nach Datenverfügbarkeit wird teilweise auch auf das praktische Potenzial eingegangen, dies unterscheidet sich jedoch zwischen den einzelnen Fallstudien.

Alle genannten Potenzialarten können sich dabei auf verschiedene **Zeithorizonte** beziehen. Spricht man von der flexibilisierbaren Last für aktuell installierten Anlagen unter heutigen Rahmenbedingungen, so wird dies als *Flexibilitätspotenzial* bezeichnet. Zukünftige Potenziale hingegen, die erst nach erfolgten technischen Eingriffen am Prozess umgesetzt werden können, werden als *Flexibilitätsperspektiven* bezeichnet [DUF17]. Die Beschreibung der Potenzialanalyse im AP 1.2 des flexess Projektes umfasst in allen Fallstudien das heutige Potenzial, teilweise werden im Rahmen eines Ausblicks auch Perspektiven bis 2030 aufgezeigt.

Weiterhin wird empfohlen zu unterscheiden, ob sich das ermittelte Potenzial auf eine **Lasterrhöhung** oder eine **Lastreduktion** bezieht [DUF17]. Wie aus bisherigen Studien (z.B. Projekt SynErgie) ersichtlich, können sich beide signifikant unterscheiden [ALE19]. Im Rahmen der VDI Richtlinie 5207 wird außerdem noch die Lastverschiebung als dritte Strategie erwähnt (VDI-Richtlinie VDI 5207). Wo dies auf Grund der Informations- und Datenverfügbarkeit möglich ist, wird im Rahmen der vorliegenden Potenzialanalyse auf das positive und negative Potenzial separat eingegangen (Sektor Industrie).

Zur Erhebung des Potenzials wird eine **Bottom-Up** Ermittlung über Referenzprozesse empfohlen. Dazu sollen für eine Branche repräsentative Prozesse dokumentiert, entsprechend parametrisiert und über geeignete Kennzahlen (z.B. Produktionsmenge, Stromverbrauch) hochgerechnet werden. Dabei gilt das so hochgerechnete Potenzial nicht für die gesamte Branche, sondern lediglich für den Referenzprozess [DUF17]. Dieses Vorgehen ist bei guter Datenverfügbarkeit vorzuziehen, und im Rahmen dieser Potenzialanalyse auch so angewandt.

Schließlich sollen laut Dufter et al. im Rahmen einer Potenzialanalyse außerdem noch **techno-ökonomische Differenzierungen** sowie die **zeitliche und örtliche Verfügbarkeit** berücksichtigt werden [DUF17]. Erstere beschreiben dabei z.B. Abrufdauer oder Vermarktungsoptionen. Die zeitliche Verfügbarkeit kann dadurch berücksichtigt werden, dass tageszeit-, wochentag- oder jahreszeitspezifische Lastverläufe in die Potenzialerhebung mit einfließen. Die örtliche Verfügbarkeit beschreibt die geografische Auflösung des Potenzials, z.B. auf Bundesland- oder Landkreisebene (oder auch bezogen auf des jeweiligen Übertragungs- oder Verteilnetz). Diese Aspekte der Potenzialanalyse werden teilweise in dieser Potenzialanalyse aufgegriffen (z.B. örtliche Verfügbarkeit im Sektor Industrie), und erfolgt ansonsten separat in Steckbriefen, welche projektbegleitend für ausgewählte Technologien erstellt und gepflegt werden.

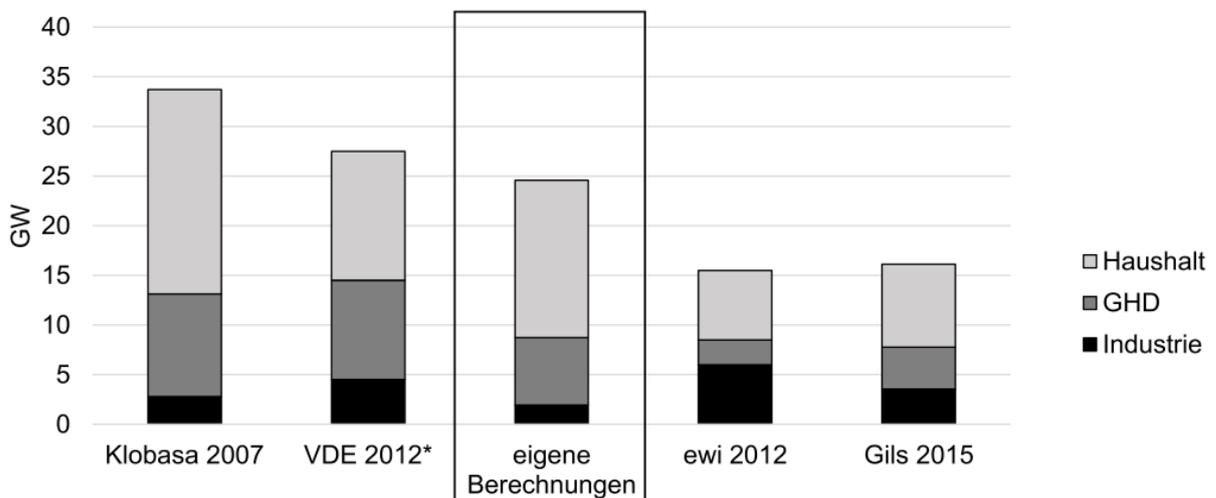
Über die Empfehlungen von Dufter et al. hinaus werden bei einigen Fallstudien, entsprechend der Vorhabenbeschreibung, noch **Strategien und Maßnahmen** zur Energieflexibilisierung identifiziert und kategorisiert. Weiterhin wird teilweise ein technologischer Ausblick in Form von **Szenarien** geboten, welche die Folgen der Implementierung von **Best-Available-Technologies (BAT)** darstellen (z.B. elektrothermische Prozesswärmebereitstellung in der Fallstudie Industrie) [DUF17].

Im nachfolgenden Abschnitt wird zunächst das sektorübergreifende Potenzial zur Energieflexibilisierung kurz dargestellt, anschließend folgt in den weiteren Kapiteln eine

detaillierte Betrachtung des Potenzials für die Fallstudien Industrie, GHD und Haushalte (inklusive Elektromobilität), sowie ein abschließendes Fazit.

1.2 Gesamtpotenzial zur Flexibilisierung auf Verbraucherseite

Im Rahmen einer Dissertation über die Rolle des *Demand Side Managements* (DSM, dieser Begriff wird hier anstatt des Begriffs Demand Response verwendet) für die Systemintegration erneuerbarer Energien in Deutschland wurde das **sektorübergreifende DSM Potenzial** in Deutschland für die Jahre 2013, 2030 und 2050 ermittelt [LAD18]. Zur Einordnung ist das durch Ladwig ermittelte Gesamtpotenzial, zunächst nur für die Gegenwart, nachfolgend im **Vergleich** zu bereits existierenden Studien abgebildet (vgl. Abbildung 2).



* VDE weist das theoretische und technische DSM-Potential für Winter und Sommer aus. Die Abbildung zeigt das technische Potential im Winter.

Abbildung 2: Berechnete DSM-Potenziale aufgeschlüsselt nach Sektoren im Literaturvergleich, ohne Elektromobilität [LAD18]

Das Ergebnis der Berechnung (ohne Berücksichtigung der Elektromobilität, im Sinne der Vergleichbarkeit) liegt mit knapp 25 GW genau im Mittelfeld aller Studien. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Studien sind u.a. auf methodische Besonderheiten zurückzuführen, z.B. die separate Ausweisung von positivem und negativem Potenzial sowie die separate Betrachtung von Sommer und Winter.

Grundsätzlich stehen auf Verbraucherseite drei Strategien zur Energieflexibilisierung zur Auswahl, **Lastabschaltung, -erhöhung und -verschiebung**. Dabei stellt genau genommen die letzte eine Kombination der ersten beiden dar (vgl. Abbildung 3).

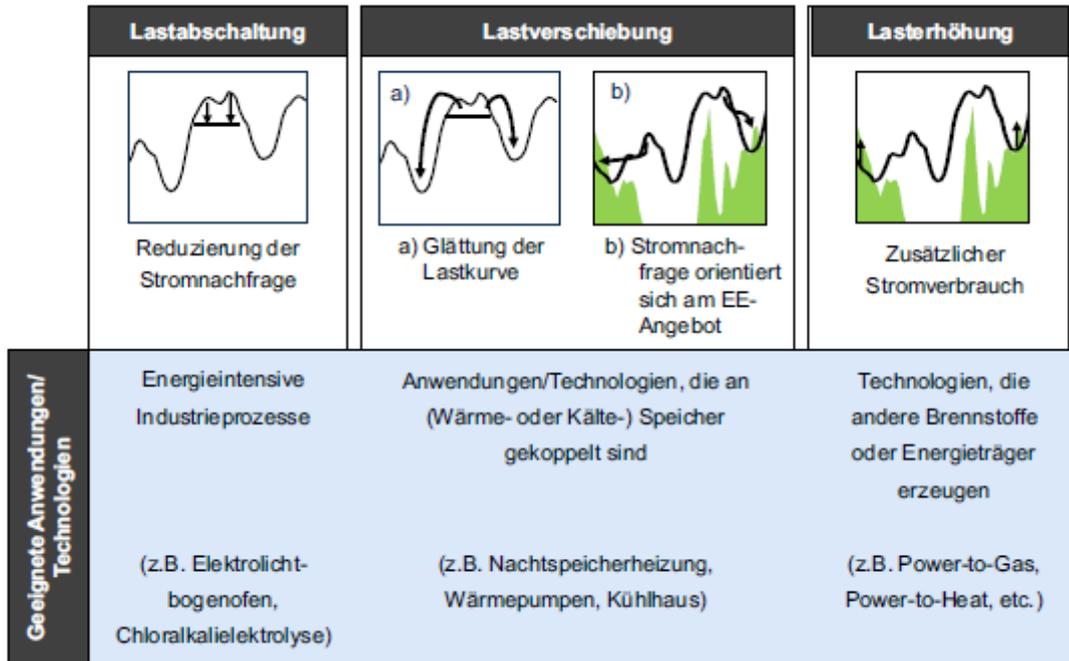


Abbildung 3: Abgrenzung der Begriffe Lastabschaltung, -verschiebung und -erhöhung [LAD18]

Das Ziel ist i.d.R. jeweils die Anpassung der Stromnachfrage am Angebot an der Stromproduktion aus erneuerbarer Energie. Die gezeigten Strategien sind dabei sektorunabhängig, und können sowohl in der Industrie, in gewerblichen Betrieben, in Haushalten, und im Verkehrssektor angewendet werden.

Die Potenziale für **Lastabschaltung und Lastverschiebung** werden von Ladwig separat ausgewiesen, aufgeschlüsselt nach Technologie, für die Jahre 2013, 2030 und 2050 (vgl. Abbildung 4).

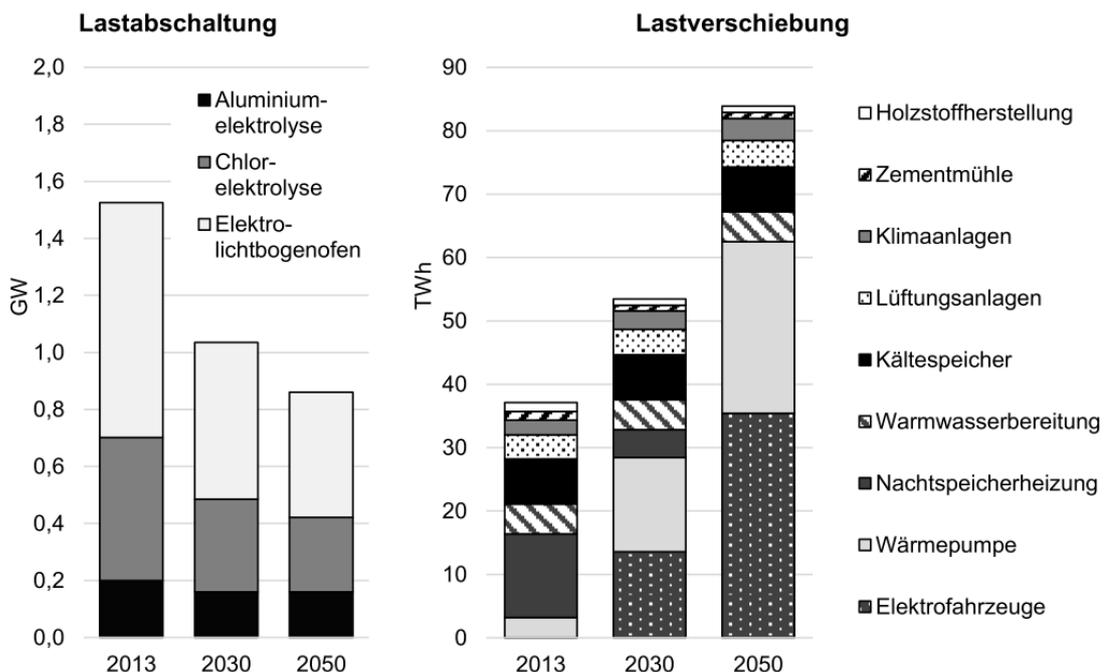


Abbildung 4: Aktuelles und zukünftiges Potenzial zur Lastabschaltung (links) und Lastverschiebung (rechts) im Referenzszenario [LAD18]

Während das Potenzial zur Lastabschaltung über die Jahre abnimmt, nimmt das Potenzial zur Lastverschiebung deutlich zu. Zu beachten sind die unterschiedliche Messgrößen – für die Lastabschaltung wird die Leistung (in MW) erfasst, für die Lastverschiebung die Energiemenge (in TWh).

Diese Werte sind naturgemäß mit Unsicherheiten und Variabilitäten behaftet, einem Umstand, dem durch die Berücksichtigung verschiedener **Szenarien** Rechnung getragen wird (vgl. Abbildung 5).

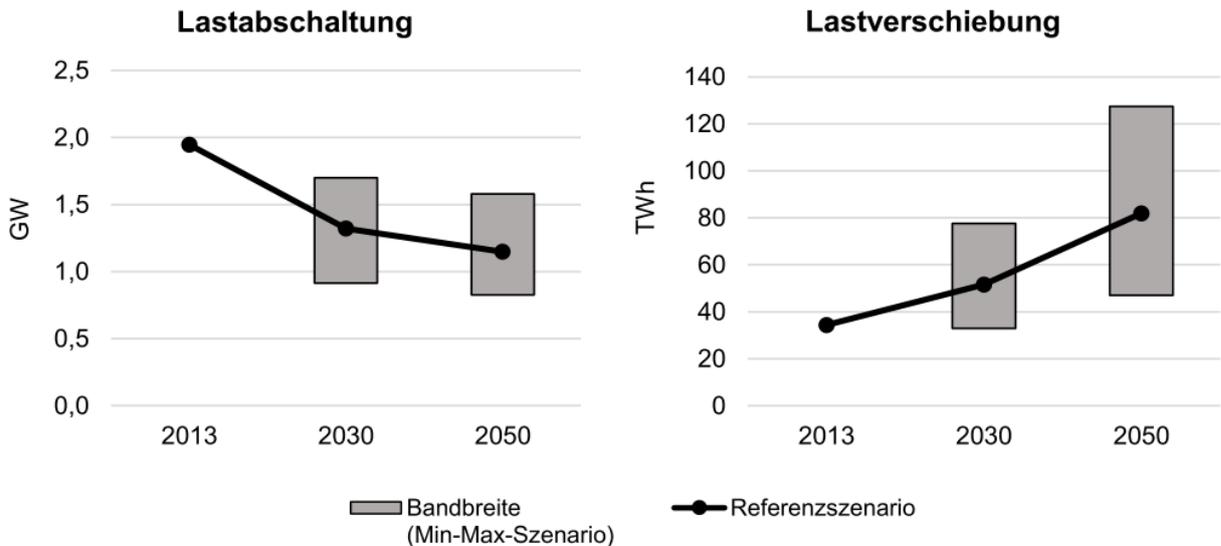


Abbildung 5: Entwicklung des Lastabschaltungs- und -verschiebepotenzials in den Szenarien [LAD18]

Die Bandbreite der Ergebnisse streut relativ gleichmäßig nach oben und unten um das Referenzszenario herum. Für die Lastverschiebung beträgt sie für das Jahr 2050 nahezu +/- 50 %.

Auf das Lasterhöhungspotenzial wird nur indirekt, durch die Betrachtung der Potenziale von Power-to-Gas und Power-to Heat eingegangen. Nachfolgend ist zum abschließenden **Vergleich des Lastabschaltungs-, -verschiebungs- und -erhöhungspotenzials** für verschiedene betrachtete Szenarien zusammengefasst (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: DSM Potenzial für verschiedene Szenarien (Daten aus [LAD18])

		EE60		EE80	
		DSM50	DSM100	DSM50	DSM100
Lastabschaltung	GW	0,52	1,03	0,43	0,86
Lastverschiebung	TWh	26,73	53,46	41,94	83,87
Lasterhöhung	GW	19,38	38,76	29,46	58,92

EE60 und EE80 beschreiben dabei Szenarien mit einem Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung von 60 % bzw. 80 %, welche den prognostizierten Zustand in den Jahren 2030 respektive 2050 widerspiegeln sollen. DSM50 und DSM100 beschreiben Szenarien mit einem Ausnutzungsgrad des DSM Potenzial von 50 % bzw. 100 %. Es zeigt sich, dass das

Potenzial zur Lasterhöhung über alle Szenarien hinweg deutlich größer ist als das zur Lastabschaltung. Sämtliche Potenziale nehmen mit einem höheren Anteil erneuerbarer Energien zu, ebenso wie mit einer höheren Ausnutzung des DSM-Potenzials.

Zur Einordnung: der Stromverbrauch über alle Sektoren hinweg betrug im Jahr 2018 513 MWh [UMW20]. Demnach beträgt das beschriebene, mögliche zukünftige Lastverschiebungspotenzial 5 % (EE60/DSM50) bis 16 % (EE80/DSM100) des heutigen Stromverbrauchs.

In den **folgenden Kapiteln** wird im Detail auf das Flexibilisierungspotenzial der einzelnen Fallstudien im Projekt flexess, welche die verschiedenen Sektoren repräsentieren, eingegangen.

2 Industrie

In diesem Kapitel werden die Potenziale zur Energieflexibilisierung in der deutschen **Industrie** beschrieben und quantifiziert. Dazu wird im ersten Abschnitt (2.1) das Potenzial der einzelnen Wirtschaftszweige und Bundesländer aufgezeigt, relevante Parameter wie Abrufdauer und -häufigkeit eingeführt, und schließlich das Gesamtpotenzial ermittelt. Dieses wird anschließend separat für die beiden Unterbereiche der branchenspezifischen stromintensiven Prozesse, sowie der branchenübergreifenden Querschnittstechnologien im Detail analysiert (Abschnitt 2.2). Darauf folgt eine Identifizierung und Dokumentation aktueller Strategien zur Flexibilisierung der Wirkleistung auf Verbraucherseite (Abschnitt 2.3). Das Kapitel schließt mit einem kurzen Zwischenfazit (2.4).

Das vorliegende Kapitel stützt sich im Wesentlichen auf den Abschlussbericht des Kopernikusprojektes „SynErgie“, die Dissertation von Gruber (2017) sowie die VDI Richtlinie 5207 [ALE19], [ANN17], (VDI-Richtlinie VDI 5207).

2.1 Gesamtpotenzial zur Flexibilisierung des Energiebedarfs in der deutschen Industrie

Zunächst ist nachfolgend dargestellt, wie hoch der **Stromverbrauch** und die **Stromintensität** der einzelnen **Industriebranchen** in Deutschland ist (vgl. Abbildung 6).

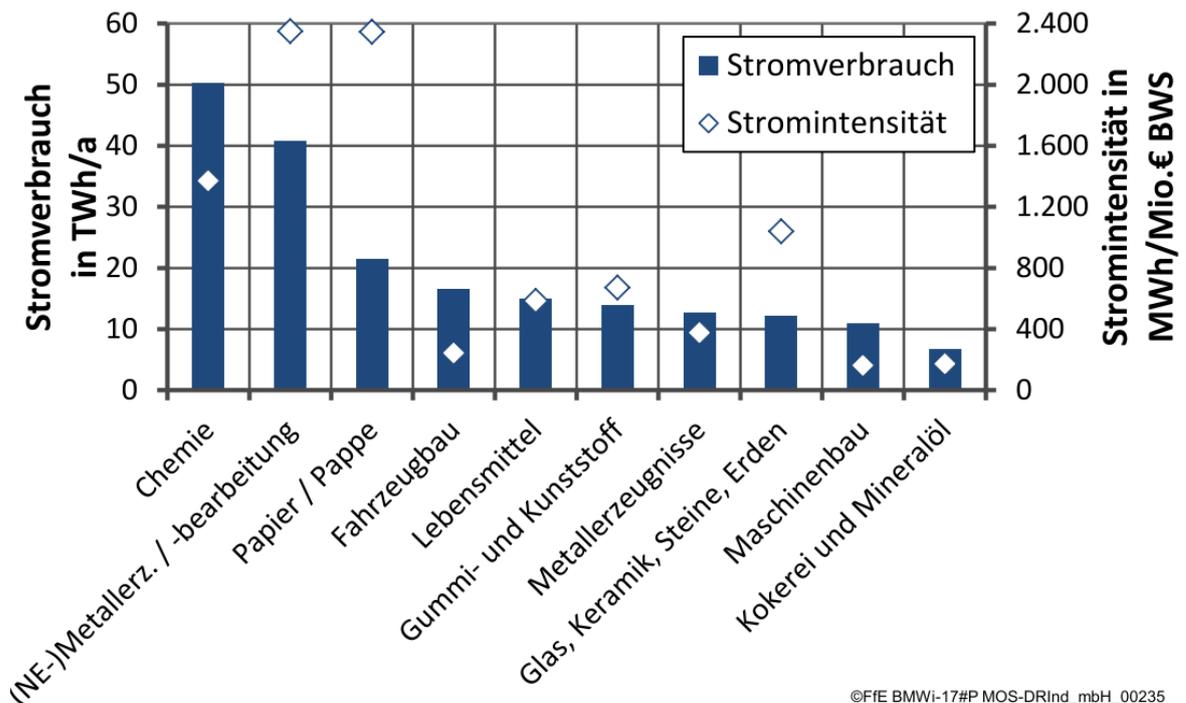


Abbildung 6: Stromverbrauch und Stromintensität ausgewählter Branchen im Jahr 2010 [ANN17]

Es zeigt sich, dass Chemie und Metallherzeugung bzw. -bearbeitung den höchsten Stromverbrauch (in TWh/a) aufweisen, während Metallherzeugung und -bearbeitung sowie Papier/Pappe die höchste Stromintensität (in MWh/Mio. € Bruttowertschöpfung) besitzen.

Räumlich gliedert sich der Stromverbrauch dabei wie in der nachfolgenden Abbildung dargestellt (vgl. Abbildung 7).

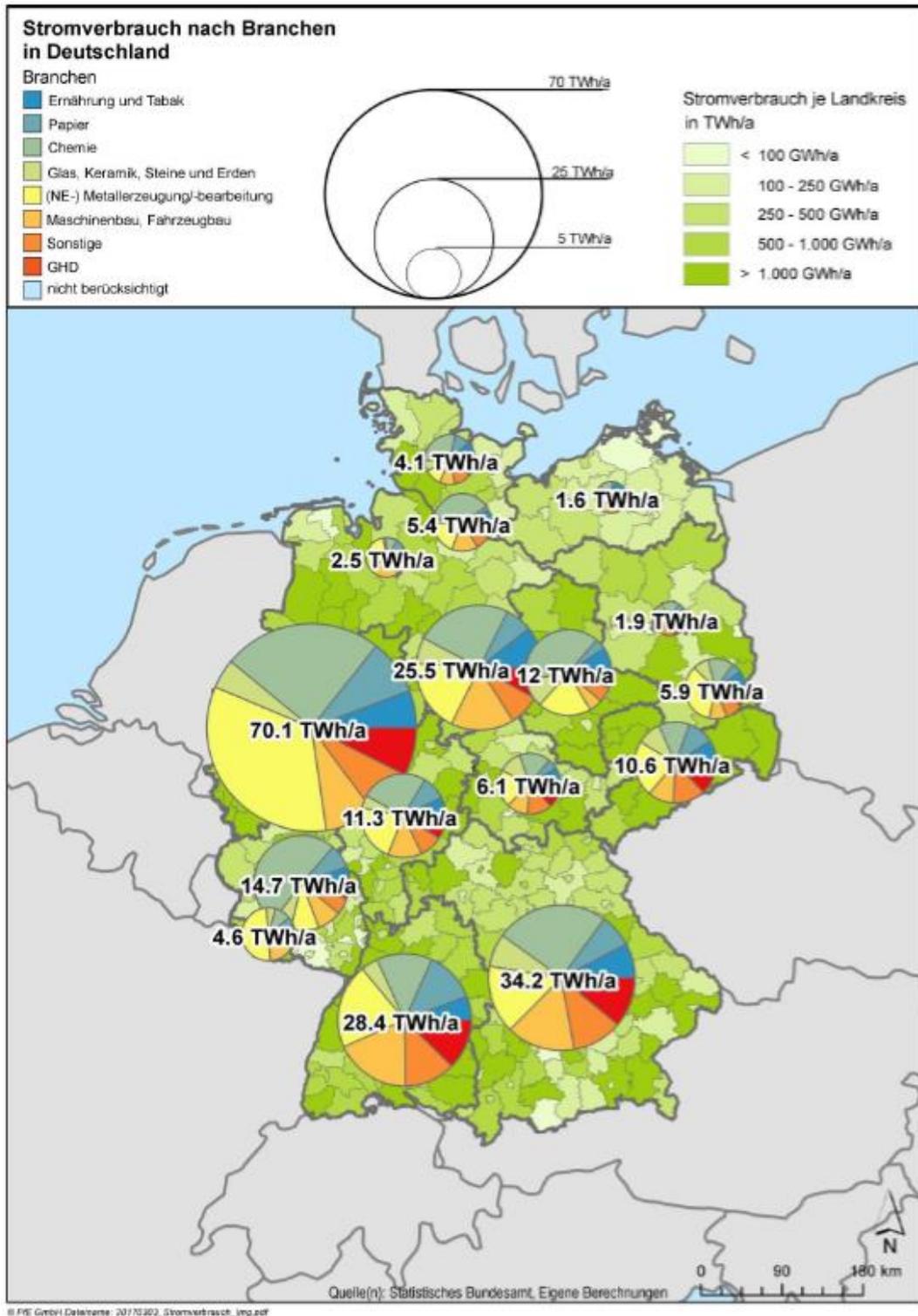


Abbildung 7: Stromverbrauch der Industrie nach Bundesländern und Branchengruppen für das Jahr 2012 [ANN17]

Den höchsten Stromverbrauch weist demnach die Industrie in Nordrhein-Westfalen auf, gefolgt von der Industrie in Bayern mit einem etwa halb so hohen Stromverbrauch.

Die nachfolgenden Auswertungen beziehen sich größtenteils auf die vier Branchen „Metallerzeugung und -bearbeitung“, „Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus“, „Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden“ sowie „Herstellung von chemischen Erzeugnissen“, welche die **stromintensivsten Branchen** darstellen (vgl. Abbildung 8).

Die Potenzialanalyse im Rahmen des Aufarbeitens des Stands der Forschung im Projekt „SynErgie“ hat dabei ergeben, dass sich die Potenziale zur **Lasterhöhung** und zum **Lastverzicht** in diesen vier Branchen wie folgt darstellen (vgl. Abbildung 8).

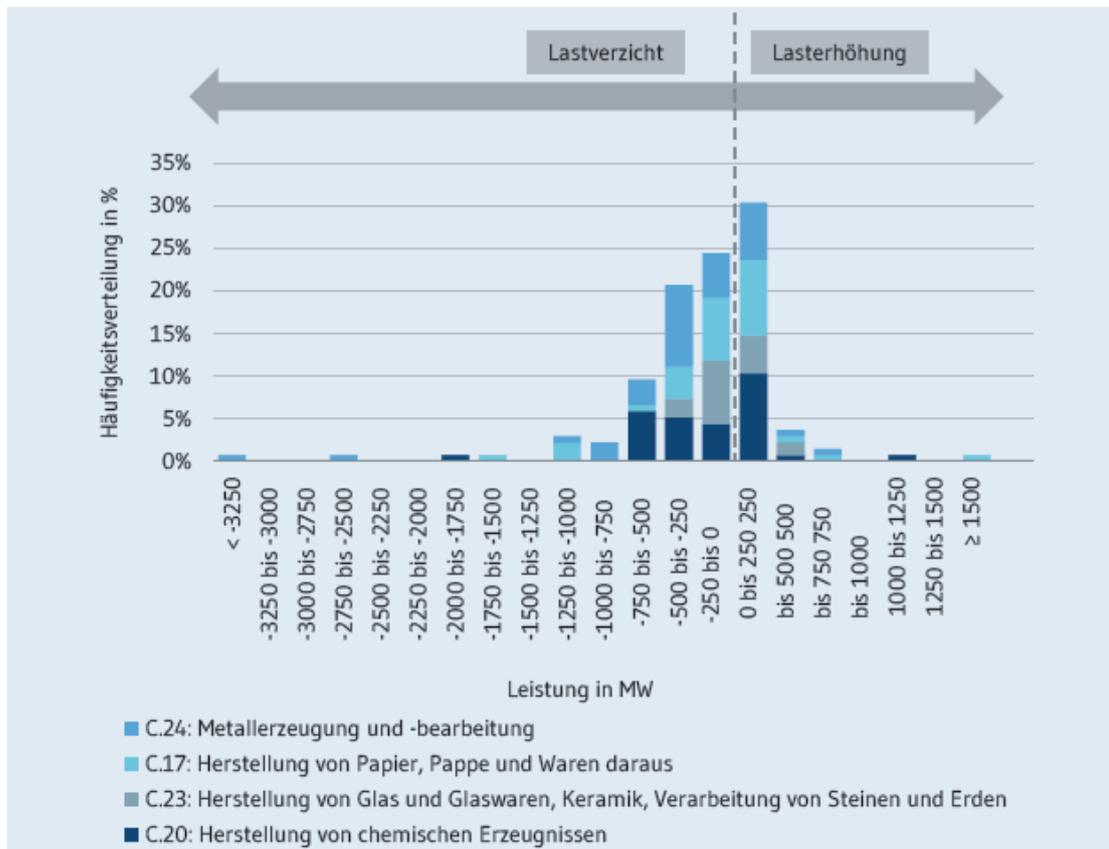


Abbildung 8: Verteilung der Laständerung, differenziert nach Wirtschaftszweigen (135 Datensätze aus 13 Studien) [ALE19]

Die Darstellung, welche auf 135 Datensätzen aus 13 Studien basiert, zeigt, dass sich die Häufigkeitsverteilung von einem Lastverzicht mehr als 3250 MW bis hin zu einer Lasterhöhung von über 1500 MW erstreckt. Die größte Häufung findet sich im Bereich zwischen 0 und +250 MW (Lasterhöhung).

Neben der Höhe der Laständerung ist weiterhin die **Abrufdauer** relevant. Im Rahmen der zuvor genannten Literaturrecherche und -analyse wurde diese ebenfalls analysiert (vgl. Abbildung 9).

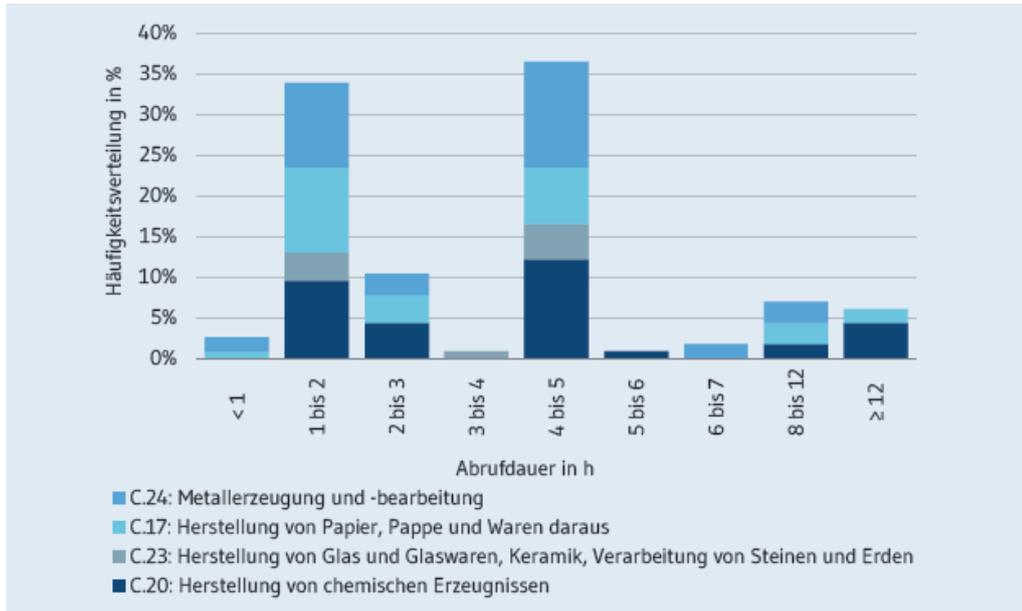


Abbildung 9: Häufigkeitsverteilung der Abrufdauer, differenziert nach Wirtschaftszweigen (115 Datensätze aus 9 Studien) [ALE19]

Die in 115 Datensätzen aus neun Studien am Häufigsten vorkommende Abrufdauer liegt in den Intervallen zwischen vier und fünf sowie ein und zwei Stunden. Nur selten werden Abrufdauern von über 12 Stunden genannt.

In enger Verbindung zur Abrufdauer steht die **Abrufhäufigkeit** von Maßnahmen im Kontext der Energieflexibilisierung. Auch diese wurde im Rahmen von „SynErgie“ betrachtet (vgl. Abbildung 10).

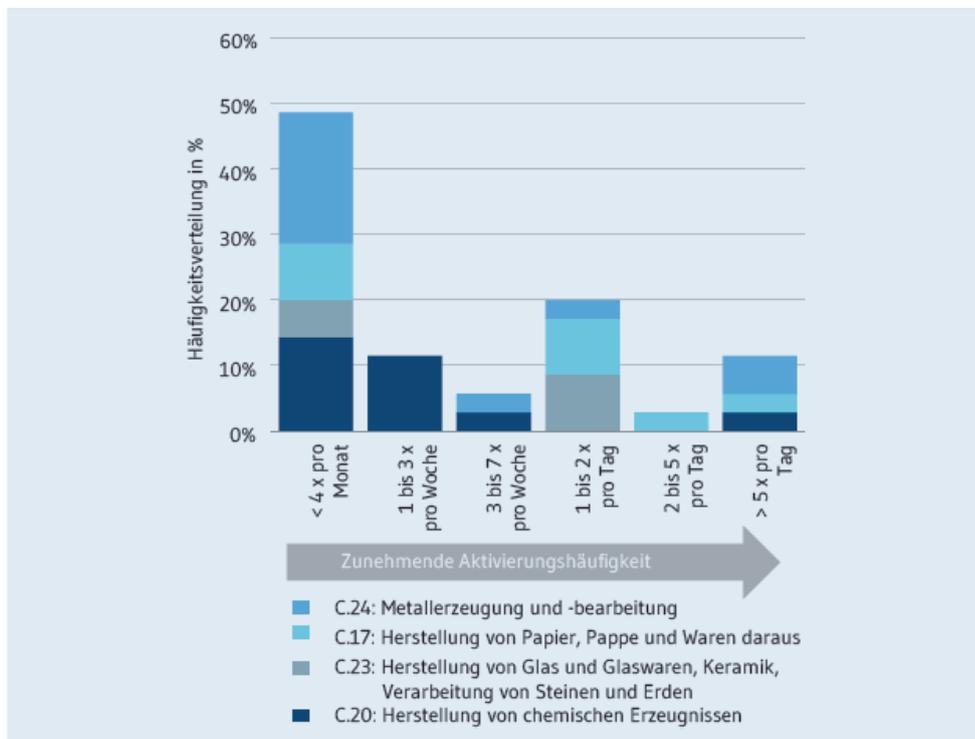


Abbildung 10: Häufigkeitsverteilung der Abrufhäufigkeit pro Jahr, differenziert nach Wirtschaftszweigen (35 Datensätze aus 6 Studien) [ALE19]

Nahezu die Hälfte der 35 Datensätze aus sechs Studien weist eine Aktivierungshäufigkeit von weniger als vier Mal pro Monat auf. Abrufhäufigkeiten von mehr als fünf Mal pro Tag sind dabei relativ selten (ca. 11 %).

Die eigens durchgeführte Potenzialanalyse im Projekt „SynErgie“ basiert auf 15 Teilprojekten aus verschiedenen Industrien (Elektrolyse, Stahl-Industrie, Luftzerlegung, Energieflexible Graphitherstellung, Flexibilisierung in biologischen und chemischen Reaktionen, Energieflexibles Automobilwerk, Bivalenter Zulieferer, Lebensmittelindustrie, Papierindustrie, Energieflexibilisierung in der Spezialglasindustrie, Glas-Industrie, Maschinen- und Anlagenbau, Feuerfest-Industrie, Zement-Industrie, Chemie-Industrie), aus Basis derer im Rahmen einer **Bottom-Up-Vorgehensweise** das Gesamtpotenzial zur Energieflexibilisierung für die deutsche Industrie ermittelt wurde. Das **Ergebnis** dieser Potenzialanalyse ist in der nachfolgenden Tabelle festgehalten (vgl. Tabelle 2) [ALE19].

Tabelle 2: Ergebnisse der Flexibilitätspotenzialanalyse (Daten aus [ALE19])

Art der Laständerung	Beschreibung	Wert
Lasterhöhung	Maximale Leistung bis 1,2 min Abrufdauer	2,71 GW
	Maximale Leistung bis 15 min Abrufdauer	1,09 GW
	Max. flexibilisierbare Energie (1,2 min Abrufdauer)	3,37 TWh/a
Lastverzicht	Maximale Leistung bis 5 min Abrufdauer	3,98 GW
	Maximale Leistung bis 15 min Abrufdauer	2,45 GW
	Max. flexibilisierbare Energie (5 min Abrufdauer)	7,46 TWh/a

Die ermittelte maximale Leistung fällt dabei sowohl für die Lasterhöhung als auch den Lastverzicht deutlich höher aus als in vorherigen Studien (für 15 min Abrufdauer: SynErgie – 1,09 GW / 2,45 GW, vorherige Studien – 0,6 GW / 1,63 GW). Dies ist vor allem auf die zusätzliche Berücksichtigung von kleineren, in hoher Anzahl vorhandenen, Stromverbrauchern zurückzuführen.

Im folgenden Abschnitt wird näher auf einzelne, für eine flexible Betriebsweise besonders geeignete, Prozesse in den genannten vier stromintensivsten Branchen eingegangen. Außerdem werden einige Querschnittstechnologien betrachtet, welche sich über verschiedenen Branchen hinweg in einer Vielzahl von Betrieben wiederfinden.

2.2 Heutiges und zukünftiges Potenzial von stromintensiven Prozessen und Querschnittstechnologien

Im Hinblick auf die Energieflexibilisierung in der deutschen Industrie erscheint es sinnvoll, zwischen **stromintensiven Prozessen** sowie **Querschnittstechnologien** zu unterscheiden. Erstere beschreiben branchenspezifische Prozesse und Anlagen, die mit hohen Spitzenlasten,

und daher bei hoher Auslastung auch häufig mit einem hohen Energiebedarf einhergehen. Aus diesem Grund waren diese Prozesse in der Vergangenheit auch schon mehrfach im Fokus von Studien zum Thema Energieflexibilisierung. Unter Querschnittstechnologien versteht man Geräte und Anlagen, die im Vergleich zu stromintensiven Prozessen einen deutlich geringeren Energiebedarf aufweisen, dafür aber in einer Vielzahl verschiedener Branchen eingesetzt werden und in deutlich größerer Anzahl vorhanden sind. Im Vergleich zum konzentrierten Potenzial stromintensiver Prozesse, welches sich auf wenige Anlagen verteilt, stellen Querschnittstechnologien ein dispergiertes Energieflexibilisierungspotenzial dar. Nachfolgend wird zunächst auf die Beschreibung und das Potenzial stromintensiver Prozesse eingegangen, anschließend wird dies für Querschnittstechnologien durchgeführt.

2.2.1 Stromintensive Prozesse

Stromintensive Prozesse finden sich vor allem in den zuvor bereits genannten vier Industriezweigen Metall, Papier, Glas und Chemie. In der nachfolgenden Tabelle sind **Branche, Verfahren bzw. Produktionsschritt** sowie die besonders für die Flexibilisierung geeigneten **Anlagen bzw. Komponenten** des Systems dargestellt (vgl. Tabelle 3).

Tabelle 3: Flexibilisierbare Systemkomponenten stromintensiver Einzelprozesse (nach [ANN17])

Branche (Klassifizierung nach WZ2008)*	Verfahren / Produktionsschritt	Flexibilisierbare Anlagen bzw. Komponenten des Systems
Metallerzeugung und -bearbeitung	Aluminiumelektrolyse	Aluminiumelektrolysezellen
	Elektrostahlherstellung	Lichtbogenofen
	Schmelzen von Gusswerkstoffen	Induktionstiegelofen
	Kupfer- / Zinkelektrolyse	Elektrolyse (elektrolytische Veredelung von Kupfer und Zink)
Herstellung von Papier, Pappe und Waren daraus	Holzstoffherstellung	Holzschleifer, Refiner (TMP-Verfahren**)
	Altpapier-/ Zellstoffauflösung	Pulper
	Papierherstellung	Papiermaschine
Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden	Klinker- und Zementherstellung	Roh- und Zementmühlen
	Glasschmelzen	Elektrische Zusatzbeheizung des Wannens (Glasschmelzen)
Herstellung v. chem. Erzeugnissen	Chlorelektrolyse	Chlorelektrolysezellen
	Luftzerlegung	Kompressoren f. Luftverdichtung

* Klassifikation der Wirtschaftszweige nach /DESTATIS-07 08/

** Thermomechanische Holzstoffherstellung

Die Auswahl basiert auf diversen Vorarbeiten zum Thema Energieflexibilisierung in der Industrie in Deutschland.

2.2.1.1 Methodik

Im Rahmen der Arbeit von Gruber [ANN17] wurde das Energieflexibilisierungspotenzial für stromintensive Prozesse in der deutschen Industrie ermittelt. Das **Vorgehen** dazu ist in der folgenden Abbildung festgehalten (vgl. Abbildung 11).

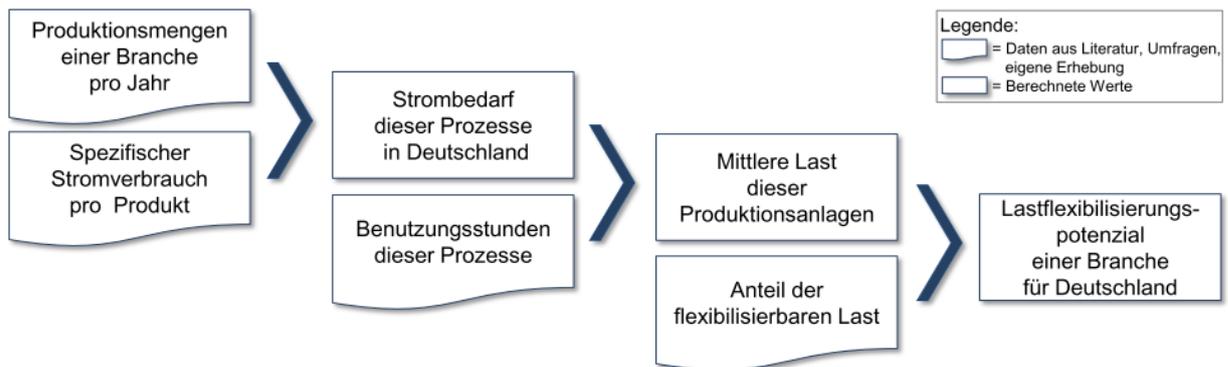


Abbildung 11: Methodik zur Lastverschiebe-Potenzialermittlung bei stromintensiven Prozessen [ANN17]

Das Vorgehen basiert auf Branchen- und Unternehmensdaten, welche teils öffentlich verfügbar sind, teils im Rahmen eines Forschungsprojekts erhoben und teils abgeschätzt wurden. Dabei wurden folgende **Parameter** für die Potenzialermittlung verwendet (vgl. Tabelle 4).

Tabelle 4: Stromintensive Prozesse: verwendete Parameter für die Potenzialermittlung (Daten aus [ANN17])

	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
	Holz- schleifer	Refiner	Chlorelektro- lyse (Amalgam)	Chlorelektro- lyse (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	7.444	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

Um neben einem absoluten Potenzial auch die **räumliche Verteilung** dieses Potenzials innerhalb von Deutschland zu ermitteln, wurde zusätzlich auch der Standort der Betriebe berücksichtigt, um so zu einem regional verteilten Lastflexibilisierungspotenzial zu gelangen. Das Vorgehen dazu ist in der nachfolgenden Abbildung dokumentiert (vgl. Abbildung 12).



Abbildung 12: Ableitung der regionalen Verteilung des Lastverschiebepotenzials bei stromintensiven Prozessen [ANN17]

Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind im nachfolgenden Abschnitt dokumentiert.

2.2.1.2 Ergebnis

Das positive (Lastreduktion) und negative (Lasterhöhung) **Potenzial für acht ausgewählte stromintensive Prozesse**, ermittelt nach der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Methode, ist nachfolgend beschrieben (vgl. Tabelle 5).

Tabelle 5: Positives und negatives Lastflexibilisierungspotenzial stromintensiver Prozesse im Falle der Lastverschiebung (Daten aus [ANN17])

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

Es zeigt sich, dass das Potenzial zur Lastreduktion durchgehend deutlich höher (105 – 957 MW) als das zur Lasterhöhung (0 – 227 MW) ist. Das höchste Potenzial zur Lastreduktion weisen Elektrolichtbogenöfen auf, das höchste Potenzial zur Lasterhöhung die Chlorelektrolyse.

Bei dem dargestellten technischen Potenzial sind jedoch noch zusätzliche Aspekte zu berücksichtigen, welche einen Einfluss auf die **zeitliche Verfügbarkeit** haben. Diese betreffen den Lastgradienten, die Abrufdauer, Sperrzeiten, die Abrufhäufigkeit sowie Einflüsse der Tageszeit, des Tagestyps und der Jahreszeit. Diese unterscheiden sich teils je nach Technologie und sind im Detail in [ANN17] dokumentiert.

Weiterhin ist zu beachten, dass sich je nach Abrufhäufigkeit und Technologie auch der **Gesamtwirkungsgrad** der Anlagen und Prozesse verändert. Diese Veränderung kann sowohl positiv als auch negativ ausfallen, und beeinflusst die Wirtschaftlichkeit sowie die Umweltbilanz beim flexiblen Betrieb von industriellen Anlagen. Details zu den Wirkungsgradveränderungen finden sich in [ANN17].

Neben der zeitlichen Verfügbarkeit wurde auch die **räumliche Verfügbarkeit** betrachtet. Da sich stromintensive Prozesse auf relativ wenige Betriebe innerhalb Deutschlands konzentrieren, lassen sich die Lastflexibilisierungspotenziale vergleichsweise gut den einzelnen Landkreisen zuordnen. Das räumlich aufgelöste Potenzial aller betrachteter stromintensiver Prozesse ist in der nachfolgenden Abbildung (vgl. Abbildung 13) dargestellt.

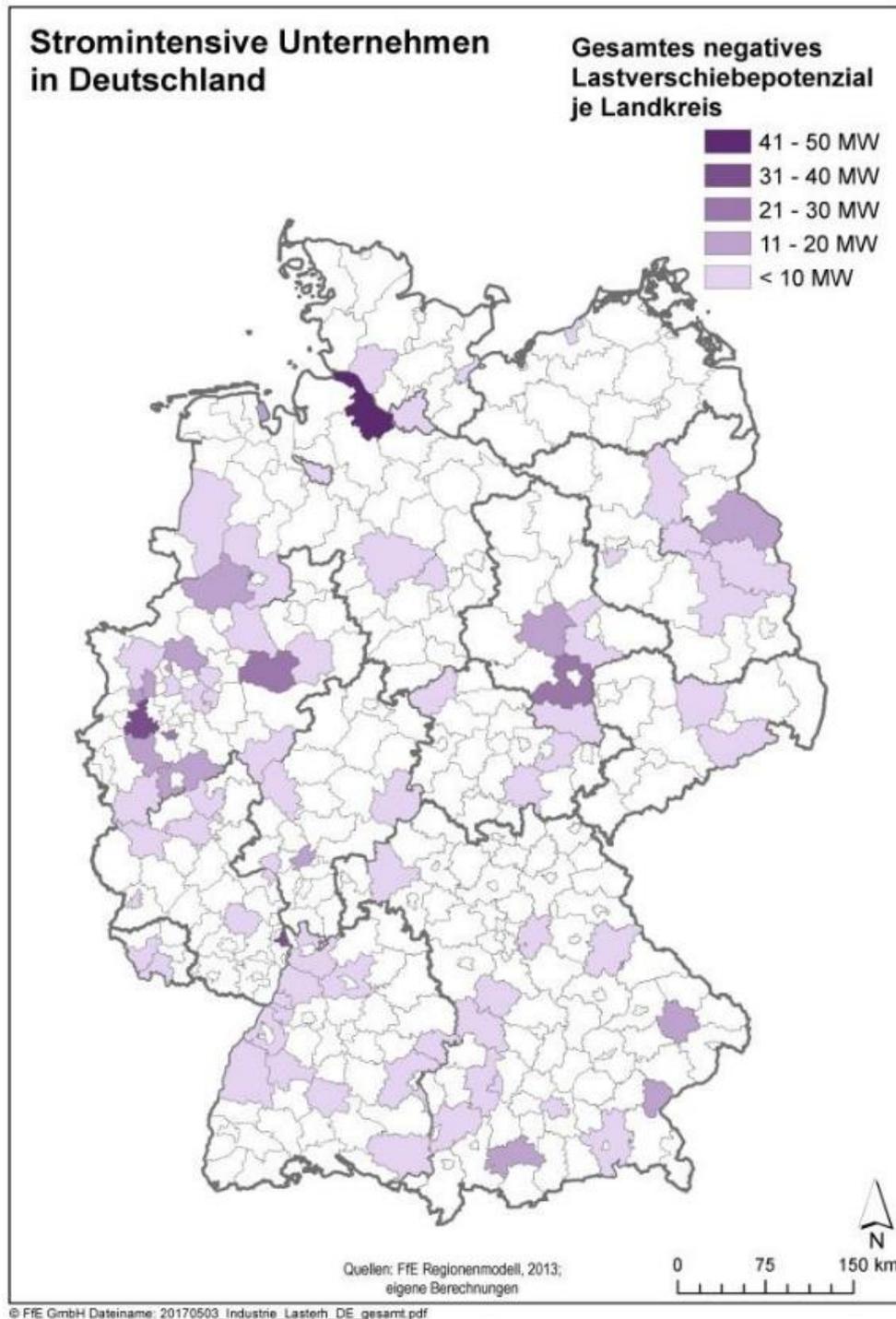


Abbildung 13: Regionales negatives Lastflexibilisierungspotenzial aller betrachteten stromintensiven Prozesse [ANN17]

Wenig überraschend ist die starke Häufung in Nordrhein-Westfalen, wo eine hohe Dichte an Industriebetrieben vorliegt. Das hohe Potenzial in Stade (westlich von Hamburg) ist auf eine Chlorelektrolyseanlage zurückzuführen.

Neben einer Ermittlung des aktuellen Energieflexibilisierungspotenzials wurde im Rahmen der Arbeit auch ein Ausblick für das **zukünftige Potenzial** bis zum Jahr 2030 erstellt. Dieser ist im nachfolgenden Abschnitt dokumentiert.

Ausblick bis 2030

Dem Ausblick des Energieflexibilisierungspotenzials bis zum Jahr 2030 liegen einige **Annahmen** zu Grunde. Diese sind in den beiden nachfolgenden Abbildungen dokumentiert (vgl. Abbildung 14 & Abbildung 15).

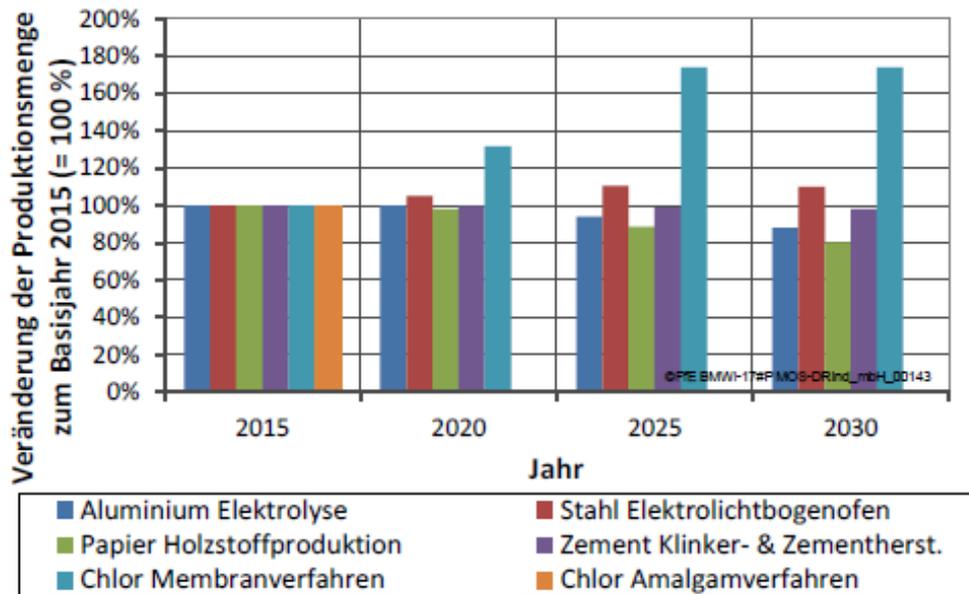


Abbildung 14: Produktionsentwicklung bis 2030 [ANN17]

Es wird angenommen, dass die **Produktionsmengen** für Stahl leicht und für Chlor (Membranverfahren) deutlich zunehmen, während die Produktionsmengen für Aluminium und Papier leicht abnehmen. Für Zement wird ein annähernd konstanter Verlauf angenommen. Ferner wird angenommen, dass zukünftig kein Chlor mehr im Amalgamverfahren in Deutschland produziert wird.

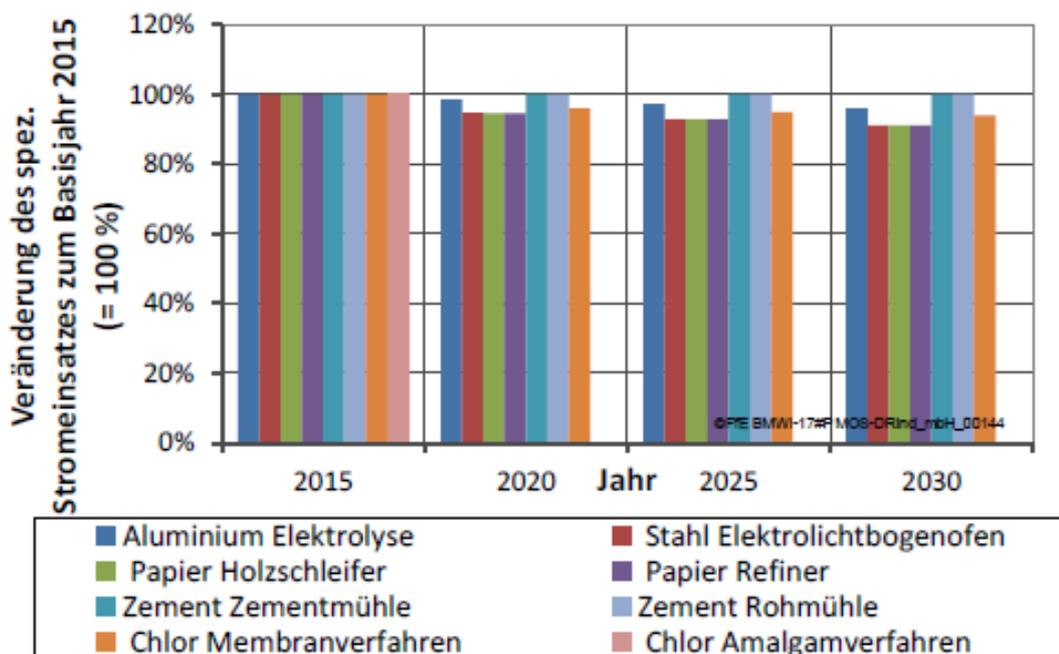


Abbildung 15: Entwicklung des spez. Stromeinsatzes bis 2030 [ANN17]

In Hinblick auf den spezifischen **Stromeinsatz** wird für alle Verfahren außer für die Zementherstellung angenommen, dass dieser bis 2030 leicht sinkt (Abnahme von < 10% bis 2030).

Basierend auf diesen Annahmen ergeben sich bis zum Jahr 2030 positive und negative **zukünftige Potenziale**, die in der nachfolgenden Tabelle festgehalten sind (vgl. Tabelle 6).

Tabelle 6: Entwicklung des Lastflexibilisierungspotenzials stromintensiver Prozess bei Lastverschiebung bis 2030 (Daten aus [ANN17])

Pos. 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	<u>2.405</u>	<u>2.329</u>	<u>2.436</u>	<u>2.355</u>

Neg. 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	<u>531</u>	<u>499</u>	<u>574</u>	<u>562</u>

Das deutlich zunehmende Lastflexibilisierungspotenzial der Chlorelektrolyse ist dabei vor allem auf die erwartete zunehmende Produktionsmenge zurückzuführen. Für alle anderen Prozess sind eher geringe Veränderungen zu erwarten.

Neben einem flexiblen Betrieb bestehender Anlagen besteht weiterhin die Möglichkeit, durch **Elektrifizierung bzw. Hybridisierung** von heute mit Brennstoffen (z.B. Erdgas) betriebenen Prozessen das Flexibilisierungspotenzial energieintensiver Prozesse in der Industrie zukünftig zu steigern. Praktisch geeignet für eine Flexibilisierung scheinen dabei nur zehn von 33 analysierten Verfahren. Einige Verfahren sind nicht berücksichtigt, da etwa der Brennstoff auch als Grundstoff benötigt wird, oder ein Anlagenneubau notwendig wäre (z.B. Koksherstellung, Stahlerzeugung im Hochofen, Primärkupferherstellung).

Bei einem Brennstoffverbrauch von 420 TWh für die industrielle Prozesswärmeerzeugung verbleiben damit ca. 180 TWh, welche für die Elektrifizierung und Hybridisierung geeignet sind. Nachfolgend ist dargestellt, wie sich in einem solchen **Szenario** der Gesamtenergiebedarf zukünftig entwickeln würde, und wie sich dieser auf die einzelnen Energieträger aufteilt. Neben einer Implementierung elektrothermischer Verfahren ist dabei außerdem ein Szenario dargestellt, in dem zusätzlich Wärmepumpen für Temperaturniveaus bis 140 °C eingesetzt werden (vgl. Abbildung 16).

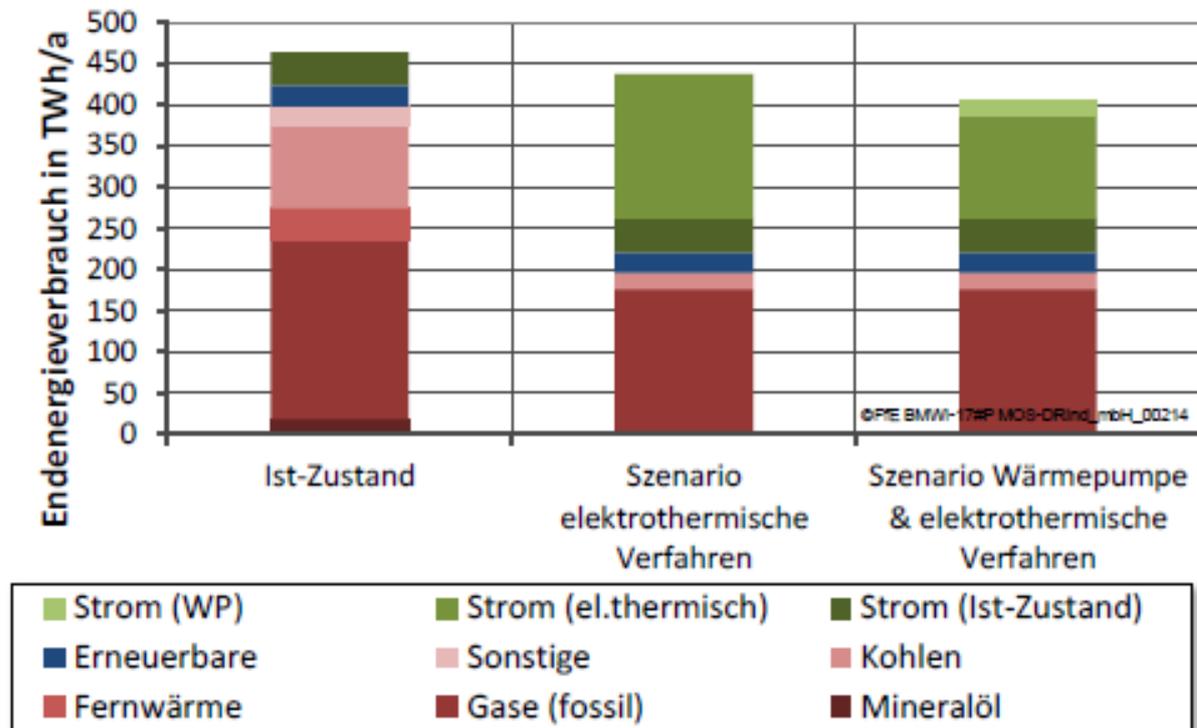


Abbildung 16: Endenergieverbrauch zur Prozesswärmeerzeugung im Ist-Zustand und durch Elektrifizierung bzw. Hybridisierung [ANN17]

Für beide Szenarien ist der **Endenergieverbrauch** deutlich geringer als im Ist-Zustand. Auch der Anteil fossiler Energieträger nimmt ab, während der Anteil an Strom deutlich zunimmt.

Im folgenden Unterabschnitt wird analog zu den betrachteten stromintensiven Prozessen, welche oftmals branchenspezifisch sind, analysiert, welches Potenzial branchenübergreifende Produktionsinfrastruktur und Querschnittstechnologien aufweisen.

2.2.2 Produktionsinfrastruktur und Querschnittstechnologien

Im Rahmen des Forschungsprojekts „SynErgie“ wurde sich unter anderem mit der Fragestellung befasst, welchen Beitrag die **Produktionsinfrastruktur** zur Lastflexibilisierung der Industrie leisten kann. Dabei ist Produktionsinfrastruktur wie folgt definiert:

„Unter dem Begriff Produktionsinfrastruktur werden insbesondere die Gebäudehülle, die Versorgungstechnik sowie die in der Versorgungstechnik genutzten Querschnittstechnologien zusammengefasst, welche branchenübergreifend zum Einsatz kommen. Zu den betrachteten Technologien gehören unter anderem Druckluft, Öl- und Wasserhydraulik,

elektromechanische Antriebe, Klima- und Lüftungstechnik, Prozesswärme und -kälte sowie die Bereitstellung und Aufbereitung unterschiedlichster Medien.“ [ALE19]

Vorhergehende Studien quantifizieren das gesamte positive Flexibilitätspotenzial (Abschaltung) der Produktionsinfrastruktur in Deutschland mit 424 – 4722 MW, das negative (Zuschaltung) mit 630 – 3523 MW, wobei letztgenanntes in einigen Studien nicht behandelt wird (vgl. Tabelle 7).

Tabelle 7: Vergleich ausgewiesener Energieflexibilitätspotenziale der Produktionsinfrastruktur (nach [ALE19])

Studie	Energieflexibilitätspotenziale der Produktionsinfrastruktur		
	Positiv (abschaltbar)	Negativ (zuschaltbar)	Anmerkung
Buber et al., 2013	800 – 1.400 MW	k.A.	Technisches Potenzial über eine Stunde, Normalbetrieb, ohne P2H, hochgerechnet aus abschaltbarer Last in Süddeutschland von 500 MW
Focken und Klobasa, 2011	Belüftung u. Klimatisierung: 325 MW Kühlhäuser: 99 MW Summe: 424 MW	Belüftung u. Klimatisierung: k.A. Kühlhäuser: 81 MW	Fokus auf einzelne Technologien, ohne Abrufdauer, einzelne Fallstudien detaillierter mit Abrufdauer und Kosten betrachtet
Gruber, 2017	1.180 MW	630 MW	Akzeptiertes Potenzial über eine Stunde, Ist-Stand, wochentags, ohne P2H
Klobasa, 2007	Kältekompressoren u. Kühlhäuser: 270 MW Klimatisierung: 320 MW Summe: 590 MW	k.A.	Technisches Potenzial, ohne Abrufdauer
DENA, 2010	4.772 MW	3.523 MW	Technisches Potenzial, Angabe ohne Abrufdauer
Steurer und Hufendiek, 2017	ca. 1.200 MW	ca. 1.000 MW	Soziotechnisches Potenzial über eine Stunde, Industrie und GHD gemeinsam
Sauer et al, 2016	1.400 MW	k.A.	Perspektivisch für 2050

Nachfolgend ist zunächst die Methodik beschrieben, mittels derer das Energieflexibilitätspotenzial der deutschen Produktionsinfrastruktur im Rahmen des Projekts „SynErgie“ [ALE19] und der Dissertation von Gruber [ANN17] ermittelt wurde. Anschließend werden die Ergebnisse dargestellt und erläutert.

2.2.2.1 Methodik

Für eine systematische Erfassung des Potenzials der Produktionsinfrastruktur wurden im Rahmen des Projekts „SynErgie“ zum einen **Technologiesteckbriefe** angefertigt, in dem das technische Potenzial relevanter Technologien beschrieben wurde. Außerdem wurde ein **Technologieportfolio** erstellt, in dem die Technologien – welche sich in **Speicher** und **Wandler** unterteilen lassen – gemäß ihrer Technologieattraktivität und ihrer Ressourcenstärke aufgetragen sind. Aus welchen Teilkomponenten sich diese Kriterien zusammensetzen, und wie diese definiert sind, ist in der nachfolgenden Abbildung festgehalten (vgl. Abbildung 17).

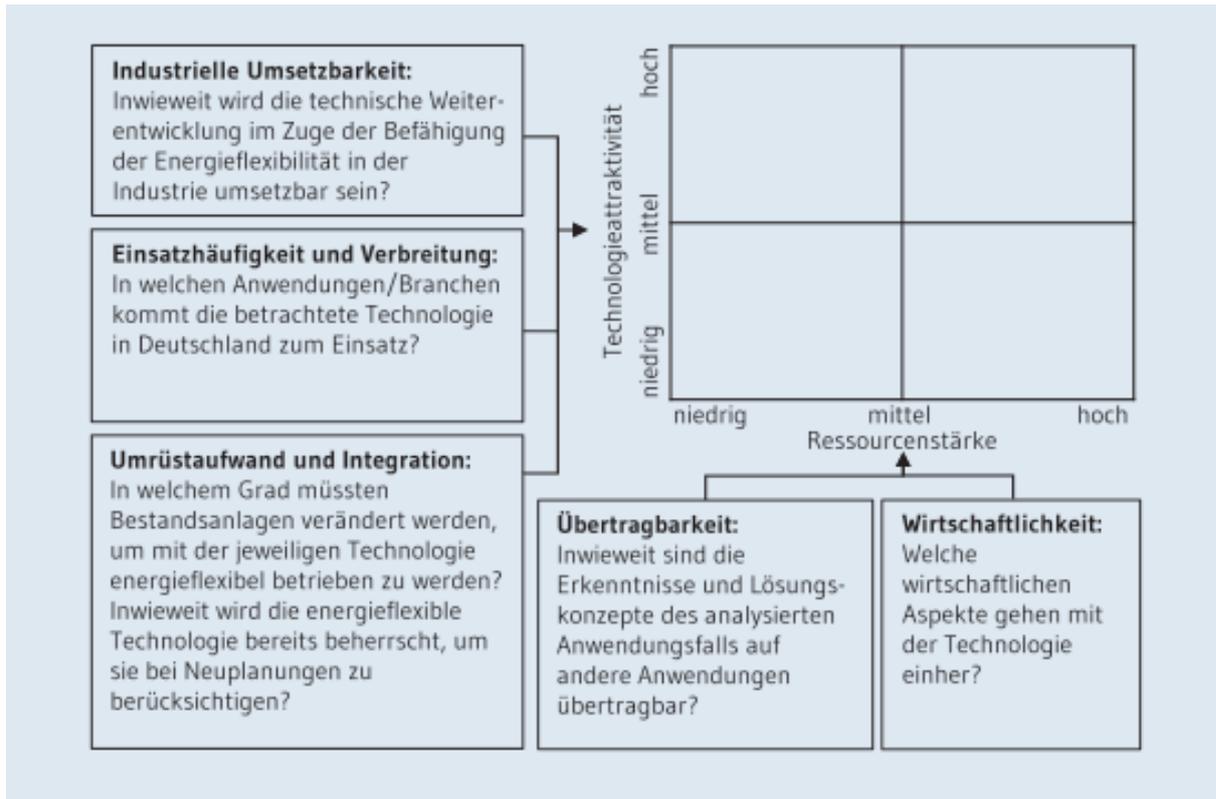


Abbildung 17: Modifizierte Technologie-Portfolio-Analyse zur Bewertung von Energieflexibilitäts-potenzialen [ALE19]

Eine hohe **Technologieattraktivität** weist eine Technologie auf, die leicht umzusetzen ist, häufig eingesetzt wird, weit verbreitet ist und einen geringen Aufwand zur Umrüstung bzw. Integration erfordert. Eine hohe **Ressourcenstärke** zeichnet jene Technologien aus, die einen Erkenntnisgewinn mit sich bringen, der gut auf andere Technologien übertragbar ist, sowie solche, die mit hoher Wirtschaftlichkeit einhergehen.

Im Rahmen der Dissertation von Gruber [ANN17], welche im Kontext des Forschungsprojekts SynErgie entstand, fand außerdem eine detaillierte Analyse des **Lastflexibilisierungspotenzials von Querschnittstechnologien** statt, welche einen signifikanten Anteil an der Produktionsinfrastruktur darstellen. Nachfolgend ist dargestellt, wie genau dieses Potenzial ermittelt wurde (vgl. Abbildung 18).

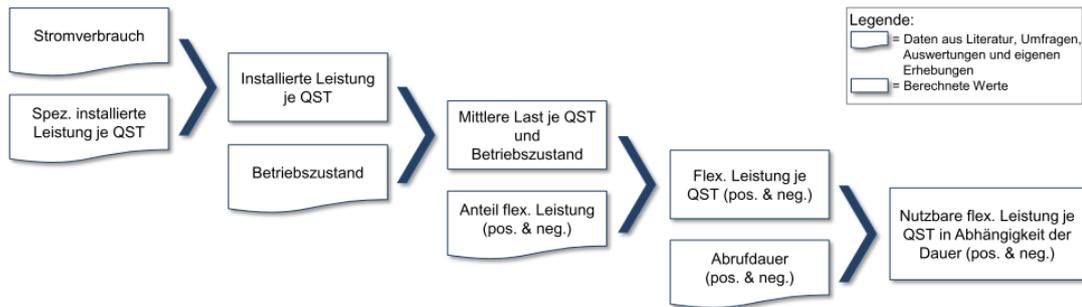


Abbildung 18: Detaillierte Methodik zur Ermittlung des akzeptierten Lastflexibilisierungspotenzials von Querschnittstechnologien je Branchengruppe [ANN17]

Die Methodik basiert auf Daten zu Stromverbrauch, spezifischer Leistung, Betriebszuständen und Abrufdauern, welche aus der Literatur, aus Datenbanken und aus eigenen Erhebungen und Befragungen von Unternehmensvertretern stammen. Das Ergebnis ist die nutzbare flexible Leistung je Querschnittstechnologie in Abhängigkeit von der Abrufdauer, unterteilt in positive und negative Leistung. Folgende Tabelle gibt einen Überblick, welche **Querschnittstechnologien** bzw. **Systemkomponenten** im Rahmen der Analyse betrachtet wurden (vgl. Tabelle 8).

Tabelle 8: Flexibilisierbare Systemkomponenten von Querschnittstechnologien (nach [ANN17])

Querschnittstechnologie	Flexibilisierbare Anlagen bzw. Komponenten d. Systems
Lüftung	Motoren von Ventilatoren (Zu- und Abluft)
Klimakälte	Elektr. Verdichter v. Kompressionskältemaschinen u. Splitgeräten, Motoren v. Ventilatoren v. Kühltürmen, Motoren v. Umwälzpumpen
Prozesskälte	Elektr. Verdichter v. Kompressionskältemaschinen u. Splitgeräten, Motoren v. Ventilatoren v. Kühltürmen, Motoren v. Umwälzpumpen
Pumpen	Motoren von Grundwasserpumpen, Umwälzpumpen (Behälter) und Trinkwasserpumpen
Raumwärme u. elektr. 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

Nachfolgend ist im Abschnitt zu den Ergebnissen der Potenzialanalyse zunächst das Technologieportfolio dargestellt, gefolgt von einer Quantifizierung des technischen bzw. praktischen Potenzials der o.g. 12 Querschnittstechnologien, und schließlich einigen vergleichenden Auswertungen.

2.2.2.2 Ergebnis

Das **Technologie-Portfolio** für das Energieflexibilitätspotenzial unterschiedlicher Wandler- und Speichertechnologien der Produktionsinfrastruktur ist nachfolgend abgebildet (Abbildung 19).

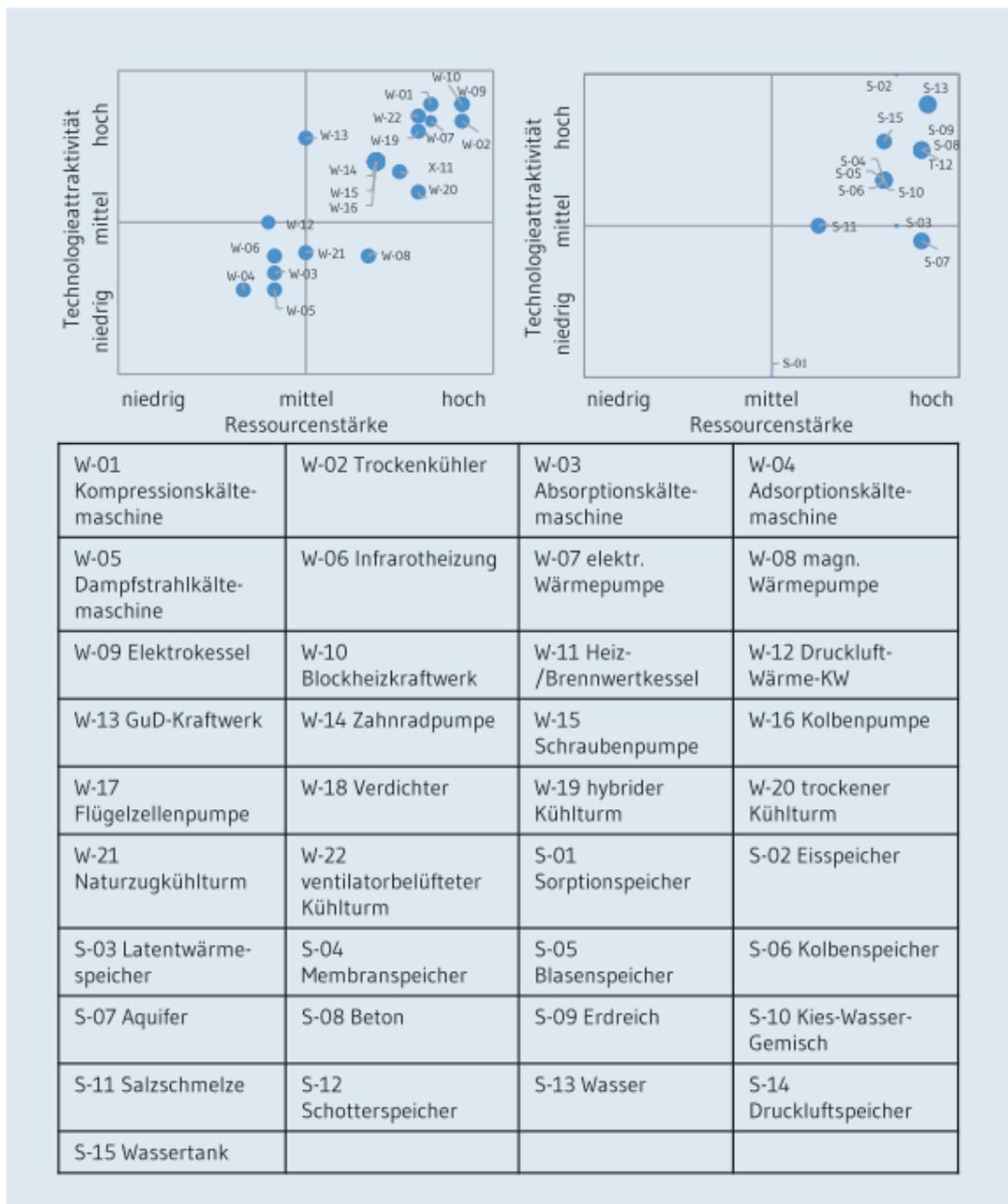


Abbildung 19: Ergebnisse der Technologie-Portfolioanalyse zur Bewertung von Energieflexibilitäts-
potenzialen von unterschiedlichen Wandler- (l.) und Speichertechnologien (r.) [ALE19]

Der Durchmesser der Indikatorscheiben zeigt jeweils an, wie viele Kriterien in die Bewertung einer Technologie eingeflossen sind. Ein geringer Durchmesser bedeutet eine geringe Anzahl an Kriterien. Technologien, die rechts oben im Portfolio verortet sind, sind als besonders vielversprechend hinsichtlich ihres Flexibilitätspotenzials einzuordnen.

Die **aggregierten Potenziale** der einzelnen Technologien lassen sich auch den einzelnen **Wirtschaftszweigen** der deutschen Industrie zuordnen. Dies ist nachfolgend abgebildet, separat für das positive und negative Potenzial (vgl. Abbildung 20 & Abbildung 21).

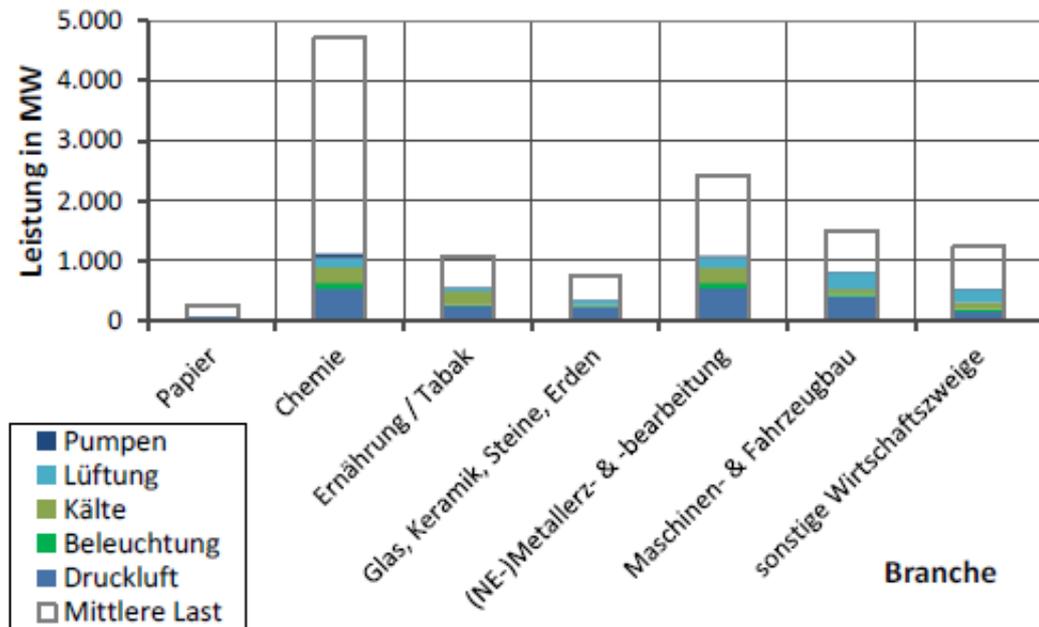


Abbildung 20: Positives Lastflexibilisierungspotenzial von Querschnittstechnologien ohne Zeitbezug (Normalbetrieb) [ANN17]

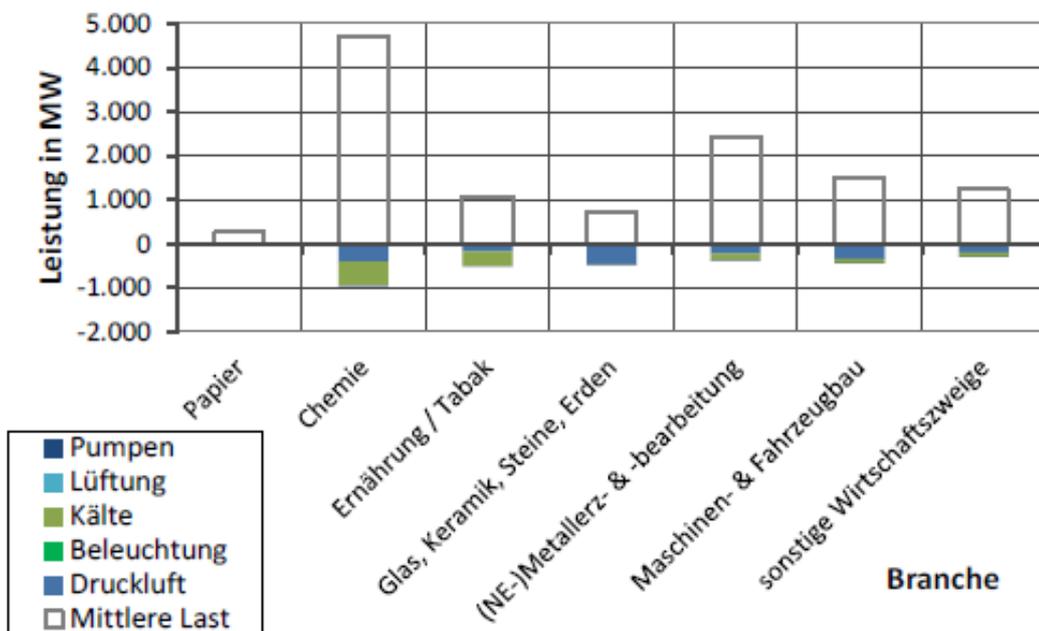


Abbildung 21: Negatives Lastflexibilisierungspotenzial von Querschnittstechnologien ohne Zeitbezug (Normalbetrieb) [ANN17]

Dargestellt ist jeweils das Potenzial referenziert auf die mittlere Last (grauer Rahmen). Beim positiven Potenzial weist die Druckluftherzeugung das größte Potenzial auf, für das negative Potenzial die Druckluft- und Kälteerzeugung. In beiden Fällen scheint das Potenzial in der Chemiebranche am größten zu sein. Alle Werte beziehen sich auf dem Normalbetrieb.

Das Flexibilisierungspotenzial hängt u.a. von der **Abrufdauer** ab. Dieser Zusammenhang ist nachfolgend dargestellt, referenziert auf die mittlere Last (vgl. Abbildung 22 & Abbildung 23).

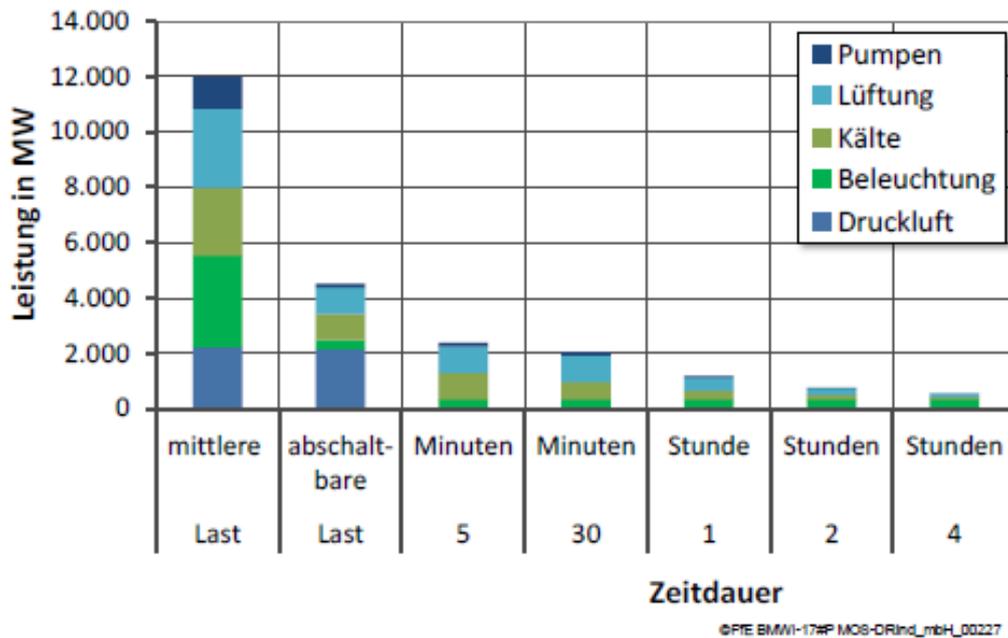


Abbildung 22: Abschaltbare Leistung durch Flexibilisierung von Querschnittstechnologien in Deutschland (Normalbetrieb) in Abhängigkeit der Abrufdauer – akzeptiertes Potenzial [ANN17]

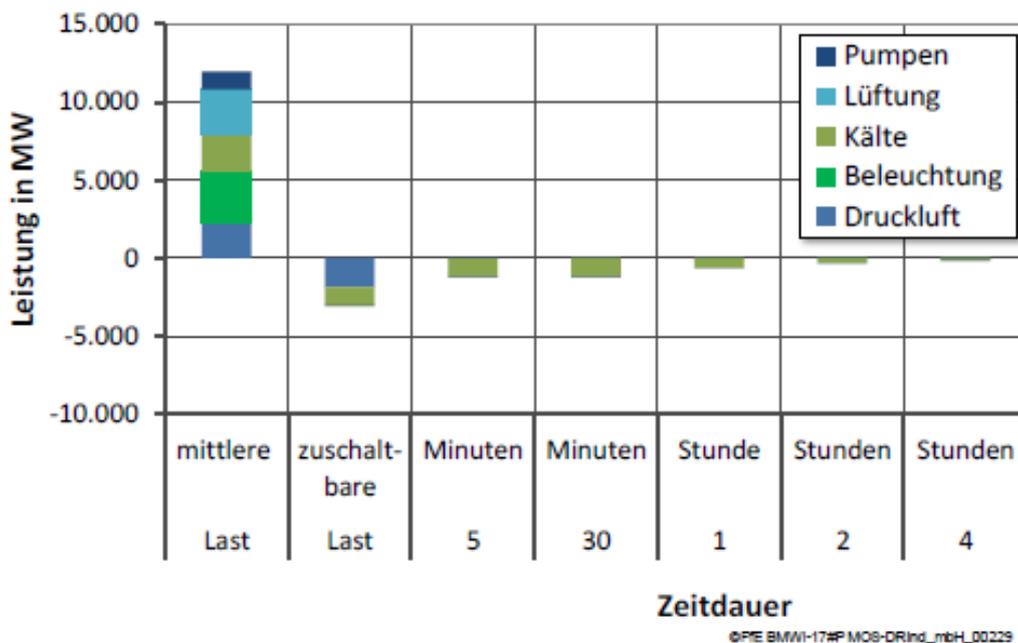


Abbildung 23: Zuschaltbare Leistung durch Flexibilisierung von Querschnittstechnologien in Deutschland (Normalbetrieb) in Abhängigkeit der Abrufdauer – akzeptiertes Potenzial [ANN17]

Dargestellt ist das **akzeptierte Potenzial**, welches das Ergebnis der Befragungen von Unternehmensvertretern darstellt. Das akzeptierte Potenzial ist dabei über alle Zeiträume hinweg größer für abschaltbare Lasten als für zuschaltbare Lasten.

Räumlich ist das Potenzial zur Energieflexibilisierung von Querschnittstechnologien in der deutschen Industrie deutlich unterschiedlich verteilt, wie die nachfolgende Grafik zur Verteilung der **abschaltbaren Lasten** auf die einzelnen Bundesländer und Branchen zeigt (vgl. Abbildung 24).

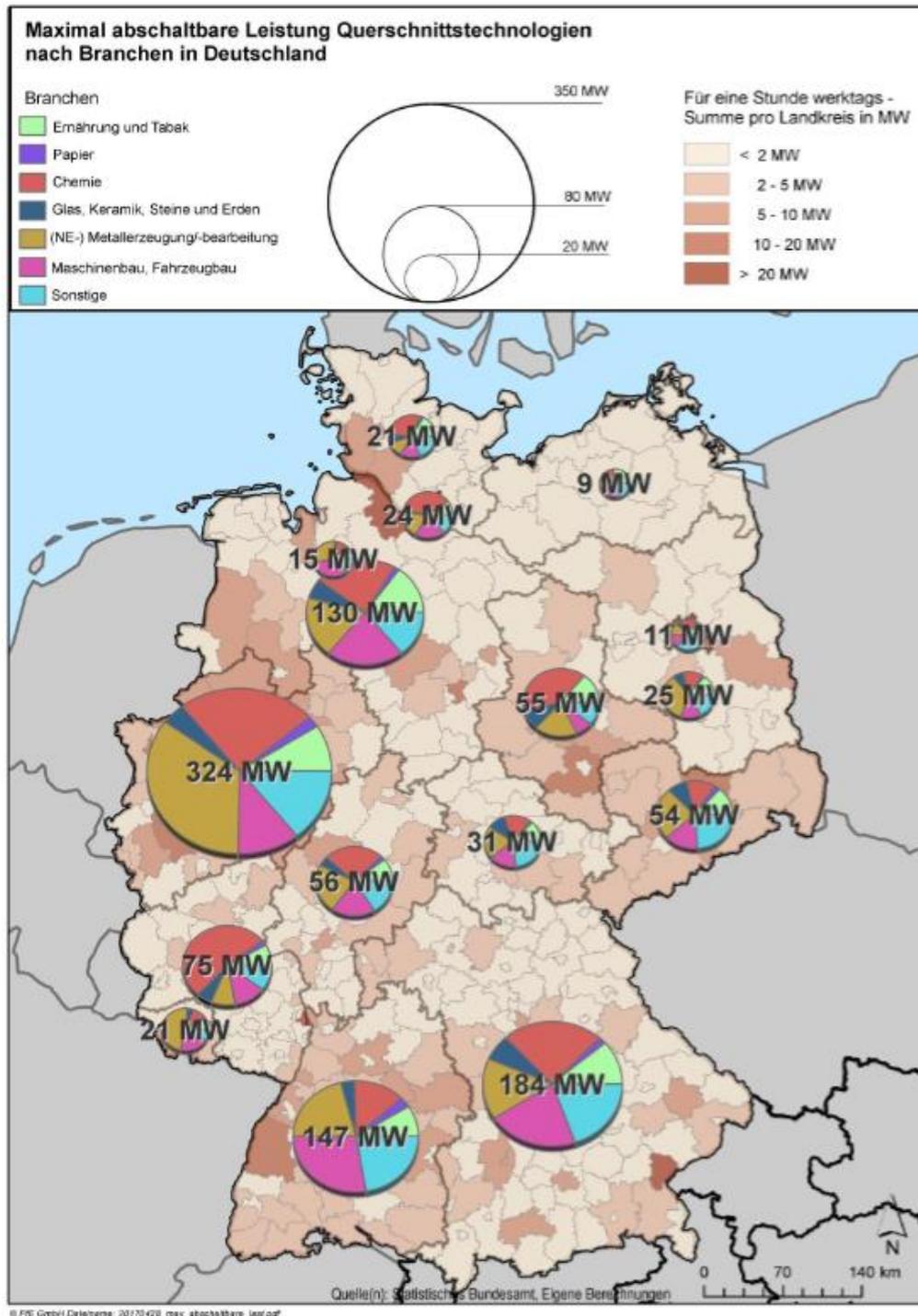


Abbildung 24: Maximal abschaltbares Potenzial bei Querschnittstechnologien über eine Stunde am Werktag [ANN17]

Mit 324 MW über alle Branchen hinweg liegt das größte Potenzial in Nordrhein-Westfalen vor, Mecklenburg-Vorpommern weist mit 9 MW das geringste Potenzial auf.

Ähnlich verhält es sich mit den **zuschaltbaren Lasten** (vgl. Abbildung 25). Diese betragen maximal 169 MW in Nordrhein-Westfalen und 6 MW in Mecklenburg-Vorpommern.

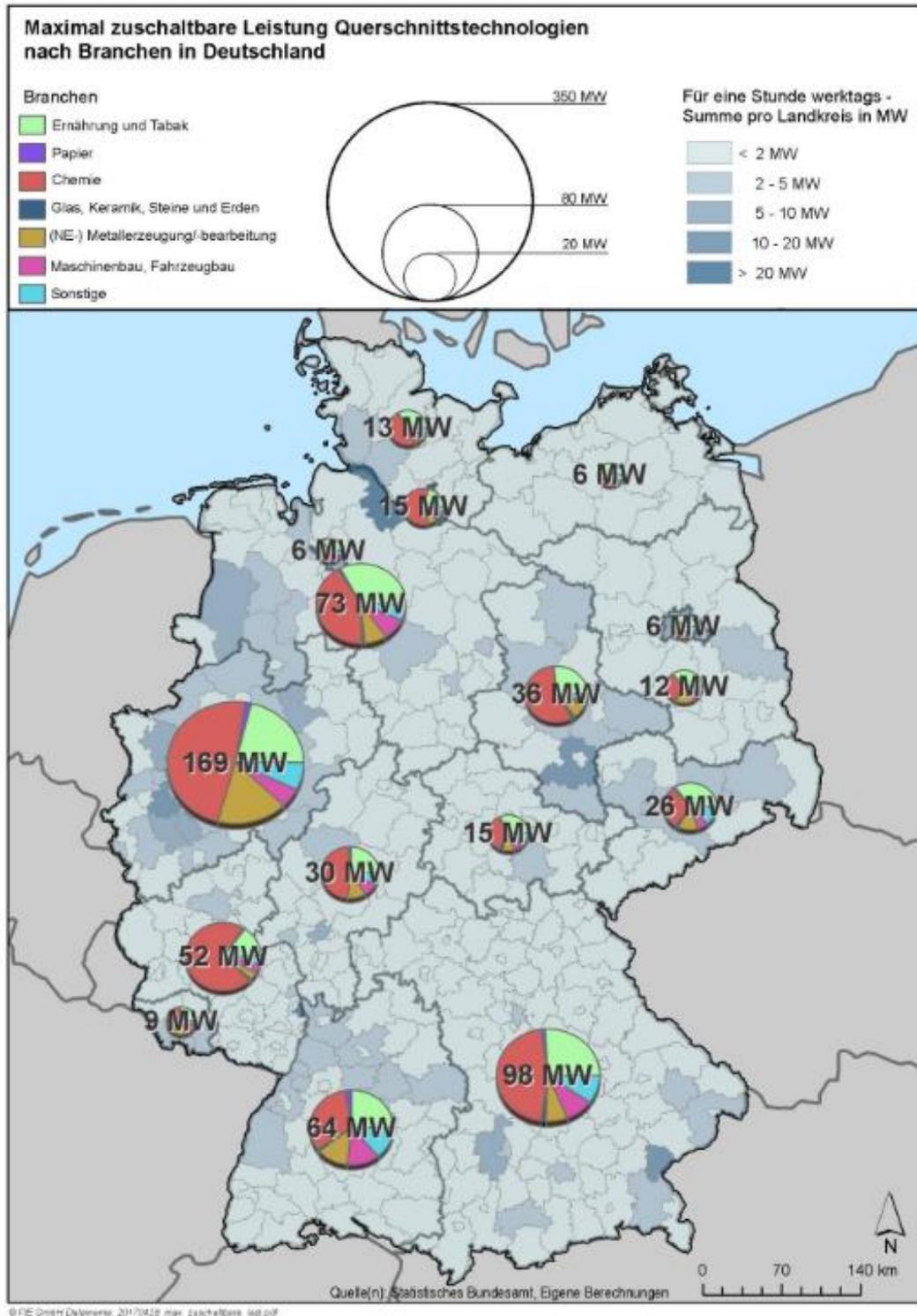


Abbildung 25: Maximal zuschaltbares Potenzial bei Querschnittstechnologien über eine Stunde am Werktag [ANN17]

Das gesamte **heutige und zukünftige Lastflexibilisierungspotenzial** von Querschnittstechnologien ist in der nachfolgenden Tabelle bilanziert (vgl. Tabelle 9).

Tabelle 9: Lastflexibilisierungspotenzial von Querschnittstechnologien in Deutschland bis 2030 (Normalbetrieb) (Daten aus [ANN17]) [ANN17]

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

Das nahezu konstant bleibende Potenzial bis zum Jahr 2030 ergibt sich aus einer Reihe von gegenläufigen Effekten wie Neudimensionierung von Anlagen bei Neuanschaffung, veränderte Betriebspunkte, zusätzliche Optionen zur Steuerung und Regelung von Anlagen sowie allgemeine Effizienzsteigerungen.

Analog zu den zu den stromintensiven Prozessen besteht auch bei Querschnittstechnologien das Potenzial zur Reduzierung des Endenergieverbrauchs und zur Steigerung der Flexibilität durch **Elektrifizierung** und **Hybridisierung** (vgl. Abbildung 26).

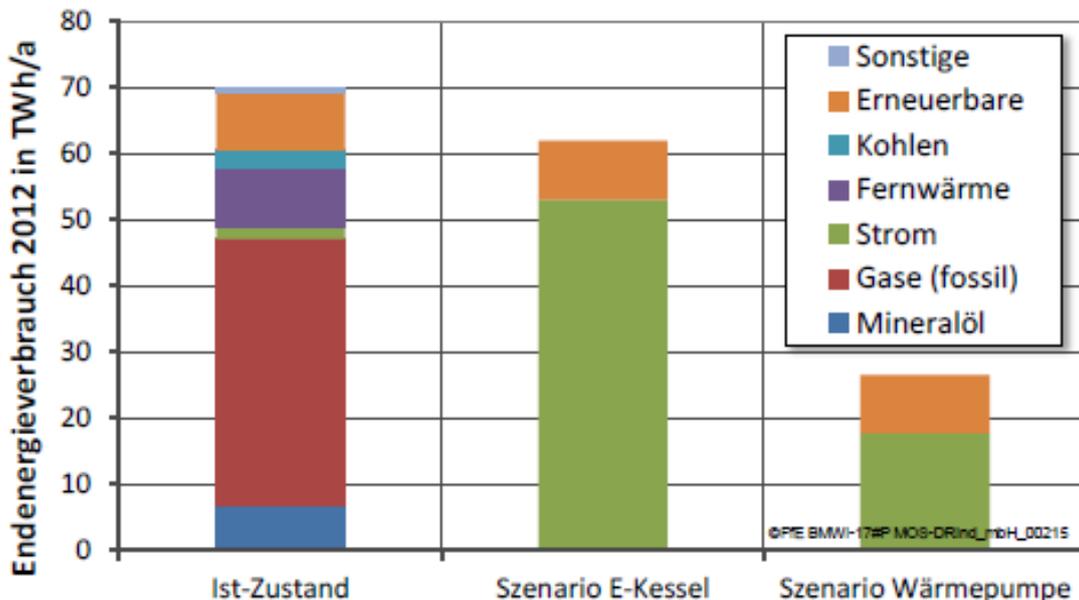


Abbildung 26: Endenergieverbrauch zur Raumwärme- und Warmwassererzeugung im Ist-Zustand und durch Elektrifizierung bzw. Hybridisierung [ANN17]

Dabei kommen **elektrisch betriebene Kessel** und **Wärmepumpen** zur Raumwärme- und Warmwassererzeugung zum Einsatz, welche vor allem fossile Energieträger wie Kohle, Öl und Gas ersetzen können. Der Gesamtendenergiebedarf für diese beiden genannten Zwecke kann dadurch perspektivisch mehr als halbiert werden (Szenario Wärmepumpe).

Im folgenden Abschnitt ist beschrieben, welche Änderungen in den Betrieben notwendig sind, um die aufgezeigten Potenziale umzusetzen.

2.3 Identifizierung und Dokumentation aktueller Strategien zur Flexibilisierung der Wirkleistung auf Verbraucherseite

Im Kontext produzierenden Unternehmen können **konkrete Maßnahmen** identifiziert werden, die verbrauchsseitig zur Energieflexibilisierung beitragen. Diese lassen sich verschiedenen Organisationsebenen eines Betriebes zuordnen (vgl. Abbildung 27).

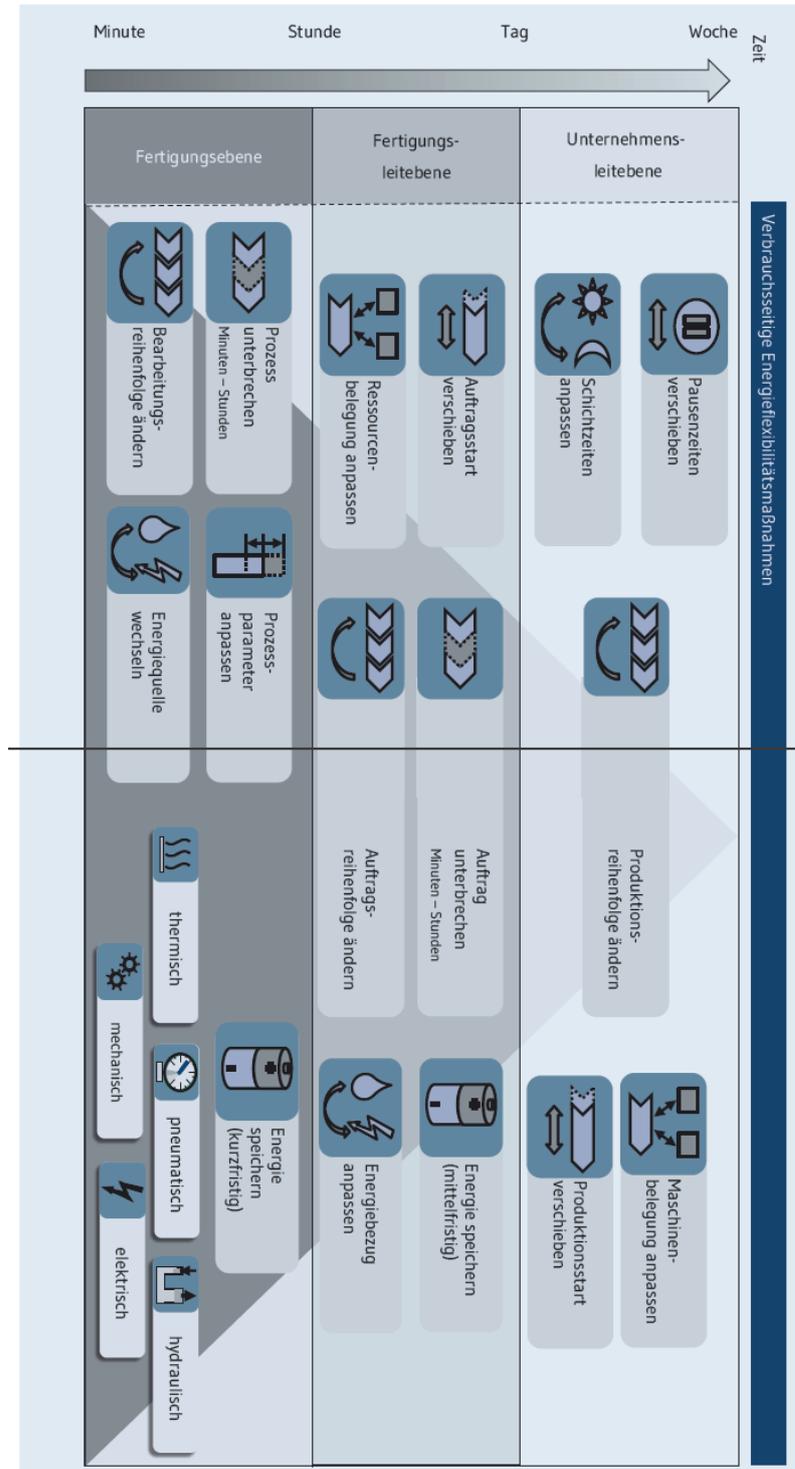


Abbildung 27: Energieflexibilitätsmaßnahmen auf den Ebenen der Automatisierungspyramide ([ALE19], nach [MAR17])

Auf der untersten **Ebene**, der Fertigungsebene, finden sich insgesamt fünf Maßnahmen wieder, sechs Maßnahmen sind der mittleren Fertigungsleitebene zugeordnet, und weitere fünf Maßnahmen der obersten Unternehmensleitebene. Die Maßnahmen sind in der VDI Richtlinie 5207 im Detail beschrieben und mit Praxisbeispielen anschaulich erläutert (VDI-Richtlinie VDI 5207).

Als Grundlage für die Umsetzung dieser Maßnahme wird gemäß der VDI Richtlinie 5207 die Schaffung von Transparenz in Form von **Energiemessungen** gesehen, um den Status Quo im Hinblick auf den aktuellen Stromverbrauch zu erfassen (VDI-Richtlinie VDI 5207).

Bei der Umsetzung der Maßnahmen gilt es eine Reihe von **Wechselwirkungen** zu antizipieren. Auf **Fabrikebene** sind Wechselwirkungen auf Maßnahmenebene (z.B. Schichtzeit wirkt sich auf Pausenzeit aus, veränderte Prozessparameter wirken sich auf Bearbeitungszeit aus), Logistikebene (z.B. Materialfluss) und Energieebene (z.B. Auswirkung der technischen Gebäudeausstattung auf Partikelkonzentrationen in der Luft) zu erwarten. Auf **Supply Chain Ebene** kann die zunehmende Flexibilität sowohl Material- als auch Informationsflüsse beeinflussen. Weiterhin sind Wechselwirkungen zwischen **Flexibilität und Effizienz** zu erwarten (z.B. Veränderung des Betriebspunkts von Anlagen), die es auch bei Investitionsentscheidungen zu berücksichtigen gilt (z.B. Anlagen- und Speicherdimensionierung). Schließlich ist noch zu beachten, dass eine Veränderung des Lastprofils durch Flexibilisierung Auswirkungen auf die **Netznutzungsentgelte** eines Betriebs haben kann.

2.4 Zwischenfazit Industrie

Die Potenzialanalyse für die deutsche Industrie hat ergeben, dass das **maximale positive Potenzial (Lastverzicht) 3,98 GW / 2,45 GW (5 min / 15 min Abrufdauer)** beträgt, und das **maximale negative Potenzial (Lasterhöhung) 2,71 GW / 1,09 GW (1,2 min / 15 min Abrufdauer)**, vgl. Abbildung 28.

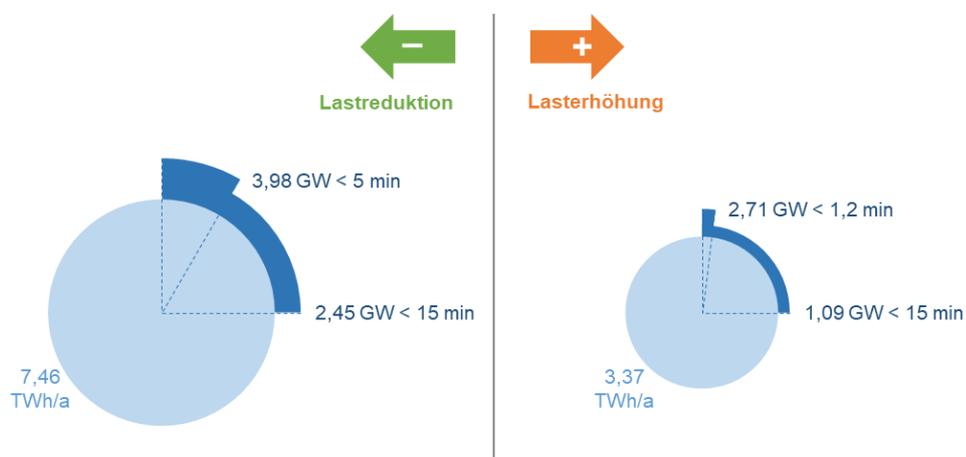


Abbildung 28: Gesamtpotenzial zur Lastreduktion und Lasterhöhung der deutschen Industrie, ausgedrückt als insgesamt flexibilisierbare Energiemenge und Leistung; eigene Darstellung basierend auf Daten aus [ALE19]

Bei einem **Stromverbrauch der Industrie** im Jahr 2018 von 227 TWh entspricht die gezeigte positive flexibilisierbare Energiemenge von 7,46 TWh/a rund 3 % des jährlichen Stromverbrauchs, die negative flexibilisierbare Energiemenge von 3,37 TWh/a macht etwa 2 % des Stromverbrauchs aus [UMW20].

Grundsätzlich bietet sich für den Sektor Industrie eine separate Betrachtung von stromintensiven **Prozessen und Querschnittstechnologien** an. Erstere sind vor allem in der Metall-, Papier-, Glas- und Chemieindustrie zu finden. Letztere beschreiben Technologien, welche zwar weniger energieintensiv sind, dafür aber in großer Anzahl über alle Industriezweige hinweg vertreten sind (z.B. Pumpen, Motoren, Kompressoren).

Für die **stromintensiven Prozesse** hat die Analyse ergeben, dass das positive Potenzial (Lastreduktion) deutlich höher als das negative Potenzial (Lasterhöhung) ist. Ersteres liegt je nach Branche/Prozess zwischen 105 und 957 MW, letzters zwischen 0 und 227 MW. Räumlich ist das Potenzial sehr stark auf einzelne Landkreise konzentriert. Bis zum Jahr 2030 werden keine signifikanten Veränderungen dieser Potenziale erwartet (vgl. Abbildung 29). Jedoch kann zukünftig durch den Wechsel des Energieträgers (Elektrifizierung und Hybridisierung) der Endenergieverbrauch der Prozesswärmeerzeugung signifikant gesenkt werden (von 420 auf 180 TWh), und bei einem entsprechenden Anteil erneuerbarer Energien an der Erzeugung auch der Ausstoß an Treibhausgasen.

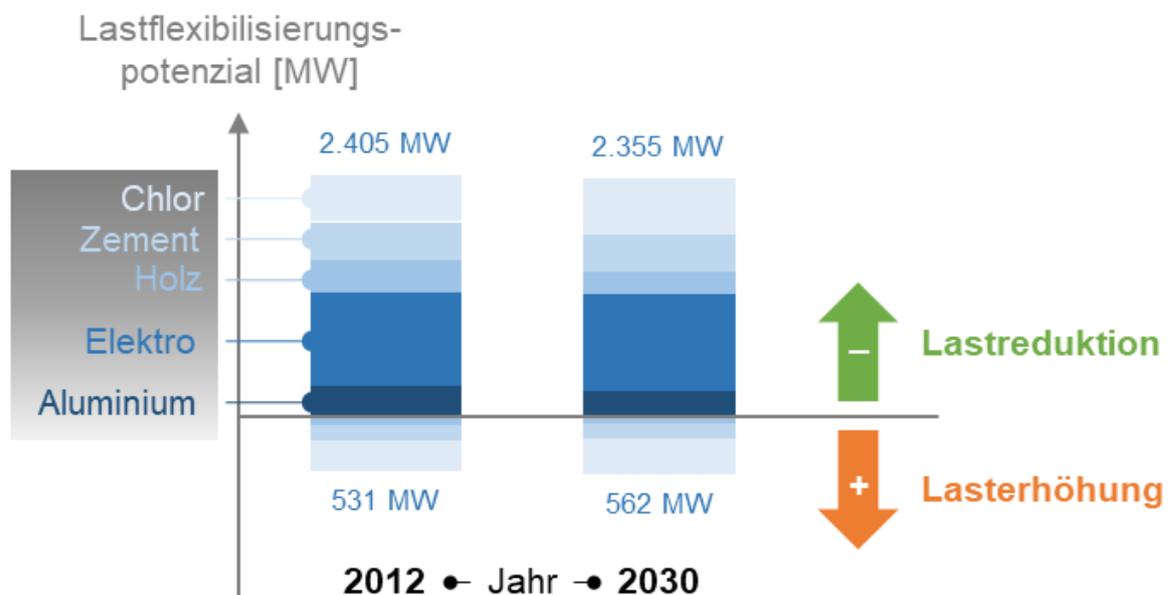


Abbildung 29: Lastflexibilisierungspotenzial durch stromintensive Prozesse, eigene Darstellung basierend auf Daten aus [ALE19]

Bei den **Querschnittstechnologien** lassen sich zunächst Wandler- und Speichertechnologien unterscheiden. Darstellung der unterschiedlichen Wandler- und Speicher-Technologien in einem Portfolio zeigt unterschiedliches Potenzial für einzelne Technologien, wobei Kompressionskältemaschinen und Elektrokessel die größten Potenziale bei den Wandlern aufweisen, während Wasserspeicher das größte Potenzial bei den Speichern zeigen. Das

Positive Flexibilisierungspotenzial scheint auch hier – wie bei den stromintensiven Prozessen – größer zu sein als das negative, mit dem größten Potenzial in beiden Fällen in der Chemieindustrie. Das Potenzial ist abhängig von der Abrufdauer, und wird mit zunehmender Abrufdauer kleiner. Dies wurde ermittelt durch Umfragen bei Unternehmen. Für 5 Minuten beträgt demnach das positive Potenzial etwa 2000 MW, das negative ca. 1500 MW. Räumlich ist hier das Potenzial stärker verteilt als bei den stromintensiven Prozessen, besonders hoch ist es im Vergleich in den industriestarken Ländern Baden-Württemberg, Bayern und Nordrhein-Westfalen. Bis 2030 wird auch hier, wie bei den stromintensiven Prozessen, das Potenzial voraussichtlich annähernd konstant bleiben (vgl. Abbildung 30). Ebenso gibt es bei den Querschnittstechnologien Potenziale – wenn auch deutlich geringere als bei den stromintensiven Prozessen – zur Senkung des Endenergiebedarfs und der Treibhausgasemissionen durch Elektrifizierung und Hybridisierung der Prozesswärmeerzeugung (z.B. durch E-Kessel und Wärmepumpen), mit einer möglichen Reduktion von derzeit 70 TWh/a auf unter 30 TWh/a.

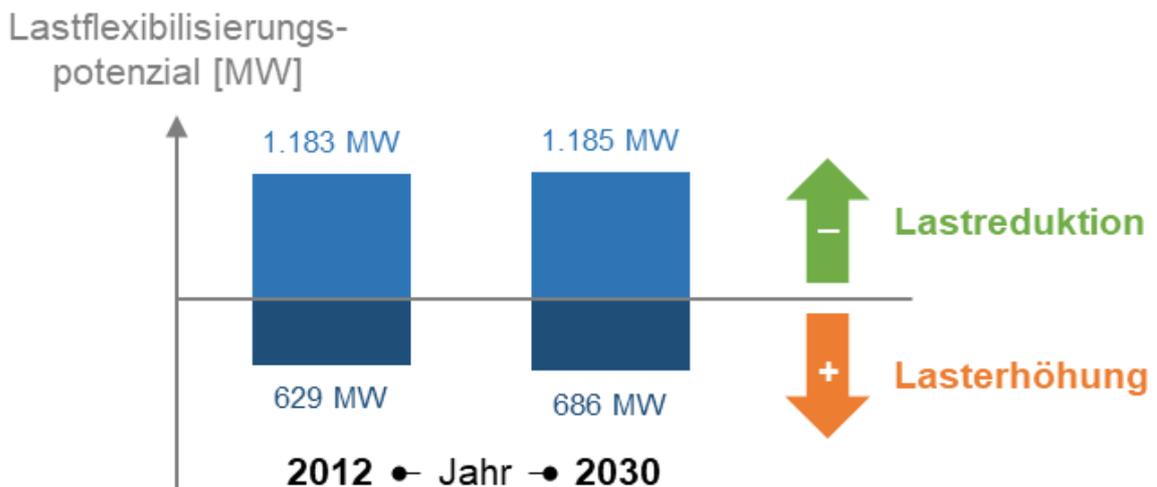


Abbildung 30: Lastflexibilisierungspotenzial durch Querschnittstechnologien Prozesse; eigene Darstellung basierend auf Daten aus [ALE19]

Strategien und Maßnahmen zur Realisierung von Energieflexibilisierung, welche in diesem Kapitel an vielen Stellen aufgegriffen wurden, lassen sich systematisch verschiedenen Organisationsebenen eines Betriebes zuordnen. Dabei gilt es entsprechende Wechselwirkungen zu beachten, die z.B. technischer, regulatorischer oder organisatorischer Natur sein können.

Das nächste Kapitel behandelt das Energieflexibilisierungspotenzial des Sektors Gewerbe, Handel und Dienstleistungen.

3 Gewerbe, Handel, Dienstleistungen

In diesem Kapitel wird das Energieflexibilitätpotenzial im Bereich Gewerbe, Handel Dienstleistungen (GHD) dargestellt. Zu nächst findet in Abschnitt 3.1 die Erläuterung der dem Sektor zugehörigen **Sektorgruppen** statt, welche auf Grund der breiten Auslegung des Sektors zum Verständnis notwendig ist. Anhand des Gesamtenergieverbrauchs werden die energieintensiven Gruppen und **Anwendungsgebiete** herausgearbeitet. Darauf folgend wird in Abschnitt 3.2 das **Flexibilitätpotenzial** der einzelnen Gruppen und Anwendungsbereich im Sektor GHD aufgezeigt. Hierbei wird der Fokus auf Querschnittstechnologien gesetzt, welche über mehrere Sektorgruppen verteilt Anwendung finden. In Abschnitt 3.3 werden die Ergebnisse zusammengefasst.

Für die Potenzialanalyse im Sektor GHD wurde sich im Wesentlichen auf die Ergebnisse von Energieverbrauchsstudien, sowie Flexibilitätsstudien des Fraunhofer Instituts für System- und Innovationsforschung (ISI) berufen.

3.1 Gesamter Sektor

Auf Grund der breiten Definition des Sektors GHD werden zunächst die dem Sektor zugehörigen **Gruppen und sog. Splits** erläutert. Diese sind in Tabelle 10 dargestellt. Neben 12 Gruppen, die die Sektorgruppen näher definieren, bestehen weiterhin zwei Gruppen, in denen "nicht über Gruppen erfasste" Bereiche, sowie "übrige" Bereiche erfasst werden.

Tabelle 10: Sektorgruppen und Splits des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen

Gruppe	Bezeichnung
1	Baugewerbe
2	Büro-ähnliche Betriebe <ul style="list-style-type: none"> • Kreditinstitute und Versicherungen • Verlagsgewerbe • Sonstige betriebliche Dienstleistungen • Gebietskörperschaften und Sozialversicherungen • Deutsche Bundespost / Postdienst • Telekom • Deutsche Bahn AG
3	Herstellungsbetriebe <ul style="list-style-type: none"> • Metallgewerbe • KFZ-Gewerbe • Holzgewerbe • Papier- und Druckgewerbe
4	Handel

	<ul style="list-style-type: none"> • Einzelhandel - food • Einzelhandel - nonfood • Großhandel - food • Großhandel - nonfood • Handelsvermittlungen
5	<p>Krankenhäuser, Schulen, Bäder</p> <ul style="list-style-type: none"> • Krankenhäuser • Schulen • Bäder
6	<p>Beherbergung, Gaststätten, Heime</p>
7	<p>Nahrungsmittelgewerbe</p> <ul style="list-style-type: none"> • Backgewerbe • Fleischereien • Restliche Nahrungsmittelgewerbe
8	<p>Wäschereien</p>
9	<p>Landwirtschaft</p>
10	<p>Gartenbau</p>
11	<p>Flughäfen</p>
12	<p>Bekleidung, Leder, Spedition</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bekleidung, Leder, Textil • Spedition, Lagerei, Verkehrsvermittlung
13	<p>Nicht über Gruppen erfasste Bereiche</p> <ul style="list-style-type: none"> • Marktstände • NE-Metalle, Kunststoffe, Gummi • Kühlhäuser • Wasserversorgung und Abwasserentsorgung • Rechenzentren
14	<p>Übrige</p> <ul style="list-style-type: none"> • Straßenbeleuchtung • Militär • Sonstige

3.1.1 Gesamtenergieverbrauch

Der Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen weist im Vergleich zu den weiteren betrachteten Sektoren mit 15,0 % (375 TWh) den geringsten Anteil am **Endenergieverbrauch** auf. Der Bereich GHD lässt sich hinsichtlich der zugehörigen Bereiche sowie hinsichtlich

Energieträgern weiter aufschlüsseln. Der **Gesamtenergieverbrauch** der vier Sektoren sowie die Verteilung der Energieträger innerhalb des Sektors GHD sind in Abbildung 31 dargestellt.

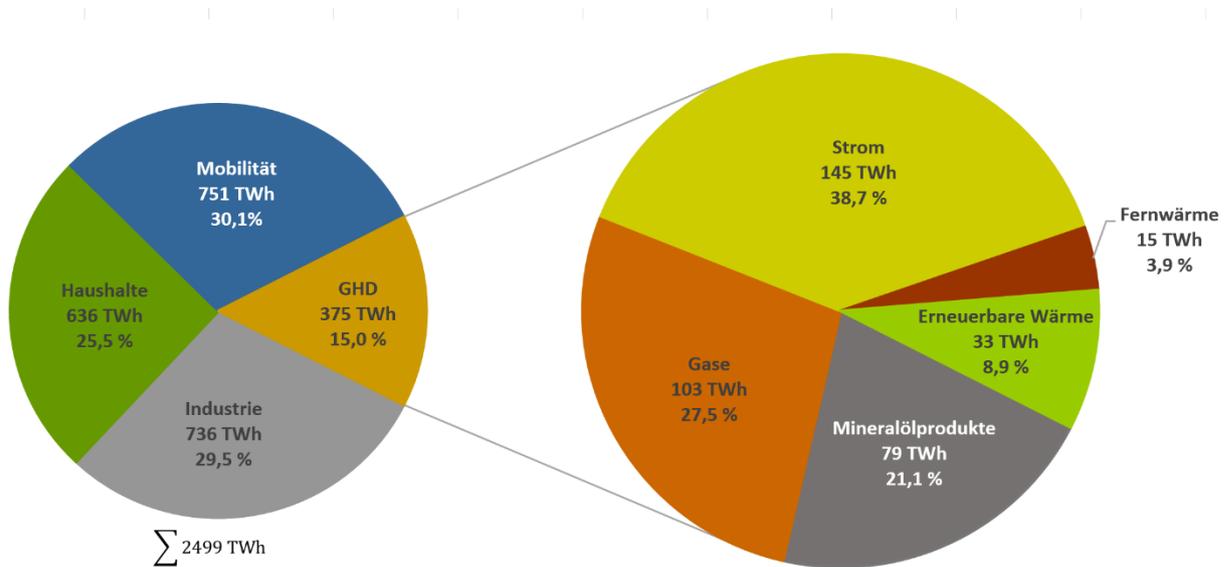


Abbildung 31: Gesamtenergieverbrauch im Jahr 2015 nach Sektoren (links), Energieverbrauch im Sektor GHD nach Energieträgern (rechts), Daten aus [UMW20]

Bei der Betrachtung der **Energieträger** fällt auf, dass der Sektor GHD mit 38,7 % den höchsten sektorspezifischen Anteil an elektrischer Energie aufweist. Die maßgeblichen Energieträger in den Bereichen Verkehr, Industrie und Haushalte sind hingegen Mineralölprodukte (Mobilität) und Gase (Industrie und Haushalte). Der Anteil an elektrischer Energie in den weiteren Bereichen beträgt 30,8 % im Bereich Industrie, 20,3 % im Bereich Haushalte und 1,6 % im Bereich Mobilität. Der hohe Anteil elektrischer Energie liefert einen ersten potentiellen Handlungsschwerpunkt für die Betrachtung von Energieflexibilitätpotenzialen Im Sektor GHD. Neben elektrischer Energie stellen Gase und Mineralölprodukte weitere wichtige Energieträger dar. [UMW20]

Zur näheren Analyse der Energieträger lässt sich der Sektor GHD in die erläuterten 12 bzw. 14 zugehörige Bereiche gliedern, die wiederum weitere **Teilbereiche (sog. Splits)** aufweisen. Im Vergleich zu Abbildung 31 weisen im Referenzjahr 2013 der Studie Gase den größten Anteil der Energieträger am Endenergieverbrauch auf. Abbildung 32 zeigt den Sektor GHD aufgeschlüsselt nach den zugehörigen **Sektorgruppen**. Die Daten der Gruppen 5. Krankenhäuser, Bäder und Schule und 7. Nahrungsmittelgewerbe wurden zusätzlich nach den dazugehörigen Splits aufgeteilt.

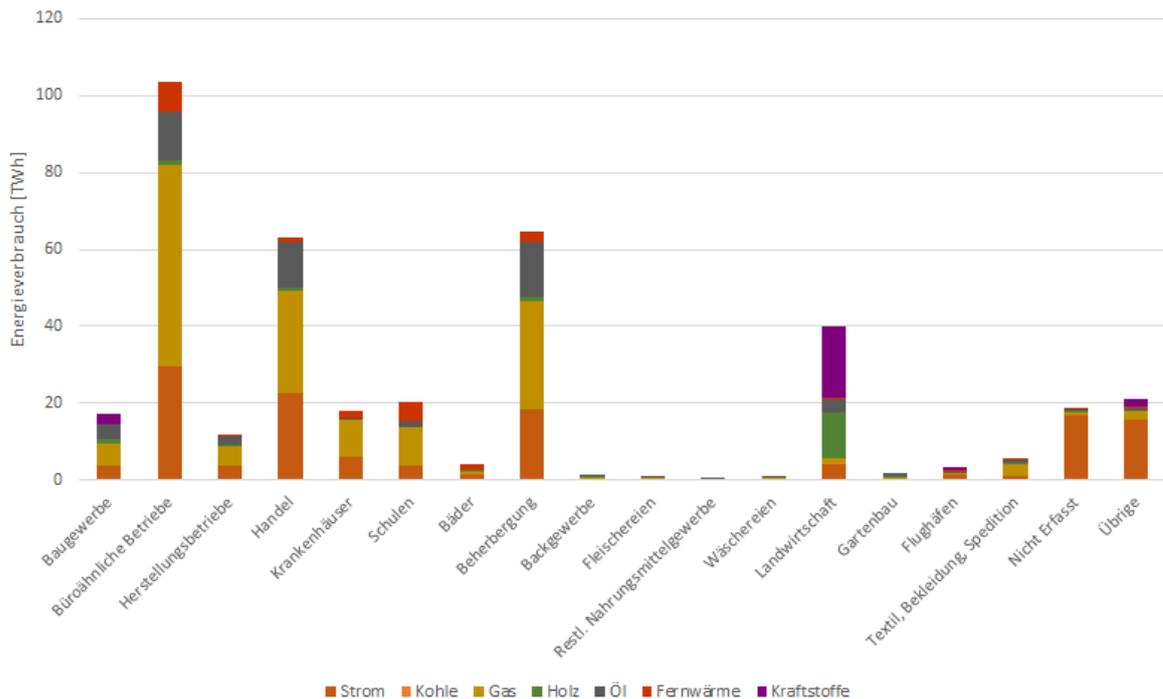


Abbildung 32: Gesamtenergieverbrauch des Sektors GHD im Jahr 2013 nach Sektorgruppen und Energieträgern (Daten aus [BAR15])

Aus der Abbildung können deutliche Unterschiede in der **Energieintensität der Sektorgruppen** ausgemacht werden. Die Gruppe 2. Büroähnliche Betriebe stellt den energieintensivsten Bereich dar, es folgen die Bereiche 6. Beherbergung und 4. Handel. In den energieintensiven Bereichen stellen die Energieträger Strom, Gas und Öl die maßgeblichen Energiequellen dar. Deutliche Unterschiede lassen sich beispielsweise im Bereich Landwirtschaft erkennen, welcher eine vorwiegende Nutzung von Holz und Kraftstoffen aufweist. Dies bekräftigt wiederholt die breite Auslegung des Sektors GHD. Im Folgenden werden die Energieträger Mineralölprodukte, Gase, Fernwärme und Erneuerbare Wärme gemäß Abbildung 33 zu „Brenn- und Kraftstoffe, Fernwärme“ zusammengefasst.

Neben der Aufteilung nach Energieträgern ergibt sich aus den **Anwendungsbereichen** eine weitere Möglichkeit der Allokation des Energieverbrauchs. Hier unterscheidet die vorliegende Studie zwischen den Anwendungsbereichen

- Beleuchtung
- mechanischer Energie
- Warmwasser
- sonstiger Prozesswärme
- Prozesskälte
- Klimakälte
- Information und Kommunikation (IuK) und
- Raumheizung

Die prozentualen **Anteile der Anwendungsbereiche in den Sektorgruppen** wurden mit dem Gesamtenergieverbrauch der Sektorgruppen multipliziert und sind in Abbildung 33 und

Abbildung 34. Abbildung 33 zeigt dabei den Verbrauch von Brenn-/Kraftstoffen und Fernwärme und Abbildung 34 den Verbrauch von elektrischer Energie.

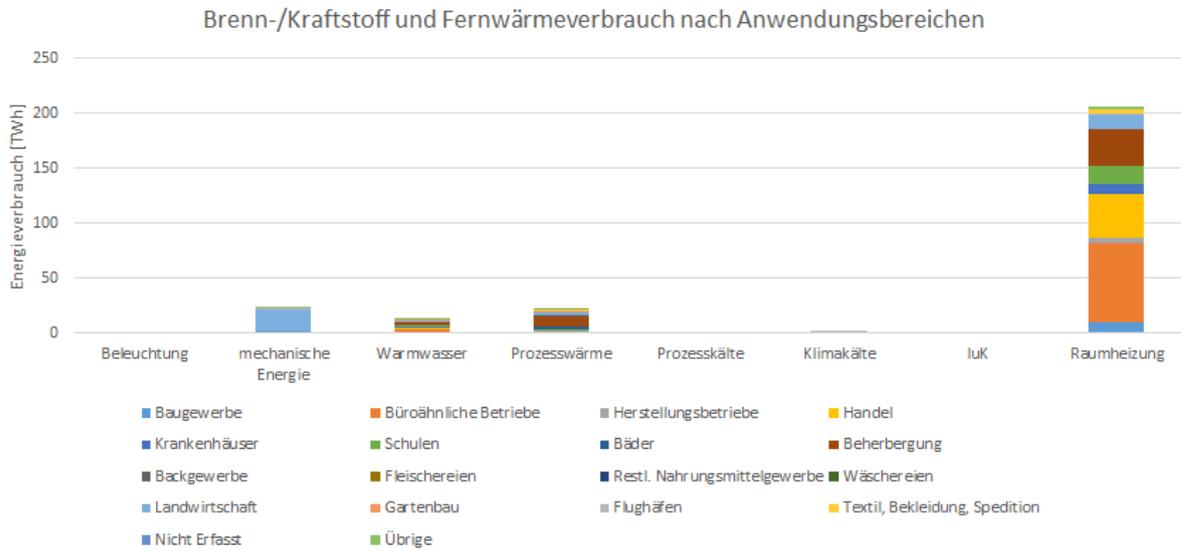


Abbildung 33: Anteiliger Brenn- / Kraftstoff und Fernwärmeverbrauch der Anwendungsbereiche in den Sektorgruppen im Jahr 2013 ([BAR15])

Für Brenn- und Kraftstoffe sowie Fernwärme entfallen 77,7 % des Energieverbrauchs auf den Anwendungsbereich Raumheizung. Weiterhin stellen mechanische Energie (Baugewerbe, Landwirtschaft und Flughäfen), sonstige Prozesswärme und Warmwasser Sektoren mit erkennbarem Energieverbrauch dar.

Hinsichtlich Strom sind Beleuchtung, mechanische Energie und IuK die **energetisch intensivsten Anwendungsbereiche** (vgl. Abbildung 34). Die weiteren Anwendungsbereiche lassen sich allgemein der Wärme- und Kältetechnik zuordnen.

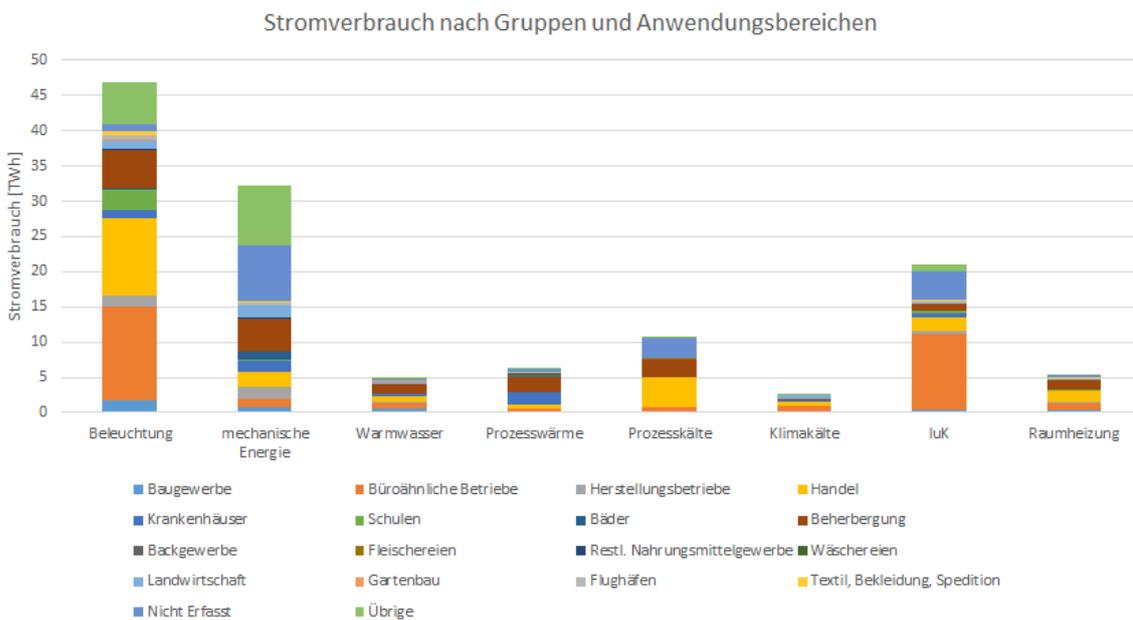


Abbildung 34: Anteiliger Stromverbrauch der Anwendungsbereiche in den Sektorgruppen im Jahr 2013 (Daten aus [BAR15])

Der Energieverbrauch im Sektor GHD ermöglicht einen ersten **Überblick über energieintensive Sektorgruppen** und entsprechende **Handlungsschwerpunkte**. Zur Betrachtung von Flexibilitätspotenzialen kann eine Einschränkung der betrachteten Energieträger, Sektorgruppen und Anwendungsbereiche vorgenommen werden. So steht der Stromverbrauch auf Grund der Herausforderung steigender Anteile erneuerbarer Energien im Fokus der Betrachtung von Energieflexibilität.

Stromintensive Sektorgruppen werden im Folgenden näher betrachtet. Hierzu zählen maßgeblich die Gruppen 2. Büroähnliche Betriebe, 4. Handel und 6. Beherbergung. Auf Grundlage der Anwendungsbereiche lässt sich der Fokus weiterhin eingrenzen. So stellt Beleuchtung zwar den energieintensivsten Bereich dar, eignet sich auf Grund der mangelnden Speicherfähigkeit der Nutzenergie Licht jedoch nicht für Energieflexibilitätsmaßnahmen. Auch eine zeitliche Verschiebung der geleisteten Funktion (Helligkeit) ist nicht zweckmäßig. Wärme- und Kältetechnik, sowie Ventilation und Klimatisierung stellen hingegen Anwendungsbereiche dar, die gut für Energieflexibilität genutzt werden können. Hierbei dienen Raumluft, flüssige Kühlmedien und Feststoffe (gekühlte Produkte) als Speichermedien. Im Folgenden werden die Flexibilitätspotenziale des Sektors GHD auf Grundlage dieser Eingrenzung betrachtet.

3.1.2 Flexibilitätspotenzial

Das Flexibilitätspotenzial des Sektors wurde bereits in mehreren Studien analysiert (vgl. Abbildung 35). Hierbei müssen die Studien jedoch hinsichtlich der betrachteten Art des Potenzials unterschieden werden. Während die Studien [KLO07; APE12; WIN11] jeweils eine Art des Potenzials beleuchten, betrachten [WOH20] sowohl das theoretische, das technische wie auch das praktische Potenzial. In der Studie wird ebenfalls der Bezug zu den vergangenen aufgezeigten Studien aufgezeigt.

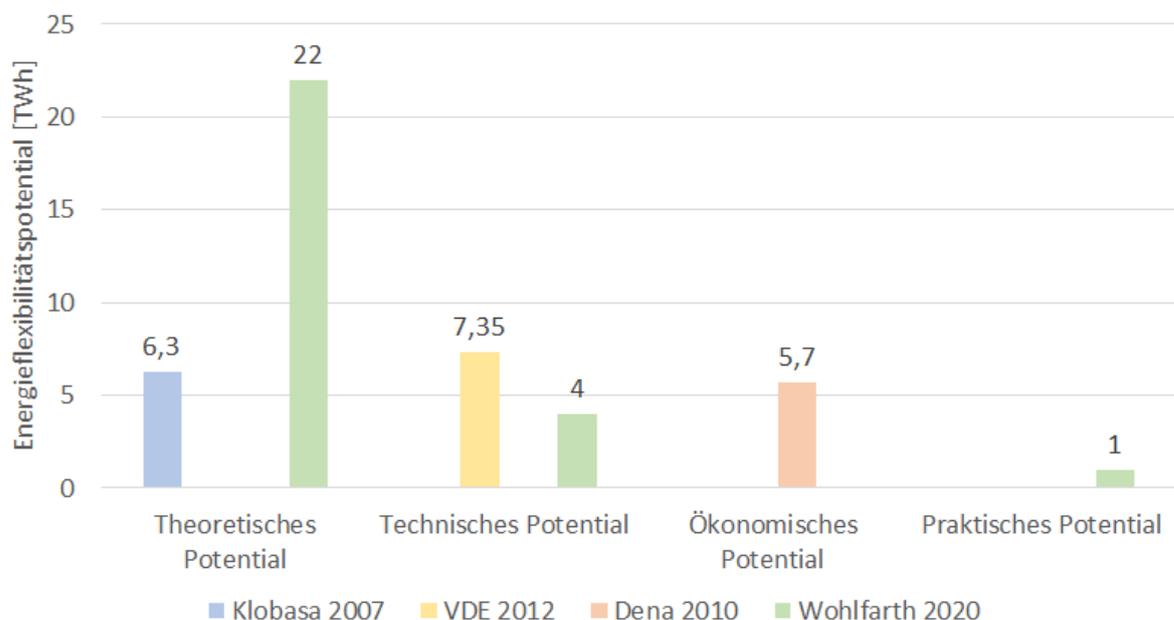


Abbildung 35: Ergebnisse des Energieflexibilisierungspotenzials des Sektors GHD verschiedener Studien [WOH20; KLO07; APE12; WIN11]

Die Studie von [WOH20] betrachtet eine Stichprobe von 1584 Unternehmen aus den energieintensiven Sektorgruppen Büroähnliche Betriebe, Handel und Beherbergung. Die Gruppen Handel und Beherbergung wurden weiterhin in die zugehörigen Splits aufgeteilt.

Die Berechnung der Potenziale beruht auf den folgenden Gleichungen:

Theoretisches Potenzial

$$P_{theo} = \sum_1^{i,n} a_{i,n} \cdot m_{i,n} \cdot p_i$$

Technisches Potenzial

$$P_{tech} = \sum_1^{i,n} P_{theo,i,n} \cdot l_{i,n}$$

Praktisches Potenzial

$$P_{prakt} = \sum_1^s P_{tech,s} \cdot w_s$$

n = ID des Unternehmens

i = ID des Anwendungsbereichs

a = Verfügbarkeit des Anwendungsbereichs *i* im Unternehmen *n*

m = Quantifizierte Nutzenergie (z.B. m³ Kühlvolumen oder Raumlufte)

p = spezifischer durchschnittlicher Stromverbrauch der Anwendung bezogen auf die Nutzenergie

l = Zeitliches Lastverschiebungspotenzial (Stunden pro Tag und Tage pro Jahr)

w = Demand Response Bereitschaftsindikator innerhalb des Splits nach Größe des Unternehmens

s = Split nach Größe des Unternehmens

Das **theoretische Potenzial** repräsentiert den Energieverbrauch der Vorhandenen Anwendungen für die vorkommenden Anwendungen innerhalb einer Gruppe. Die Summe stellt den Gesamtenergieverbrauch der betrachteten Gruppen dar. Im **technischen Potenzial** wird der Anteil des theoretischen Potenzials dargestellt, der für Flexibilität genutzt werden kann ohne die Funktion der Anwendung einzuschränken. Dieser Anteil wird aus der möglichen Dauer der Lastverschiebung bezogen auf ein Jahr berechnet. Hierbei werden ebenfalls Faktoren wie Behaglichkeit und saisonale Temperaturschwankungen mit einbezogen.

3.2 Flexibilitätspotenzial der Sektorgruppen und Anwendungsbereiche

Im Folgenden wird auf das **theoretische und das technische Potenzial** innerhalb der Anwendungsbereiche und der Sektorgruppen eingegangen. Das praktische Potenzial wird auf Grundlage der Bereitschaft von Unternehmen, automatisierte Lastverschiebung zu implementieren, berechnet. Somit wurde keine anwendungsspezifische Auswertung des praktischen Potenzials vorgenommen.

3.2.1 Flexibilitätspotenzial nach Anwendungsbereichen

Die Potenziale der Anwendungsbereiche sind in Abbildung 36 dargestellt. Diese können zusammenfassend der Ventilation & Klimatisierung (VAC) und der Kältetechnik zusammengefasst werden (vgl. schwarze Kästen in Abbildung 36). Die Anteile des

technischen Potenzials am theoretischen Potenzial dieser übergeordneten Gruppen betragen 5,7 % (VAC) und 12,9% (Kältetechnik). Die Abbildung zeigt das theoretische Potenzial und das technische Potenzial nach Anwendungsbereichen.

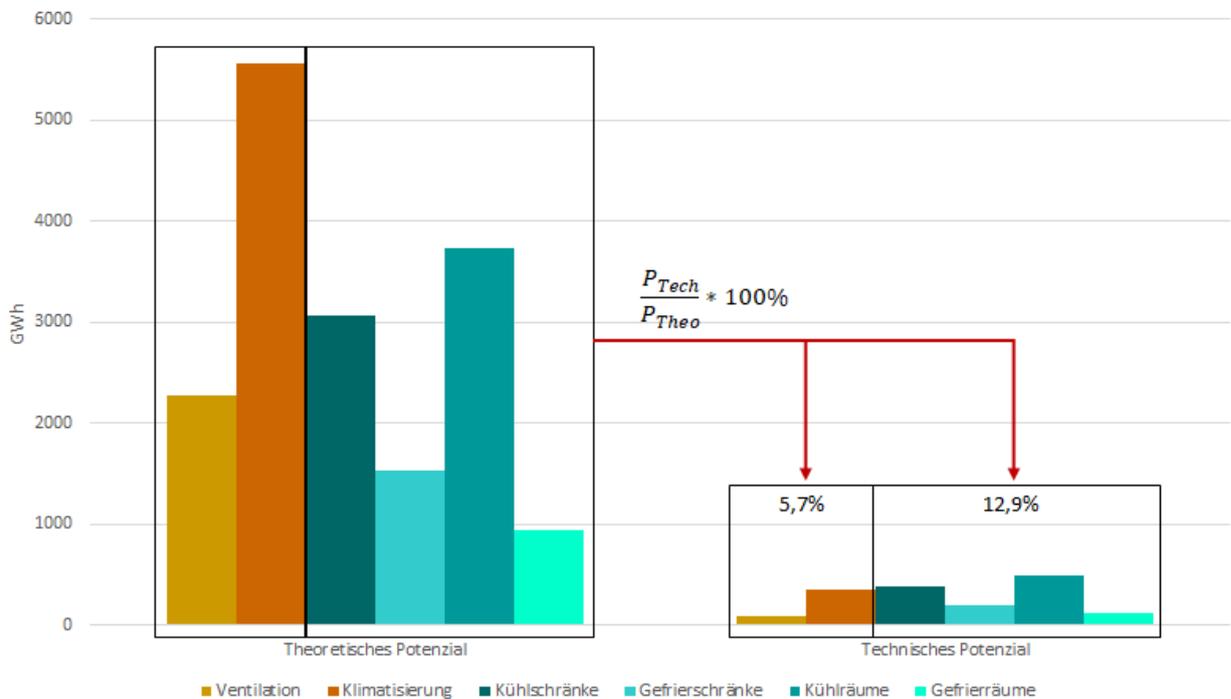


Abbildung 36: Theoretisches und technisches Flexibilitätspotenzial im Sektor GHD aufgeschlüsselt nach Anwendungsbereichen (Daten aus [WOH20])

Auf Grund eines geringen spezifischen Lastverschiebungspotenzials des Anwendungsbereichs Klimatisierung weist dieser zwar das größte theoretische Potenzial auf, jedoch nicht das größte technische Potenzial. Die hohen spezifischen Lastverschiebungspotenziale in der Kältetechnik indizieren, dass auch in Anwendungsbereichen mit geringerer Durchdringung hohe technische Flexibilisierungspotenziale auf Grund der weniger strengen Rahmenbedingungen erreicht werden können. Grundlage des Flexibilisierungspotenzials stellen dabei häufig thermische Speicher dar.

Neben vorangehend betrachteten Anwendungsbereichen wurden in der Studie von [Wohlfarth et al. 2020] weitere Anwendungsbereiche erfasst, die Flexibilitätspotenziale aufweisen. Hierzu zählen die Bereiche Warmwasser, Wärmepumpen und Nachtspeicheröfen. Für diese Anwendungsbereiche wurde zusätzlich das praktische Flexibilitätspotenzial berechnet. Die **über die Sektorgruppen aggregierten Flexibilitätspotenziale** sowie deren spezifische Durchdringung sind in Abbildung 37 dargestellt.

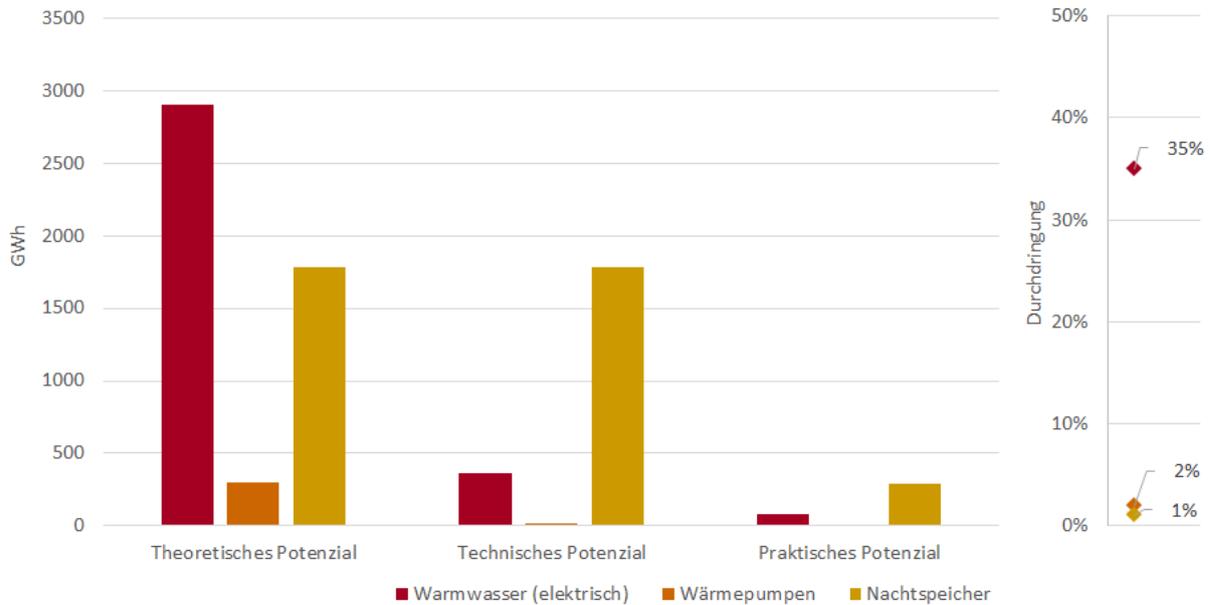


Abbildung 37: Theoretisches, Technisches und Praktisches Flexibilitätspotenzial weiterer Anwendungsbereiche und deren Durchdringung in den Sektorgruppen Büroähnliche Betriebe, Handel und Beherbergung (Daten aus [WOH20])

Wärmepumpen und Nachtspeicher weisen hierbei eine sehr geringe **Durchdringung** auf, wobei von Wärmepumpen ein Zuwachs zu erwarten ist und bei Nachtspeichern eine Abnahme. Die elektrische Warmwasserbereitung findet zumindest in 35% der Unternehmen Anwendung, weist aufgrund des geringen spezifischen Lastverschiebungspotenzials ein geringes technisches Potenzial auf.

3.2.2 Flexibilitätspotenzial nach Sektorgruppen

Neben den Anwendungsbereichen können die Ergebnisse auch hinsichtlich der **Sektorgruppen und der dazugehörigen Splits** betrachtet werden. Die einzelnen Betrachteten Splits lassen sich allgemein den Sektorgruppen Büroähnliche Betriebe, Handel und Beherbergung zuordnen (schwarze Kästen in Abbildung 38). Abbildung 38 zeigt das theoretische, technische und praktische Potenzial der jeweiligen Splits. Der Bereitschaftsfaktor, der das praktische Potenzial bestimmt wurde für die Splits spezifisch für die drei betrachteten Unternehmensgrößen kleine, mittlere und große Unternehmen empirisch bestimmt. Unabhängig der Anwendungsbereiche kann dieser mit in die Betrachtung der Sektorgruppen aufgenommen werden.

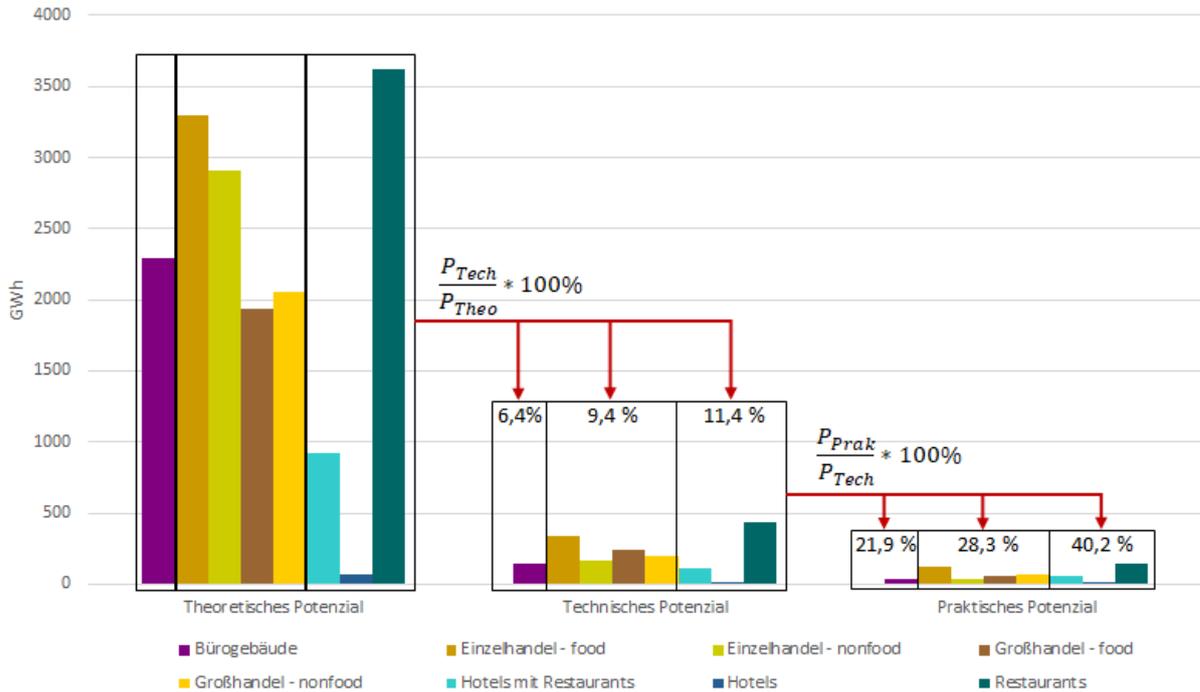


Abbildung 38: Theoretisches, technisches und praktisches Flexibilitätpotenzial im Sektor GHD aufgeschlüsselt nach Sektorgruppen (Daten aus [WOH20])

Es ist zu erkennen, dass sowohl die **funktionsorientierten Rahmenbedingungen**, wie auch die Bereitschaft zur Implementierung von automatisiertem Demand Response im Bereich Beherbergung am höchsten ausfällt. Das geringste Potenzial hingegen bietet die Gruppe Büroähnliche Betriebe. Der Anteil von technischem zu theoretischem Potenzial lässt auf die Durchdringung der Anwendungsbereich in den Sektorgruppen, wie auch deren Verteilung schließen. Abbildung 39 zeigt die Durchdringung der Anwendungsbereiche VAC und Kältetechnik in den betrachteten Sektorgruppen.

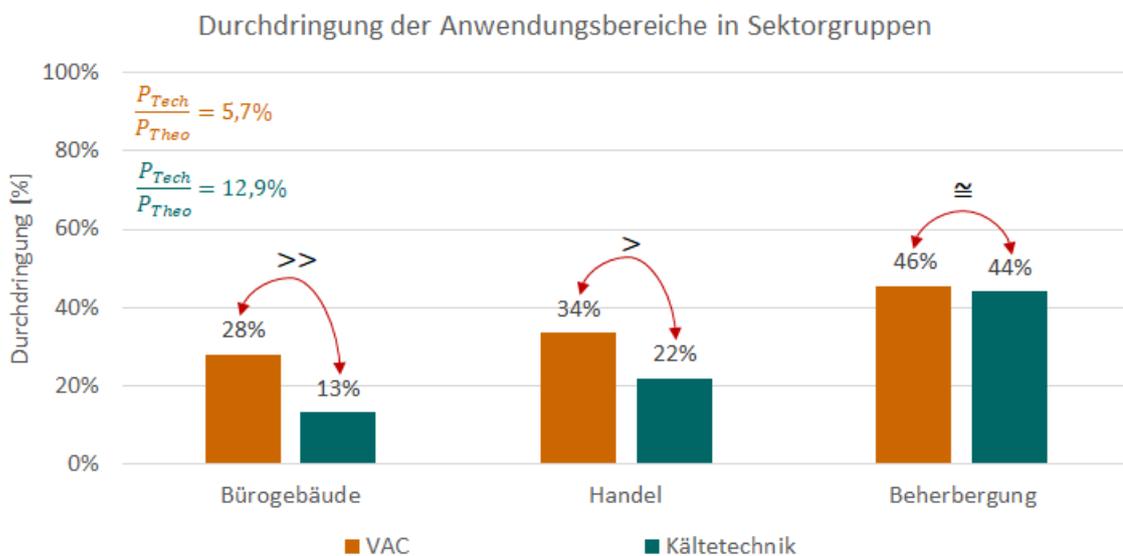


Abbildung 39: Durchdringung der Anwendungsbereiche im Sektor GHD aufgeschlüsselt nach Sektorgruppen (Daten aus [WOH20])

Es lässt sich deutlich erkennen, dass die Durchdringung anwendungsunabhängig von Bürogebäuden über Handel hin zu Beherbergung steigt. Ein starker Anstieg ist vor Allem hinsichtlich der Kältetechnik zu verzeichnen, welche im Vergleich zu VAC einen hohen Anteil von technischem zu theoretischem Potenzial aufweist.

3.3 Zusammenfassung

Das gesamte praktische Flexibilisierungspotenzials des Sektors GHD liegt bei etwa 1 TWh, und damit bei rund 1 % des gesamten Sektorstromverbrauchs von 129 TWh [WOH20; UMW20]. Hierbei bieten die **Anwendungsbereiche** Kältetechnik und Ventilation und Klimatisierung gute Ansatzpunkte. Entsprechend der spezifischen Durchdringung dieser Bereiche liegen die maßgeblichen Potenziale in den Sektorgruppen Bürogebäude, Handel und Beherbergung. **Handlungsschwerpunkte** zur weiteren Ausschöpfung von Potenzialen liegen vor Allem in der Bereitschaft von Unternehmen, Maßnahmen zur Lastverschiebung zu ermöglichen. Gerade in kleineren Unternehmen ist die Bereitschaft hierfür gering, was mit dem geringen Gesamtenergieverbrauch und der somit eingeschränkten Möglichkeiten zur Partizipation an Märkten für Flexibilität zusammenhängt. Die Bereitschaft, Lastverschiebungsmaßnahmen zu ermöglichen würde den Anteil des praktischen zum technischen Potenzial erhöhen. Hierzu muss jedoch die **Attraktivität** von Energieflexibilisierungsmaßnahmen für Unternehmen mit potenziell flexiblen Verbrauchern erhöht werden. Zudem kann durch die **Elektrifizierung** von Anwendungsbereichen, die bisher durch fossile Brennstoffe gedeckt werden, zusätzliches theoretisches Potenzial freigeschaltet werden, indem die Durchdringung flexibilisierbarer Technologien erhöht wird. Da Raumwärme den mit Abstand energieintensivsten Anwendungsbereich hinsichtlich des Brenn-/Kraftstoff- und Fernwärmeverbrauchs darstellt, kann das theoretische Potenzial durch eine steigende Durchdringung von Wärmepumpen erhöht werden.

4 Wohnsektor

Im Folgenden wird das theoretische Flexibilisierungspotenzial möglicher Technologien zur Erzeugung von elektrischer sowie thermischer (Wärme/Kälte) Energie als auch der Verbrauch von elektrischer Energie in Wohngebäuden unter den Gesichtspunkten *Technologiedurchdringung* und *theoretisches Leistungspotenzial* bewertet.

4.1 Überblick

Die *Durchdringung* einer Technologie gibt prozentual an, in wie vielen der **19,25 Mio. Wohngebäuden in Deutschland am Ende des Jahres 2020** bereits eine Anlage installiert ist [STA19]. Zur Bestimmung der Wohngebäudeanzahl wurden die Vorjahreszahlen linear fortgeschrieben. Es wird davon ausgegangen, dass in einem Wohngebäude maximal eine technische Einheit verbaut ist. Für die Bestimmung des *theoretischen Leistungspotenzials* wird die durchschnittlich anzunehmende Leistung einer Technologie mit der Durchdringung verrechnet, um auf das theoretische Flexibilitätspotenzial rückschließen zu können. Für die Potenzialanalyse wurden die in Abbildung 40 dargestellten Technologien betrachtet.



Abbildung 40: Mögliche Flexibilitätstechnologien in Wohngebäuden

Die flexible Betriebsweise von Haushaltsgeräten mit geringer Leistung wird nicht betrachtet, da bereits in diversen Studien und Forschungsprojekten gezeigt wurde, dass mit relevanten Komforteinbußen für den Verbraucher zu rechnen ist [DIC14]. Folglich ist die Bereitschaft zur Flexibilisierung dieser Gerätetypen als gering einzuschätzen.

Die Ergebnisse dieser Analyse dienen zur Identifizierung der relevantesten flexibilisierbaren Technologien im Wohngebäudesektor. Die identifizierten Technologien sollen in weiteren Schritten vertieft in ihrem Verhalten betrachtet werden und in die Modellierung von Wohngebäuden berücksichtigt werden.

4.2 Technologien

In den folgenden Abschnitten werden die gezeigten Technologien aus Abbildung 40 hinsichtlich ihres theoretischen Flexibilisierungspotenzial untersucht und beschrieben.

4.2.1 Brennstoffzelle

Im Rahmen des Förderprogramms „Energieeffizientes Bauen und Sanieren – Zuschuss Brennstoffzelle“ wird seit 2016 der Einbau von Brennstoffzellensystemen zur elektrischen und thermischen Versorgung von Wohn- und Nichtwohngebäuden finanziell unterstützt. Vom Beginn des Förderzeitraums bis zum 31.03.2020 wurde die Installation von insgesamt 11.425 Anlagen in Neubauten und bei Sanierungen von Wohngebäuden gefördert [KFW20], vgl. Abbildung 41.

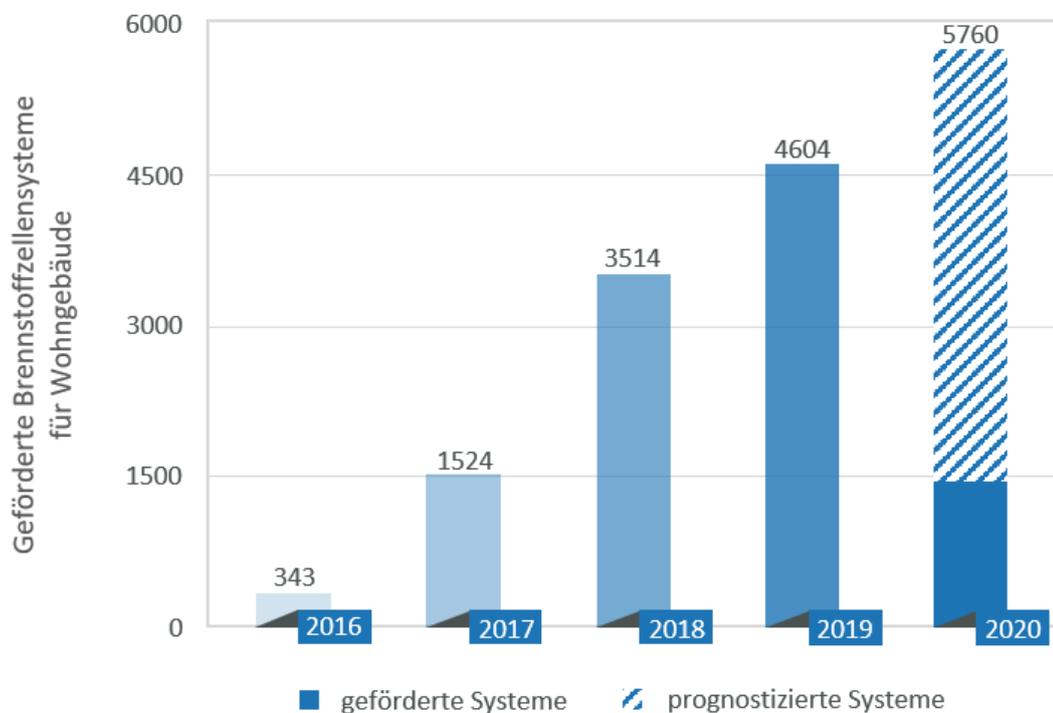


Abbildung 41: Geförderte Brennstoffzellensysteme für Wohngebäude [KFW20]

Zur Bestimmung der Technologiedurchdringung im Wohngebäudesektor wurde angenommen, dass die Förderanzahlen für die verbleibenden drei Quartale des Jahres 2020 dem ersten Quartal gleichen. Zudem wird davon ausgegangen, dass die Anzahl der vor 2016 installierten und nicht geförderten Anlagen verschwindend gering ist. Unter diesen Annahmen ist Ende 2020 mit einer Gesamtanlagenanzahl von 15.700 zu rechnen, was einer **Durchdringung von rund 0,082 %** entspricht.

Zur Abschätzung der durchschnittlichen elektrischen Leistung von Brennstoffzellensystemen in Wohngebäuden wird die Tabelle 12 zur Auslegung eines Mini-BHKWs und die Fördergrenzen von 0,25 bis 5,0 kW_{el} berücksichtigt. Es wird angenommen, dass Brennstoffzellensysteme bisher eher in Einfamilienhäusern installiert wurden und die

Leistungen der Brennstoffzellen demnach bei durchschnittlich 1 kW liegt. Folglich beträgt das **theoretische Leistungspotenzial rund 15,7 MW**.

4.2.2 Elektrische Speicherheizung

Durch steigende Stromkosten und immer geringere Preisunterschiede zwischen Stark- und Schwachlastzeiten führt der Einsatz elektrischer Speicherheizungen heute zu hohen Betriebskosten und weist zudem Komforteinbußen im Vergleich zu anderen Heizungssystemen auf [BEN20]. Nach Hochrechnungen des Bundesverbands der Energie und Wasserwirtschaft (BDEW) nahm der Anlagenbestand von elektrischen Speicherheizungen in den Jahren zwischen 2012 bis 2016 entsprechend von 1.394.000 auf 1.175.000 stetig ab [BDE19], vgl. Abbildung 42.

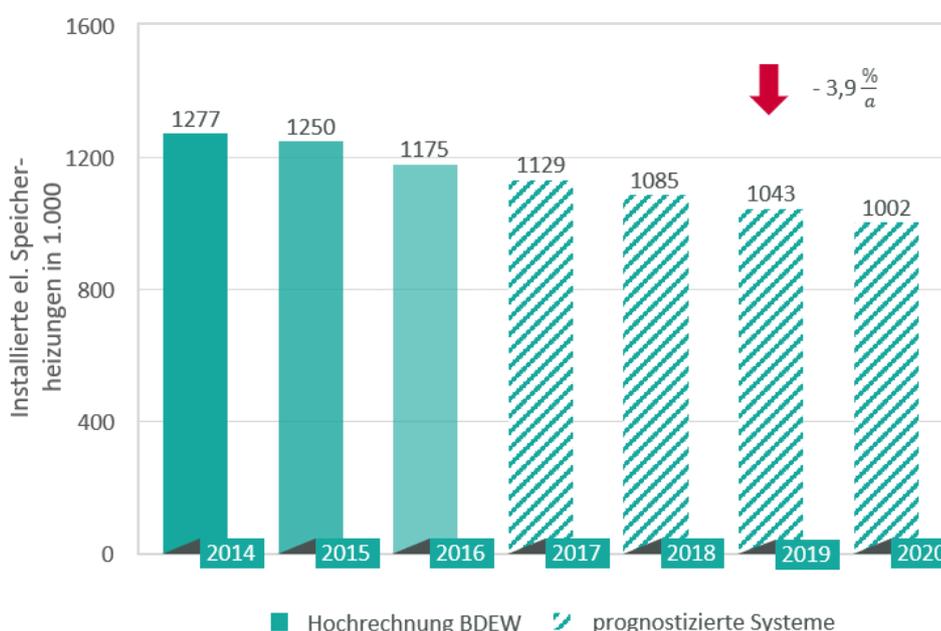


Abbildung 42: Anzahl installierter elektrischer Speicherheizungen [BDE19]

Wird für den Zeitraum von 2017 bis 2020 ein gleichbleibender jährlicher Rückbau von - 3,9 % p.a. angenommen, bedeutet dies für das Jahr 2020 einen Anlagenbestand von rund 1.002.000, was einer **Durchdringung von rund 5,21 %** entspricht.

Die durchschnittliche Leistung von elektrischen Speicherheizungen hängt stark von der zu beheizenden Wohnfläche, der Raumnutzung und der Dämmung ab. Als Richtwerte können die Leistungszahlen pro Quadratmeter aus der Tabelle 11 angenommen werden.

Tabelle 11: Leistungsbedarf einer elektrischen Speicherheizung (Deckenhöhe: 2,6 m in W/m²) [MÄR20]

Raum	Altbau	Neubau	Fertighaus	Niedrigenergie
Wohnzimmer	110	80	70	45
Küche	90	50	50	40
Bad	130	110	90	60
Schlafzimmer	80	65	60	40

Unter der Annahme, dass ein Großteil der elektrischen Speicherheizungen in Gebäuden verbaut sind, die Ende des 20. Jahrhundert errichtet wurden, kann von einer elektrischen Leistung von rund 90 W/m² ausgegangen werden. Multipliziert mit der durchschnittlichen Wohnfläche von 92 m² ergibt sich bei einer Durchdringung von 5,3 % ein **theoretisches Leistungspotenzial von 9.200 MW** [BDE19].

4.2.3 Elektrochemische Energiespeicher

Im Speichermonitoring der RWTH Aachen wird für das Jahr 2018 eine kumulierte Anzahl aus KfW geförderten und nicht geförderten (Schätzung) installierten Heimspeichern in Deutschland von rund 126.000 angegeben [FIG18], vgl. Abbildung 43.

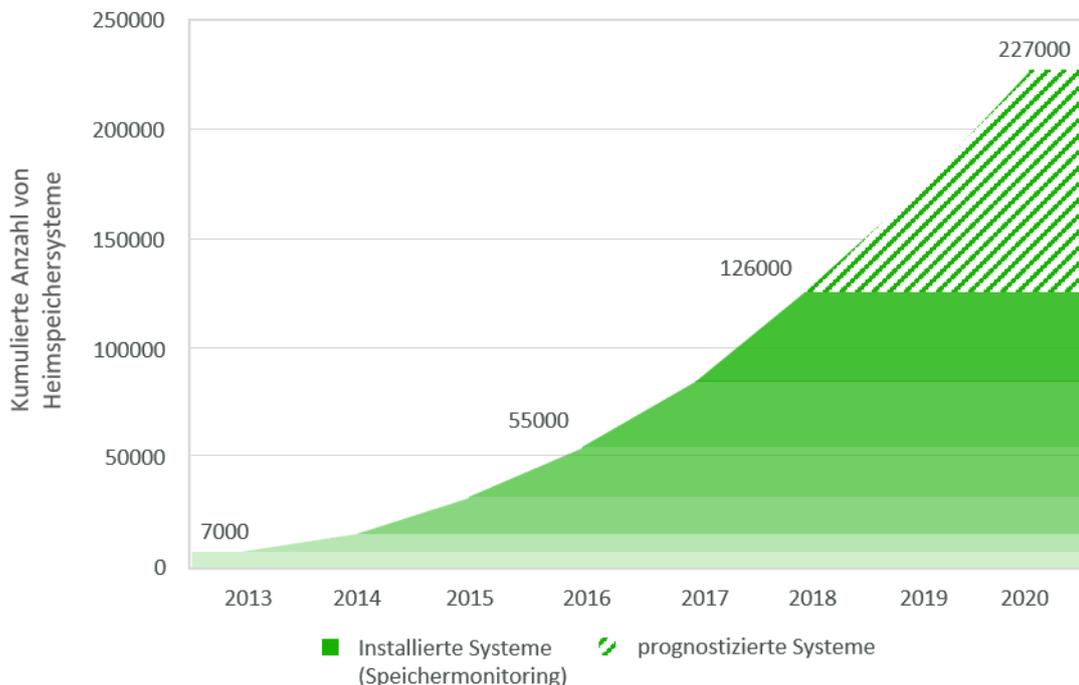


Abbildung 43: Gesamtanzahl an Heimspeichersysteme [FIG18]

Unter Berücksichtigung der Förderprogramme von Bund und Ländern sowie dem deutlichen Zuwachs dezentraler Speichersysteme in den letzten Jahren wird für das Jahr 2020 mittels polynomischer Regression mit Grad 2 (s. Gleichung 1) eine kumulierte Anzahl von rund 227.000 Heimspeichern angenommen.

$$\text{Anzahl}_{\text{kumuliert}} \approx 3875 \cdot x^2 - 3467,9 \cdot x + 11081 \quad (1)$$

Da davon auszugehen ist, dass pro Wohngebäude nur ein Speicher verbaut wird, ergibt sich eine **Durchdringung von rund 1,18 %**. Unter der Annahme einer mittleren Leistung von 3,2 kW pro Speichersystem, führt dies zu einem **theoretischen Leistungspotenzial von rund 726 MW** [FIG18].

4.2.4 Klimaanlage

Auf Grund der mangelhaften Datenbasis wird zur Bestimmung der Durchdringung von Klimaanlage im Wohnsektor eine Studie der „Directorate-General for Transport and Energy“

(DG TREN) aus dem Jahr 2009 verwendet [ADN08]. In dem untenstehenden Diagramm werden ausschließlich festinstallierte Splitsystem mit einer Kühlleistung ≤ 12 kW berücksichtigt (vgl. Abbildung 44). Für bewegliche Geräte ist eine externe Steuerung derzeit nicht denkbar und damit ein flexibler Einsatz ausgeschlossen.

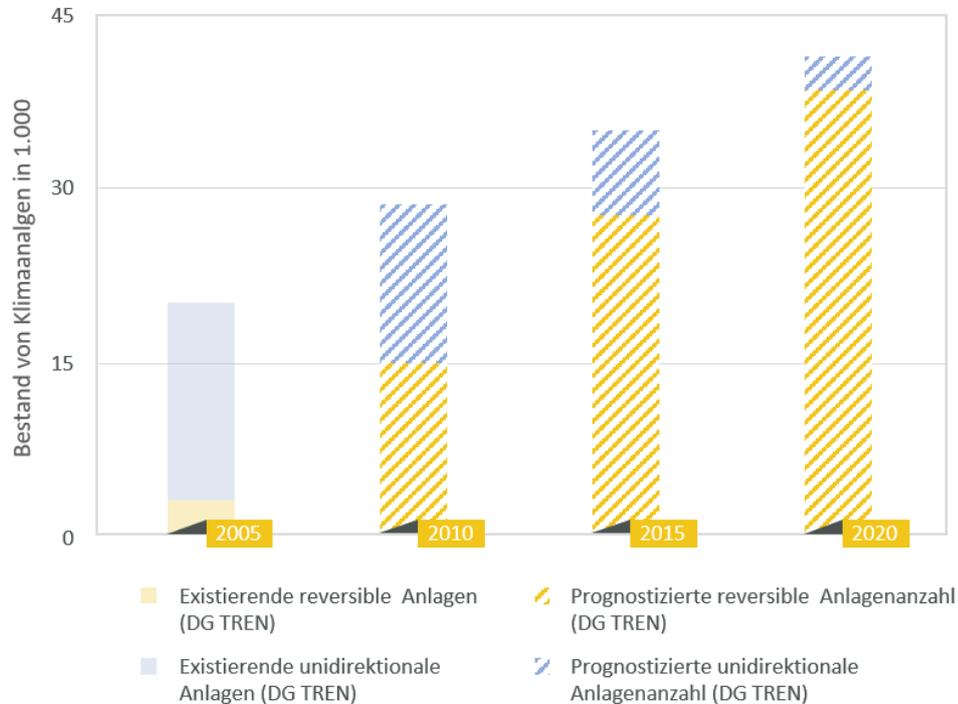


Abbildung 44: Bestand von Klimaanlage in deutschen Haushalten [ADN08]

In der Studie werden reversible und unidirektionale Klimaanlage getrennt voneinander betrachtet. Es wird davon ausgegangen, dass die meisten Systeme im Rahmen von Modernisierungen eingesetzt werden, wo eine Tendenz zu reversiblen Geräten angenommen wird. Folglich steigt der Bestand im Zeitraum zwischen 2010 bis 2020 an reversiblen Anlagen an, während die Anzahl unidirektionaler Systeme sinkt. Die Gesamtanlagenanzahl soll bis 2020 auf rund 41.400 ansteigen, was einer **Durchdringung von rund 0,22 %** entspricht.

Für die Bestimmung des theoretischen Energieumsatzes wird die vom Umweltbundesamt ermittelte durchschnittliche Leistung von 4,6 kW/pro Anlage verwendet [BAR10]. Multipliziert mit der Anlagenanzahl ergibt sich ein **theoretisches Leistungspotenzial von rund 190 MW**.

4.2.5 Lüftungssystem

Die Marktdaten für Wohnungslüftungsgeräte vom Fachverband Gebäude-Klima und dem Bundesverband der deutschen Heizungsindustrie zeigen, dass seit 2011 der kumulierte Absatz von zentralen und dezentralen kontrollierten Wohnraumlüftungsanlagen (KWL) kontinuierlich steigt (vgl. Abbildung 45). Die stetige Zunahme ist in erster Linie auf strengere Vorschriften für den Neubau von Wohngebäuden zurückzuführen. Konkret auf den § 6 der Energieeinsparverordnung (EnEV), welcher die Luftundurchlässigkeit der wärmeübertragenden Umfassungsfläche bei ausreichender Mindestluftwechselzahl vorschreibt.

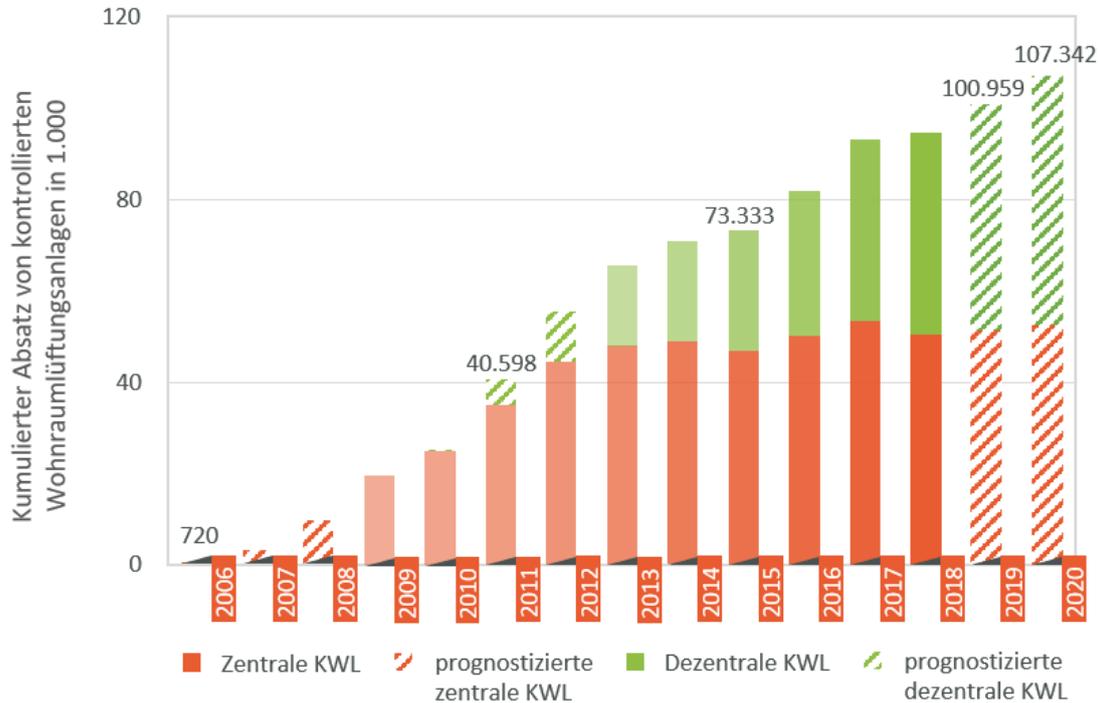


Abbildung 45: Kumulierter Absatz von kontrollierten Wohnraumlüftungsanlagen [PFE15; HÄN19]

Um die Gesamtanzahl von KWL-Anlagen zu bestimmen, wurden unterschiedliche Regressionsverfahren verwendet. Für dezentrale Systeme wurde eine lineare Marktentwicklung angenommen (s. Gleichung 2). Der Absatz von den zentralen KWL-Anlagen wurde auf Basis der historischen Daten mittels polynomischer Regression mit Grad 3 bestimmt (s. Gleichung 3).

$$\text{Absatz}_{\text{dezentral}} \approx 5482,6 \cdot x + 11081 \quad (2)$$

$$\text{Absatz}_{\text{zentral}} \approx -7,6505 \cdot x^3 - 196,38 \cdot x^2 + 8688,2 \cdot x - 9972 \quad (3)$$

Für den Zeitraum von 2006 bis 2020 ergibt sich eine Gesamtanzahl von circa 842.500, was einer **Durchdringung von rund 4,37 %** entspricht.

Unter der Annahme, dass eine Lüftungsanlage in einem durchschnittlich großen Einfamilienhaus typischerweise eine Leistungsaufnahme von unter 60 Watt hat, ergibt sich ein **theoretisches Leistungspotenzial von rund 50,5 MW** [GRE18].

4.2.6 Mini-BHKW

Der Leitfaden für kleine Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit enthält die in Tabelle 12 dargestellten Richtwerte zur Auslegung von Mini-BHKWs in Abhängigkeit des Einsatzbereichs [MÜL09].

Tabelle 12: Auslegung von Mini-BHKWs nach Einsatzbereich

Versorgung von	Elektrische Leistung [kW]	Thermische Leistung [kW]
Wohnung/EFH/DHH	ca. 1	4 – 10
Mehrfamilienhaus	5 – 30	bis 100
Reihenhaus	5 – 30	bis 100
Seniorenheim	10 – 30	bis 200

Für den Wohngebäudesektor liegt die elektrische Leistung eines Mini-BHKWs zwischen 1 kW und 30 kW. Da die Staffelung der neuzugelassenen KWK-Anlagen des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) diese Richtwerte nicht berücksichtigt, werden ausschließlich Anlagen mit einer elektrischen Leistung $\leq 20 \text{ kW}_{\text{el}}$ berücksichtigt.

Nach den Zulassungszahlen der BAFA war 2013 mit 5.534 seit Aufzeichnungsbeginn das Jahr mit der maximalen Anzahl an Neuzulassungen für Mini-BHKWs $\leq 20 \text{ kW}_{\text{el}}$. (vgl. Abbildung 46) Seitdem sinkt die Zahl für neu zugelassene Geräte in diesem Leistungsbereich jährlich bis auf 2.729 Neuzulassungen im Jahr 2019 [ZWI20].

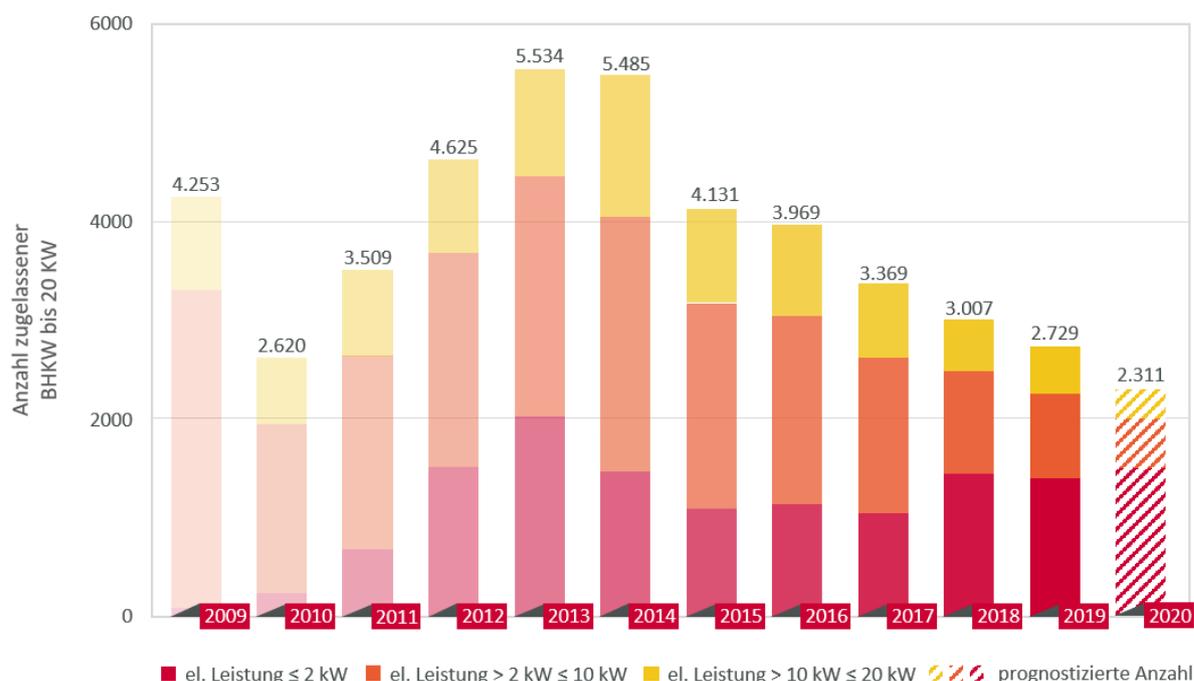


Abbildung 46: Anzahl zugelassener BHKWs bis 20 kW [ZWI20]

Zur Bestimmung der Neuzulassungen im Jahr 2020 wurden die Werte auf Basis der fünf vorangegangenen Jahre linear extrapoliert. Während das für Anlagen im elektrischen Leistungsbereich zwischen 2 kW_{el} bis $20 \text{ kW}_{\text{el}}$ einen Rückgang der Zulassungszahlen bedeutet, steigen die Neuzulassungen für Kleinstanlagen $\leq 2 \text{ kW}_{\text{el}}$ leicht an.

Für den betrachteten Zeitraum und Leistungsbereich ergibt sich mit einer Gesamtanzahl von knapp 45.500 zugelassenen Anlagen eine ungefähre **Durchdringung von rund 0,24 %**.

Aufgrund der geringen Datenlage für die Zulassungszahlen von Mini-BHKWs vor 2009 wurden diese Anlagen bei der Bestimmung der Durchdringung nicht berücksichtigt.

Zur Bestimmung des Leistungspotenzials wurde in Abhängigkeit der Zulassungszahlen der unterschiedlichen Leistungsstufen eine gewichtete durchschnittliche elektrische Leistung von 6 kW_{el} bestimmt. Daraus ergibt sich ein **theoretisches Leistungspotenzial von rund 273,3 MW** für Mini-BHKWs in Haushalten.

4.2.7 Wärmepumpe

Die Absatzstatistik des Bundesverbandes Wärmepumpe e.V. zeigt, dass im Zeitraum zwischen dem Jahr 2000 bis 2019 sich die Absatzzahlen von Wärmepumpen pro Jahr von 11.000 auf 99.000 Anlagen verneunfacht haben [BWP19] (vgl. Abbildung 47). Dabei nahm in erster Linie der Absatz an Heizungswärmepumpen zu. Die Verkaufszahlen für Warmwasserwärmepumpen stiegen verglichen damit nur leicht an.

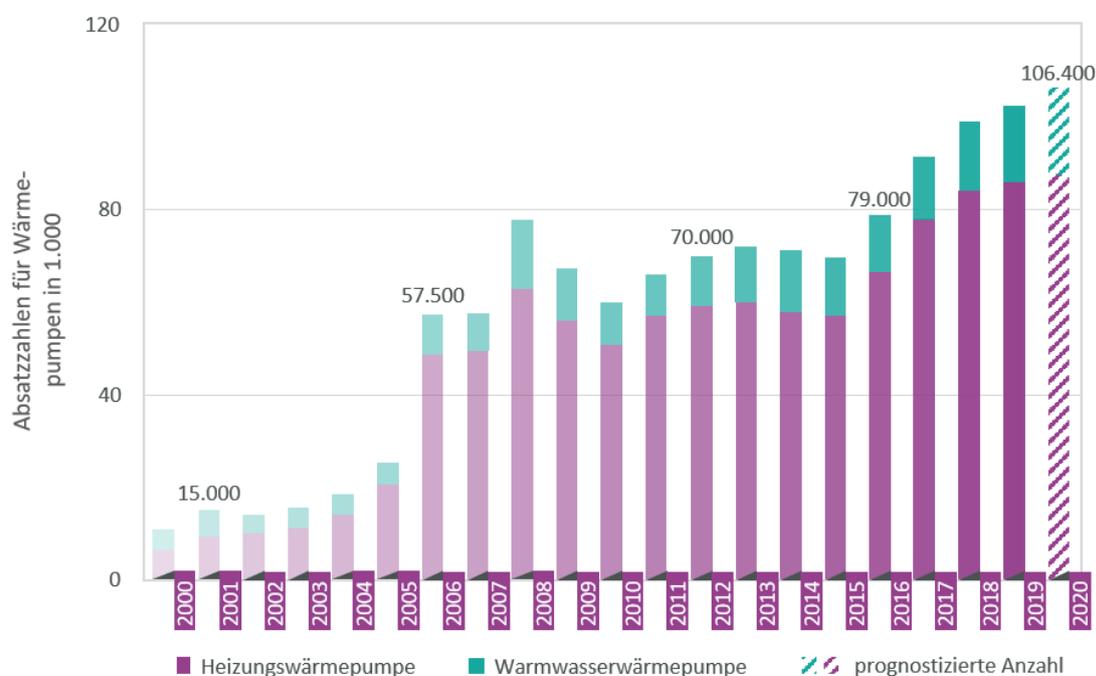


Abbildung 47: Absatzzahlen für Wärmepumpen [BWP19]

Für das Jahr 2020 wurden die Absatzzahlen für Warmwasser- und Heizungswärmepumpen linear extrapoliert. Aufsummiert über die letzten 20 Jahre ergibt sich damit eine Gesamtabsatzzahl von 1.245.600. Um zu berücksichtigen, dass nicht jede Wärmepumpe in einem Wohngebäude verbaut wird, wird ein Korrekturfaktor von 5 % angenommen [PLA10]. Folglich sind rund 1.183.000 Wärmepumpensysteme in Wohngebäuden verbaut, was einer **Durchdringung von rund 6,15 %** entspricht. Da die durchschnittliche Lebensdauer einer Wärmepumpe 15-20 Jahre beträgt, werden früher installierte Pumpen nicht mit einberechnet.

Die zur Bestimmung des theoretischen Leistungspotenzials benötigte durchschnittliche Leistung einer Wärmepumpe hängt stark vom Typ, der Auslegung und den Temperaturbereichen ab. Für Heizungswärmepumpen wird eine thermische Leistung von 10 kW und für Warmwasserwärmepumpen eine thermische Leistung von 2 kW angenommen

[PLA10]. Bei einem Coefficient of Performance (COP) von 3,5 bedeutet dies eine elektrische Leistung von 2,85 kW_{el} für die Heizungswärmepumpe und 0,57 kW_{el} für die Warmwasserpumpe. Multipliziert mit den Anlagenanzahlen in Wohngebäuden (Heizung: 981.400, WW: 201.800) ergibt sich ein **theoretisches Leistungspotenzial von rund 2.920 MW**.

4.2.8 Elektromobilität

In diesem Kapitel wird das Flexibilisierungspotenzial betrachtet, welches sich durch privat genutzte und an Privatgebäuden geladenen Elektrofahrzeuge ergibt. Eine Betrachtung gewerblich genutzter Elektrofahrzeuge findet sich in Kapitel 5.

Nach den vom Kraftfahrtbundesamt veröffentlichten Zahlen zum Fahrzeugbestand am 1. Januar 2020 werden rund 2 % der Personenkraftwagen (PKW) mit alternativen Antriebsarten betrieben (vgl. Abbildung 48). Im Vergleich zum Vorjahr stieg die Anzahl der Elektrofahrzeuge (EV) von 83.175 auf 136.617 und die Menge von Hybridfahrzeugen (PHEV) von 341.411 auf 539.383 in den Jahren von 2019 bis 2020 an [KBA20]. Dabei beinhalten EV sowohl batterieelektrisch betriebene Fahrzeuge als auch Plug-In Hybride (PHEV).

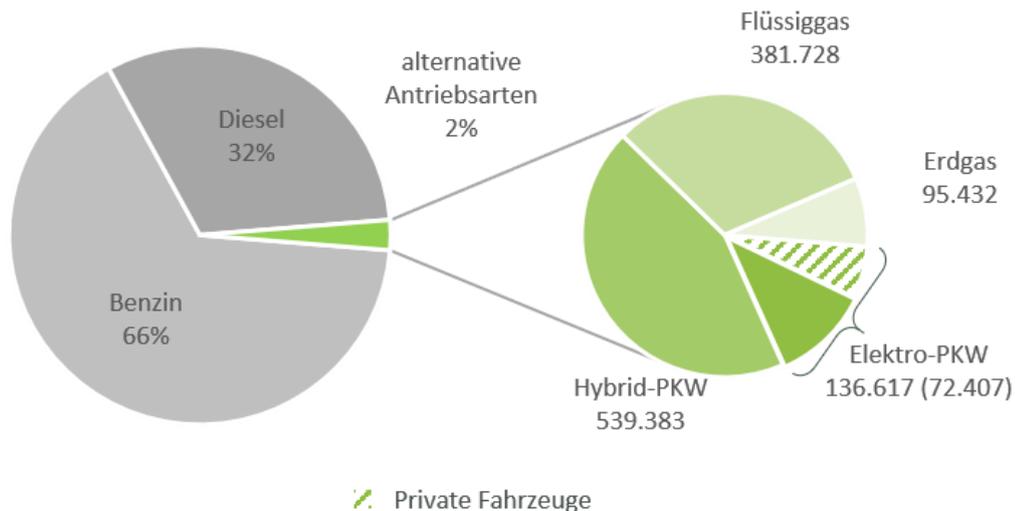


Abbildung 48: Anzahl der alternativen Antriebsarten 2020 [KBA20]

Die Anzahl privat zugelassener EV betrug 70.544, die Gesamtanzahl privat zugelassener PKW 42,47 Mio. Daraus ergibt sich eine **Durchdringung von 0,17 %** (Anteil von EV an allen privat zugelassenen PKW) [KBA20]. Unter der Annahme, dass rund 95 % der privaten EV-Eigentümer mit dem Kauf des Fahrzeugs eine Ladestation installieren, sind 2020 knapp 67.000 Ladestationen an/in Wohngebäuden vorhanden, was einer **Durchdringung von rund 0,35 %** entspricht. PHEVs werden für die Bestimmung steuerbarer privater Ladestationen nicht berücksichtigt, da für diese Fahrzeugklasse Ladeleistungen unter 3,7 kW ausreichend sind.

Das Energiepotenzial beschreibt das theoretische Potenzial zur Nutzung von EV für Energieflexibilisierungsmaßnahmen durch den zur Verfügung stehenden Energieinhalt der Fahrzeugbatterien. Für privat genutzte EV ergibt sich, berechnet aus dem Fahrzeugbestand

und einem angenommenen durchschnittlichen Energieinhalt der Batterie pro Fahrzeug von 40 kWh [DEN20], ein **Energiepotenzial von 2,82 GWh**.

Derzeit sind die gängigsten Leistungsstufen für private Ladestationen 3,7 kW, 11 kW und 22 kW [EON]. Für die durchschnittliche Leistung werden Ladestationen mit Leistung von 11 kW angenommen, da diese ein Elektro-PKW in wenigen Stunden vollständig laden können und die Kosten vergleichsweise gering bleiben. Folglich ergibt sich ein **theoretisches Leistungspotenzial von rund 737 MW**.

4.3 Ergebnisse

Zusammenfassend wird in Abbildung 49 für die betrachteten Technologien das theoretische Leistungspotenzial logarithmisch über die Durchdringung aufgetragen. Darüber hinaus ist für jede Technologie ein Trendpfeil für das Jahr 2030 eingezeichnet. Der Trend einer Technologie wird auf Basis der Absatz- oder Zulassungszahlen der letzten Jahre bestimmt.

Für **Brennstoffzellen**, **Klimaanlagen** und **Mini-BHKWs** ist zu erkennen, dass derzeit nur wenige Geräte im Wohngebäudesektor installiert sind und folglich ein geringes theoretisches Leistungspotenzial existiert. Aus diesem Grunde werden diese drei Technologien im weiteren Verlauf nicht weiter betrachtet. Forschungsprojekte mit einem zeitlichen Horizont über 2030 hinaus müssten aufgrund der bestehenden staatlichen Fördermaßnahmen und den deutlich steigenden Förderzahlen in den letzten Jahren insbesondere die Relevanz von Brennstoffzellen im Wohngebäudesektor nochmals prüfen.

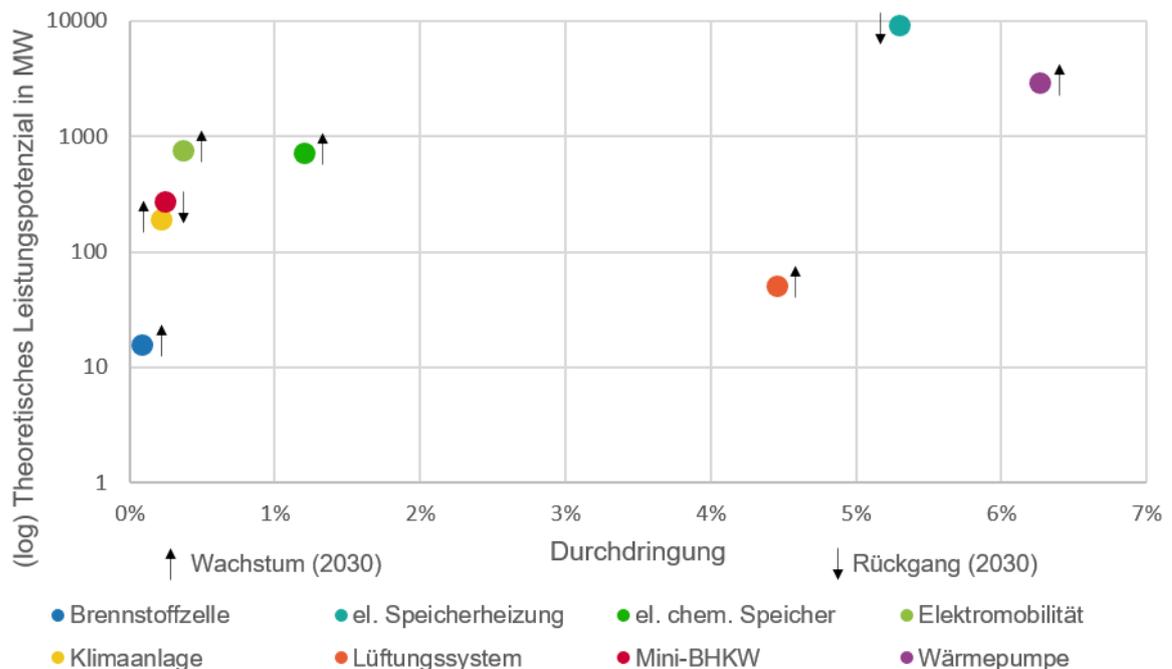


Abbildung 49: Ergebnisse der theoretischen Potenzialanalyse

Für den Sektor der **privaten Elektromobilität** ist zu erkennen, dass bereits bei geringen Durchdringungsraten ein theoretisches Leistungspotenzial von über 700 MW bereitgestellt

werden könnte. Unter anderem da die Elektromobilität durch den Bund bezuschusst wird, die Technologie gerade schnelle Fortschritte macht und das Angebot an Elektrofahrzeugen am Markt wächst, ist mit einer deutlichen Erhöhung der Durchdringung und des Leistungspotenzials in den nächsten Jahren zu rechnen. Zudem könnte die Möglichkeit des bidirektionalen Ladens die Elektromobilität besonders attraktiv für flexible Anwendungen machen. Folglich wird diese Technologie bei den weiteren Ausarbeitungen und Modellierungen berücksichtigt.

Die **elektrochemischen Heimspeichersysteme** besitzen bei einer leicht höheren Durchdringungsrate ein ähnlich hohes theoretisches Leistungspotenzial. Wie der Elektromobilitätssektor wurden Heimspeichersysteme bis zum Ende des Förderprogramms der KfW-Bank 2018 staatlich gefördert und seitdem durch Bundesländer spezifische Programme unterstützt. Darüber hinaus werden bei zukünftig steigenden Strompreisen und PV-Anlagen die aus der Förderung fallen, vermehrt Eigenheimbesitzer ein Speichersystem nachrüsten, um die Eigenverbrauchsquote zu erhöhen und Netzbezugskosten zu reduzieren. Aus diesen Gründen werden elektrochemische Heimspeichersysteme näher betrachtet.

Lüftungssysteme sind in Haushalten derzeit deutlich weiterverbreitet als private Ladesäulen oder Heimspeichersysteme, und werden auch zukünftig infolge geänderter Bauvorschriften an Bedeutung zunehmen. Trotz der höheren Durchdringungsraten ist aber das theoretische Leistungspotenzial wesentlich geringer als bei Lade- oder Speichersystemen, da Lüftungsanlagen in wesentlich kleineren Leistungsbereichen arbeiten. Das Flexibilisierungspotenzial ist daher als gering einzustufen und wird dementsprechend nicht weiter berücksichtigt.

Elektrische Speicherheizungen wurden bereits seit Ende des 20. Jahrhunderts in Haushalten verbaut und haben bei einer Durchdringung von 5,3 % mit 9.200 MW das größte theoretische Leistungspotenzial der in dieser Analyse betrachteten Technologien. Infolge steigender Stromkosten sind die Zahlen der letzten Jahre jedoch deutlich rückläufig und es ist davon auszugehen, dass Anlagenbesitzer Sanierungsmaßnahmen einer Flexibilisierung der Systeme vorziehen. Aus den genannten Gründen, werden elektrische Speicherheizung trotz des derzeit bestehenden Potenzials nicht berücksichtigt.

Wärmepumpen haben sich bereits als eine gängige Möglichkeit zum Heizen etablieren und haben mit fast 3.000 MW bereits heute ein beachtliches theoretisches Leistungspotenzial. Da Wärmepumpen zudem noch durch das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle gefördert werden, wird diese Technologie in weiteren Fragestellungen betrachtet.

5 Elektromobilität

In diesem Abschnitt wird das theoretische Flexibilisierungspotenzial beim Einsatz von Elektrofahrzeugen in Kombination mit Ladestationen (AC, DC) beschrieben. Dazu werden Ergebnisse zu privat genutzten Elektrofahrzeugen aus Abschnitt 4.2.8 aufgegriffen, und um Erkenntnisse zu gewerblich genutzten Fahrzeugen ergänzt. Herauszustellen ist, dass die Elektromobilität als eine Querschnittstechnologie angesehen wird und somit Einsatz in den Sektoren Industrie (siehe Kapitel 2) und Gewerbe, Handel, Dienstleistung (siehe Kapitel 3) sowie Haushalte (siehe Kapitel 4) findet. Das theoretische Flexibilisierungspotenzial wird unter den Gesichtspunkten *Technologiedurchdringung* und *theoretisches Potenzial* bewertet. Letzteres schlüsselt sich auf in das *Leistungs-* sowie das *Energiepotenzial*.

In den nachfolgenden Kapiteln folgt beginnend eine Darstellung der Rahmenbedingungen (siehe Abschnitt 5.1). Anschließend werden die Technologien für die gewerbliche Elektromobilität beschrieben und deren Durchdringung und Leistungspotenzial für das Jahr 2019 ermittelt, gefolgt von einem Ausblick auf die mögliche Entwicklung in den nächsten Jahren (siehe Abschnitt 5.2). Abschließend werden die Ergebnisse zusammengefasst und mit einem Fazit versehen (siehe Abschnitt 5.3).

5.1 Rahmenbedingungen

Die Anzahl der elektrischen und elektrifizierten Fahrzeuge in Deutschland nimmt derzeit exponentiell zu, wenn auch bisher auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau. Beispielhaft ist nachfolgend der Fahrzeugbestand in Deutschland sowie die absolute Anzahl und der relative Anteil von Elektrofahrzeugen (EV) am Fahrzeugbestand für die Jahre 2011 bis 2020 abgebildet (siehe Abbildung 50).

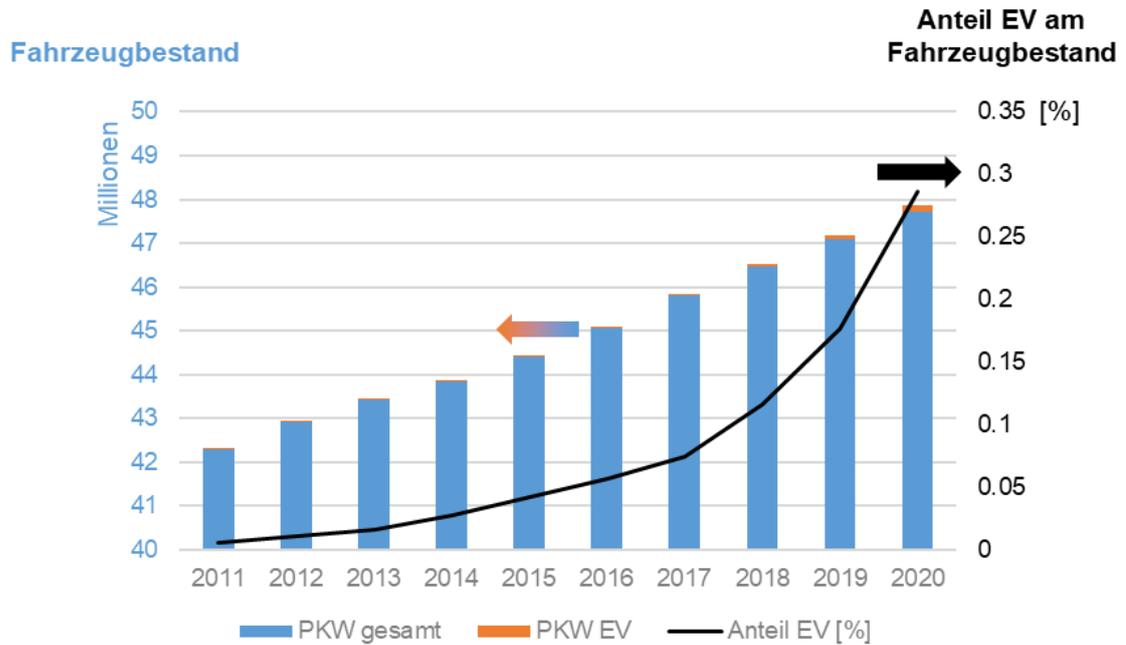


Abbildung 50: Fahrzeugbestand sowie absolute Anzahl und relativer Anteil von Elektrofahrzeugen am Fahrzeugbestand in Deutschland, 2011-2020, basierend auf Daten von [KBA20]

Auf Grund von gesetzlichen Rahmenbedingungen, des Marktangebots an elektrische Fahrzeugen und Ladepunkten, sowie der Kundennachfrage nach Elektrofahrzeugen ist davon auszugehen, dass sich der dargestellte exponentielle Wachstumstrend in die Zukunft fortsetzen wird. Daher erscheint eine Betrachtung des Energieflexibilisierungspotenzials durch die Einbindung von EV ins Energiesystem äußerst sinnvoll.

Nachfolgend werden relevante Technologien im Kontext der Elektromobilität und deren Nutzung als Energieflexibilisierungsoption näher betrachtet.

5.2 Technologien

Wesentliche Technologien, welche hier untersucht werden, sind Fahrzeuge und die Ladestationen. Bei den Fahrzeugen werden explizit die Fahrzeugkategorien Kraffräder und sonstige Krafffahrzeuge aus der Betrachtung ausgeschlossen [KBA20].

Nachfolgend werden erst Fahrzeuge, und anschließend Ladestationen, unter dem Gesichtspunkt des Energieflexibilisierungspotenzials näher betrachtet.

5.2.1 Fahrzeuge

Zunächst werden die einzelnen Fahrzeugklassen Personenkraftwagen (PKW), Kraftomnibusse und Lastkraftwagen, Zugmaschinen (LKW) separat betrachtet. Anschließend erfolgt ein gemeinsamer Ausblick auf die kommenden Jahre für alle Fahrzeugklassen. Im Gegensatz zu der Nutzung von privaten Elektrofahrzeugen werden Fahrzeuge in gewerblichen Betrieben stärker und regelmäßiger eingesetzt. [DÜT14]

Personenkraftwagen

An dieser Stelle wird zwischen privat und gewerblich genutzter PKW unterschieden. Grund hierfür ist, dass der Ort der Ladestation für EV Auswirkungen auf das Energieprofil des Standorts der Ladestation hat. Dieser Standort ist demnach, je nach Nutzungsart, entweder ein (privater) Haushalt oder ein gewerblicher Standort.

Privat genutzte PKW

Die Potenzialermittlung für privat genutzte PKW erfolgt in Abschnitt 4.2.8. Es wurde eine **Technologiedurchdringung von 0,17 %** (Anteil von EV an allen privat genutzten PKW) sowie ein **Energiepotenzial von 2,82 GWh** ermittelt.

Gewerblich genutzte PKW

In Deutschland gab es am 01. Januar 2020 laut dem Kraftfahrt-Bundesamt 5,23 Mio. gewerblich genutzte PKW. Die **Anzahl gewerblich genutzter EV betrug 66.016**, bei 136.617 EV insgesamt (gewerblich und privat). Daraus ergibt sich eine gewerbliche Halterquote von 48,3 % und eine **Durchdringung von 1,3 %** (Anteil von EV an allen gewerblich genutzten PKW). [KBA20]

Zur Ermittlung der Menge an elektrischer Energie, welche durch diese gewerblichen Flotten potenziell für Energieflexibilisierungsmaßnahmen genutzt werden können (Energiepotenzial), wird der Energieinhalt pro EV ermittelt. Geht man – analog zu den privat genutzten EV – von einem durchschnittlichen Energieinhalt von 40 kWh pro Fahrzeug aus [DEN20], ergibt sich für die gesamte gewerblich genutzte EV Flotte ein **Energiepotenzial von 2,57 GWh**. Dies beschreibt die theoretisch durch EV für Energieflexibilisierungsmaßnahmen bereitgestellte Energiemenge und bietet einen Anhaltspunkt für diejenige Energiemenge, die innerhalb eines betrachteten Zeitraums tatsächlich genutzt werden kann.

Das **Gesamt-Energiepotenzial für PKW beträgt demnach 5,39 GWh** (2,82 GWh privat und 2,57 GWh gewerblich).

Auf das Leistungspotenzial (in MW) durch EV wird – für alle Fahrzeugklassen – im Abschnitt zur Ladeinfrastruktur näher eingegangen.

Kraftomnibusse

Am 1. Januar 2020 waren in Deutschland insgesamt 81.364 Omnibusse zugelassen, davon **385 elektrisch betriebene Busse** [KBA20]. Demnach beträgt in dieser Fahrzeugklasse die **Durchdringung von EV 0,5 %**. Es ist davon auszugehen, dass nahezu alle diese Fahrzeuge gewerblich betrieben werden.

Basierend auf den technischen Daten der Hersteller MAN, Mercedes-Benz Bus, Sileo und Solaris wurde ermittelt, dass der Energieinhalt der in diesen Bussen verbauten Batterien ca. 200-550 kWh beträgt (für 2020 am Markt verfügbare Modelle: MAN: 480-640 kWh, Mercedes: 396 kWh, Sileo: 225-450 kWh, Solaris: 203-553 kWh). Da diese Werte in jüngster Vergangenheit jedoch stark zugenommen haben, und daher anzunehmen ist, dass Bestandsfahrzeuge eher einen geringeren Energieinhalt aufweisen, wird an dieser Stelle mit

dem unteren Wert von 200 kWh pro Bus gerechnet. Daraus ergibt sich ein **Energiepotenzial von 77 MWh**.

Lastkraftwagen und Zugmaschinen

3.276.093 Lastkraftwagen und Zugmaschinen (LKW) waren am 1. Januar 2020 in Deutschland zugelassen, davon waren **24.380 elektrisch betriebene LKW** [KBA20]. Die **Durchdringung beträgt somit 0,7 %**. Analog zu den Kraftomnibussen ist auch hier von einer weit überwiegenden gewerblichen Nutzung auszugehen. Zu beachten ist hierbei, dass gemäß der Definition des Kraftfahrtbundesamtes hier auch Nutzfahrzeuge mit einem zulässigen Gesamtgewicht unter 3,5 t eingeschlossen sind.

Eine Studie aus dem Jahr 2019 stellt eine Übersicht des Energieinhalts der Batterien in den zu diesem Zeitpunkt am Markt erhältlichen batterieelektrisch betriebenen LKW auf [LII19]. Er beträgt zwischen 83 und 550 kWh, wobei die meisten Werte zwischen 100 und 350 kWh liegen. Analog zur Argumentation bei den Kraftomnibussen wird zu Ermittlung des Energiepotenzials vom unteren Wert der angegebenen Spanne (100 kWh) ausgegangen, da die zitierte Studie sich auf schwere LKW (> 3,5t bezieht), und leichte LKW mit potenziell kleineren Batterien nicht berücksichtigt. Für batterieelektrisch betriebene LKW ergibt sich demnach ein **Energiepotenzial von 2,44 GWh**.

Zukünftige Entwicklung

Für alle Fahrzeugklassen wird zukünftig eine **starke Zunahme** sowohl der absoluten Anzahl von EV als auch des relativen Anteils von EV an allen zugelassenen Fahrzeug erwartet. Eine Studie von Prognos und BCG geht für 2030 von 7-10 Millionen elektrisch betriebenen PKW sowie 120.000-140.000 elektrisch betriebenen LKW aus [THE19]. Eine Studie der Nationalen Leitstelle Ladeinfrastruktur nimmt hier sogar 14,8 Millionen EV für das Jahr 2030 an [NAT20]. Selbst bei einem unveränderten durchschnittlichen Energieinhalt der Fahrzeugbatterien von 40 kWh ergäbe das alleine für PKW eine Zunahme des theoretischen Energiepotenzials auf 280-592 GWh (heute: 5,39 GWh), also eine Zunahme um etwa den Faktor 50 bis 100. Bei einer Zunahme des Batterie-Energieinhalts fällt dieser Wert entsprechend höher aus.

Diesen Werten liegt eine entsprechende Zunahme der Durchdringung zu Grunde. So wird in [DEN20] davon ausgegangen, dass der Anteil von EV an den PKW Neuzulassungen im Jahr 2030 35-76 % betragen wird (2019: 1,8 %) [KRA20].

5.2.2 Ladestationen

An den einzelnen Standorten der gewerblichen Betriebe kann zur Ladung der Elektrofahrzeuge eine **Ladeinfrastruktur** mit Ladestationen und einem Steuerungssystem installiert werden. Um das theoretische Leistungspotenzial beim Laden von Elektrofahrzeugen angeben zu können, bedarf es einer Analyse der Lademöglichkeiten der Fahrzeugtypen (PKW, Omnibusse und LKW) und der maximalen Ladeleistung der Ladestationen. Beide Kenngrößen limitieren gegenseitig das Laden von Elektrofahrzeugen. Ähnlich wie bei der privaten Elektromobilität muss die Ladeinfrastruktur so ausgelegt werden, dass der

Batterieladezustand der Fahrzeuge ausreicht, um die notwendige Fahrstrecke der Arbeitsvorgänge bereitzustellen.

Technologien

Bei den Ladestationen wird unterschieden zwischen **AC-Ladestationen** und **DC-Ladestationen** (AC: Wechselstrom, DC: Gleichstrom). Die Batterie des Elektrofahrzeuges benötigt zum Aufladen Gleichstrom. Das deutsche Versorgungsnetz wird mit einem Wechselstromsystem betrieben, so dass beim AC-Laden der Wechselstrom über das On-Board-Ladegerät des Fahrzeuges umgewandelt wird. Dies bedeutet, dass beim AC-Laden die Ladeleistung des On-Board-Ladegerätes die begrenzende Größe ist, auch wenn die Ladestation eine höhere Ladeleistung zur Verfügung stellen könnte. Beim DC-Laden hingegen übernimmt ein Gleichrichter in der Ladestation diesen Prozess. Auch beim DC-Laden kann das Fahrzeug für eine geringere Ladeleistung ausgelegt sein. Zusätzlich muss beachtet werden, dass die maximal mögliche Ladeleistung immer in Abhängigkeit vom aktuellen Ladezustand, der Umgebungstemperatur und dem Alter des Systems zu betrachten ist, so dass nicht über die gesamte Zeitspanne des Ladevorgangs die maximal mögliche Ladeleistung abgerufen wird.

AC-Ladestationen

Der Leistungsbereich von AC-Ladestationen oder Steckdosen reicht von 2,3 kW (1-phasig, 230 V, 10 A) bis maximal 43 kW (3-phasig, 400 V, 63 A). Nur selten werden die On-Board-Ladegeräte auf 43 kW ausgelegt. Ladestationen mit 43 kW werden häufig im öffentlichen Raum eingesetzt. Die häufigsten Ladestationen sind vom Typ 2 mit Ladeleistung von 3,7 kW, 11 kW und 22 kW.

DC-Ladestationen

Aktuell gibt es DC-Ladestationen im Leistungsbereich von 22 kW bis 350 kW. In Europa haben sich die beiden Ladestandards CHAdeMO und CCS durchgesetzt. High-Power-Charging-Station (HPC) bieten derzeit eine mögliche Ladeleistung von 350 kW. Bekannte Anbieter sind IONITY und Tesla mit den Superchargern V1 und V2. Die gängigsten Ladestationen haben eine Leistung von 50 kW.

Insbesondere bei Omnibussen kommen entsprechende Docking-Systeme zum Einsatz, wie zum Beispiel Pantographen, welche eine Ladeleistung von 150 kW bis zu 750 kW zur Verfügung stellen, oder induktive Übertragungssysteme, welche eine Ladeleistung von bis zu 200 kW liefern.

Lademöglichkeiten Fahrzeuge

Die Fahrzeuge innerhalb der drei Fahrzeugklassen (PKW, LKW, Omnibusse) weisen unterschiedliche Spezifikationen in Bezug auf die mögliche Ladeleistung auf. Je nach Fahrzeugtyp bieten sie entweder nur AC-Laden oder sowohl AC- als auch DC-Laden an.

Personenkraftwagen

Bei Personenkraftwagen können beim AC-Laden Leistung von 2,3 kW bis 43 kW von den Fahrzeugen geliefert werden. Im Durchschnitt und in Zukunft werden On-Board-Ladegeräte mit

einer Leistung von 11 kW bzw. 22 kW verbaut, um das flexible Laden unabhängig von DC-Ladesystemen zu gewährleisten. Das AC-Schnellladen über 22 kW wird nur von wenigen Fahrzeugen unterstützt. Beim DC-Laden sind aktuell bereits bis zu 270 kW maximal möglich, wie z.B. beim Porsche Taycan. Im Durchschnitt kann man von 50 kW-125 kW ausgehen (z.B. Renault Zoe: 50 kW, VW ID.3: 125 kW).

Omnibusse

Die Fahrzeuge können über drei mögliche Systeme geladen werden. Offboard Top-down-Pantographen, Onboard Bottom-up-Pantographen und Ladung über Stecker. Die maximale Ladeleistung der Ladesysteme wird auch von den Fahrzeugen unterstützt. Aktuell kann man von einer verwendeten Ladeleistung von circa 100 kW ausgehen. Beim Gelegenheitsladen an einer Bushaltestelle werden höhere Ladeleistungen benötigt als beim Depotladen.

Lastkraftwagen und Zugmaschinen

LKWs benötigen beim Laden an öffentlichen Ladestationen mindestens eine Ladeleistung von 150 kW, was auch für zukünftige Betrachtungen angenommen wird.

Ladeinfrastruktur

In diesem Abschnitt wird thematisiert, wie viele Ladestationen auf die Anzahl der Fahrzeuge je Fahrzeugtyp kommen. An dieser Stelle muss genauer betrachtet werden, wo die Ladestationen installiert werden. Entweder diese befinden sich auf dem Betriebshof der Unternehmen, wo die Fahrzeuge geladen werden, und/oder es werden öffentliche Ladestationen genutzt.

Personenkraftwagen

Wie viele Ladestationen je Fahrzeug zur Verfügung stehen, ist sehr von der Nutzung der Fahrzeuge und dem Ladeverhalten abhängig. Je nach Unternehmensstrategie kann von 50 % - 100 % Versorgung ausgegangen werden. Zusätzlichen Einfluss hat es, ob das Laden außerhalb des Betriebshofes an öffentlichen oder privaten Ladestationen eingeplant ist. Bei einer gemittelten Versorgungsquote von 75 % erhält man bei 66.016 gewerblichen EVs eine Anzahl von circa 50.000 Ladestationen. Bei einer Ladeleistung von 11 kW für AC-Laden und 50 kW bei DC-Laden ergibt sich für gewerblich genutzte PKW bei einer Verteilung von 80 % AC-Laden und 20 % DC-Laden ein **elektrisches Leistungspotenzial von 940 MW**. Für privat genutzte PKW wurde ein **Leistungspotenzial von 737 MW** ermittelt (vgl. Abschnitt 4.2.8).

Omnibusse

Bei Omnibussen wird angenommen, dass keine öffentlichen Ladesäulen genutzt werden, da meist die installierte Ladeinfrastruktur des ÖPNV-Anbieters unmittelbar genutzt wird, und diese dahingehend spezifiziert wurde, ein kontinuierliches Mobilitätsangebot zu gewährleisten. Da die Versorgungsquote beim Gelegenheitsladen schlecht abgeschätzt werden kann, wird ausschließlich das Depotladen betrachtet. Hier wird eine Versorgung von 90 % angenommen (Beispiel BVG: 121 Omnibusse und 113 Ladestationen). Bei 385 Omnibussen und einer verwendeten Ladeleistung von 100 kW ergibt sich ein **elektrisches Leistungspotenzial von aktuell 34,7 MW**.

Lastkraftwagen und Zugmaschinen

Elektro-LKWs haben die Möglichkeit auf dem Betriebshof zu laden (Depotladen) sowie zum Gelegenheitsladen bei der Ab- und Beladestelle und an Tankstellen bzw. Rasthöfen. Auf dem Betriebshof wird eine Versorgungsquote von 90 % angenommen, was bei einer verwendeten Ladeleistung von 150 kW zu einem **elektrischen Leistungspotenzial von 3290 MW** führt.

Zukünftige Entwicklung

Neben der **Steigerung der Durchdringung** von batterieelektrischen Fahrzeugen muss die Versorgung mit einer geeigneten Ladeinfrastruktur im ähnlichen Umfang gesteigert werden. Das Verhältnis von öffentlichen Ladestationen zu Fahrzeugen gehen nach Schätzungen von [NAT20] in Abhängigkeit zu der Verfügbarkeit von privaten Lademöglichkeiten von 11:1 zu 23:1 im Jahr 2030.

Neben einer möglichen **Erhöhung des Batterie-Energieinhalts** ist es das Ziel, die Ladedauer möglichst in einen vertretbaren Rahmen zu halten. Ladedauern bis zum Erreichen eines SOC von 80 % sollen zukünftig in 10-15 Minuten erreicht werden, was mit einer **Erhöhung der Ladeleistung** einhergeht. Aktuell liegen die möglichen Ladeleistungen von Fahrzeugen noch unter den Ladeleistungen der Ladestationen. Aufgrund immer höherer Systemspannungen bei den Bordnetzen von bis zu 800 V wird die Lücke in Zukunft aber geschlossen werden. Aktuelle Entwicklungen von Ladestationen lassen von einer maximalen Ladeleistung von bis zu 450 kW in Zukunft ausgehen.

Bei LKWs bedarf es in der Zukunft (bis zum Jahr 2030) laut ACES auf europäischen Autobahnen 6.000 HPC-Ladestationen mit einer Ladeleistung von bis zu 500 kW und zusätzlich weiteren 20.000 Ladepunkte für E-LKWs. Das Anforderungsprofil im Betrieb wäre eine notwendige Speicherkapazität von 600-800 kWh, um 4,5 Stunden Fahrtzeit zu garantieren und eine Ladeleistung von bis zu 1 MW, um innerhalb von 45 Minuten zu laden.

5.3 Ergebnisse

Nachfolgend ist die derzeitige Durchdringung, das Energiepotenzial sowie das Leistungspotenzial für PKW, Omnibusse und LKW in Abbildung 51 grafisch zusammengefasst.

5 Elektromobilität

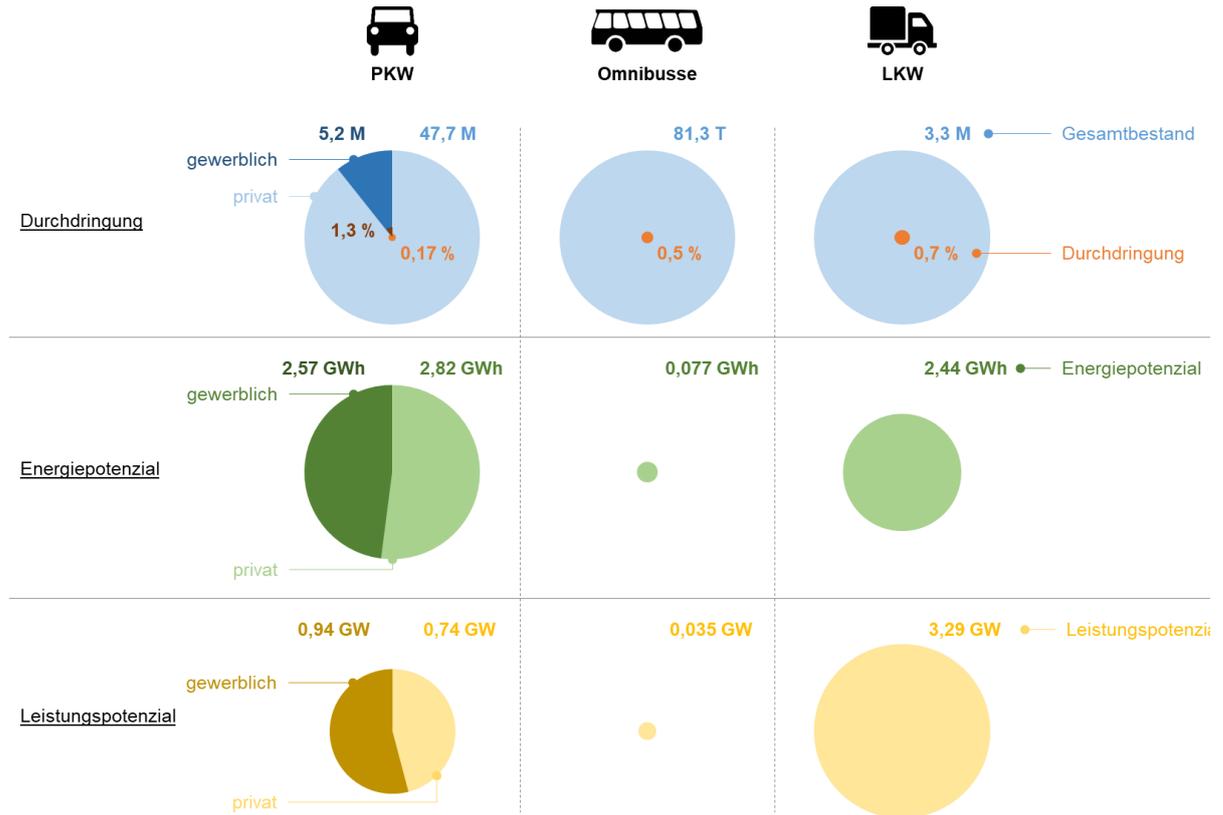


Abbildung 51: Durchdringung von Elektrofahrzeugen, Energiepotenzial und Leistungspotenzial hinsichtlich Energieflexibilisierung, nach Fahrzeugklassen, für das Jahr 2019, basierend auf Daten von [KBA20], [DEN20], [LII19]

Die größte Durchdringung findet sich demnach bei gewerblichen PKW. Das größte Energiepotenzial weisen ebenfalls PKW auf. Das größte Leistungspotenzial ist hingegen bei LKW vorhanden.

Demgegenüber steht ein Endenergieverbrauch des Sektors Verkehr von 751 TWh, davon 12 TWh in Form von elektrischem Strom [UMW20]. Es ist anzunehmen, dass der Anteil von Strom am Endenergiebedarf des Sektors Verkehr zukünftig deutlich zunehmen wird.

Bis zum Jahr 2030 ist mit einer starken Zunahme aller drei ermittelten Faktoren (Durchdringung, Energiepotenzial, Leistungspotenzial) zu rechnen. Auf Grund der dargelegten Trends bei den Zulassungszahlen und der Installationen von Ladepunkten, sowie der Entwicklung hinsichtlich des Energieinhalts von der Fahrzeugbatterien ist davon auszugehen, dass das Energiepotenzial und das Leistungspotenzial durch EV sowohl im gewerblichen als auch im privaten Bereich um ein Vielfaches steigt.

6 Fazit

Die Potenzialanalyse zeigt ein **sektorübergreifendes Potenzial** zur Energieflexibilisierung von ca. **25 GW / 35 TWh/a**. Perspektivisch wird dieses im Jahr 2030, je nach Szenario, ca. 20-40 GW / 27-53 TWh/a betragen [LAD18].

Für den Sektor **Industrie** wurde im Rahmen des Projekts SynErgie das **technische Potenzial** zur Energieflexibilisierung ermittelt. Es beträgt je nach Abrufdauer und Vorzeichen (Lastreduktion oder –erhöhung) **1,09-3,98 GW** bzw. **3,37-7,46 TWh/a**. Perspektivisch bleibt das **Leistungspotenzial bis 2030 nahezu konstant**. Allerdings könnte der Endenergiebedarf durch Hybridisierung und Elektrifizierung einiger Technologien um bis zu 280 TWh/a gesenkt werden. Dies hätte wahrscheinlich zusätzliche Flexibilisierungspotenziale zur Folge [ALE19; ANN17].

Im Sektor **Gewerbe/Handel/Dienstleistungen (GHD)** wurde ein **theoretisches Potenzial von 22 TWh/a, ein technisches Potenzial von 4 TWh/a und ein praktisches Potenzial von 1 TWh/a** ermittelt. Vielversprechende Anwendungsbereiche sind die Kältetechnik, Ventilation und Klimatisierung. Maßgebliche Potenziale liegen in den Sektorgruppen Bürogebäude, Handel und Beherbergung. Auch hier könnten perspektivisch bis 2030 durch Elektrifizierung potenziell fossile Brennstoffe ersetzt und zusätzliche Flexibilitätspotenziale erzeugt werden [WOH20].

Im **Wohnsektor** erfolgte eine Ermittlung des Flexibilisierungspotenzials auf Basis des **theoretischen Leistungspotenzials** (in MW) und der **Technologiedurchdringung** (in %). Diese Analyse hat ergeben, dass die **private Elektromobilität, elektrische Heimspeichersysteme und Wärmepumpen** das größte Potenzial aufweisen, und daher im weiteren Projektverlauf näher untersucht werden sollen. Diese Entscheidung basiert vor allem auf der heutigen und für 2030 projizierten Bedeutung dieser Technologien für Energieflexibilität im Wohnsektor.

Für den Sektor **Elektromobilität**, der einen Querschnittssektor zwischen den anderen drei Sektoren darstellt, wurde insgesamt ein **theoretisches Energiepotenzial von 7,9 GWh** (PKW, Busse und LKW) ermittelt. Dies beschreibt eine Abschätzung des heute in allen elektrisch betriebenen Fahrzeugen dieser Klasse vorhandenen Batterieenergieinhalts. Das **theoretische Leistungspotenzial beträgt rund 5,0 GW** über alle Fahrzeugklassen hinweg. Es ist davon auszugehen, dass beide Werte bis 2030 auf Grund einer stark zunehmenden Verbreitung von Elektrofahrzeugen und Ladesäulen, einer Zunahme des Batterieenergieinhalts sowie der Ladeleistung stark zunehmen werden.

7 Literaturverzeichnis

- [BWP19] bwp Bundesverband Wärmepumpe e.V. (Hg.) (2019): Absatzzahlen & Marktanteile. Online verfügbar unter https://www.waermepumpe.de/fileadmin/user_upload/waermepumpe/03_Politik/Stellungnahme_zum_Gruenbuch__Ein_Strommarkt_fuer_die_Energiewende__-_Bundesverband_Waermepumpe__BWP__e._V.pdf.
- [BAR10] Barthel, Claus; Franke, Moritz; Müller, Peter; Dittmar, Carsten (2010): Analyse der Vorstudien für Wohnungslüftung und Klimageräte. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/3946.pdf>.
- [PLA10] Platt, Michael; Exner, Stephan; Bracke, Rolf (2010): Analyse des deutschen Wärmepumpenmarktes. Bestandsaufnahme und Trends. Hg. v. GZB GEOTHERMIEZENTRUM Bochum. Online verfügbar unter https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/Studien/analyse-waermepumpenmarkt.pdf?__blob=publicationFile&v=2.
- [THE19] The Boston Consulting Group (2019): Analyse Klimapfade Verkehr 2030.
- [WOH20] Wohlfarth, Katharina; Klobasa, Marian; Gutknecht, Ralph (2020): Demand response in the service sector – Theoretical, technical and practical potentials. In: *Applied Energy* 258, S. 114089. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.114089.
- [LAD18] Ladwig, Theresa (2018): Demand Side Management in Deutschland zur Systemintegration erneuerbarer Energien. Dissertation. Technische Universität Dresden, Dresden. Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-236074>.
- [KLO07] Klobasa, Marian (2007): Dynamische Simulation eines Lastmanagements und Integration von Windenergie in ein Elektrizitätsnetz auf Landesebene unter regelungstechnischen und Kostengesichtspunkten. Diss. Nr. 17324 Wiss. ETH Zürich. S.l.: s.n.
- [APE12] Apel, Rolf (2012): Ein notwendiger Baustein der Energiewende: Demand Side Integration. Lastverschiebungspotenziale in Deutschland : Studie der Energietechnischen Gesellschaft im VDE : Gesamttext. Frankfurt am Main: ETG VDE (VDE-Studie).
- [EON]. eon: Elektroautos zuhause laden: Gründe für eine Wallbox fürs Eigenheim. Online verfügbar unter <https://www.eon.de/de/eonerleben/elektroauto-zuhause-laden-wallbox.html>.
- [DÜT14] Dütschke, Elisabeth; Globisch, Joachim; Gnann, Till; Haendel, Michael; Plötz, Patrick; Ullrich, Sandra et al. (2014): Elektromobilität in gewerblichen Flotten. Hg. v. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Karlsruhe.
- [MÜL09] Müller, Wolfgang; Frey, Günther; Dröschel, Barbara; Schunthaus, Jörn et al. (2009): ENERGIE DREIFACH NUTZEN. Strom, Wärme und Klimaschutz: Ein Leitfaden für kleine Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (Mini-KWK). Hg. v. Bundesministerium für Umwelt,

Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Online verfügbar unter http://www.izes.de/sites/default/files/publikationen/EM_7_583_Leitfaden.pdf.

[ALE19] Alexander Sauer, Eberhard Abele, Hans Ulrich Buhl (2019): ENERGIEFLEXIBILITÄT IN DER DEUTSCHEN INDUSTRIE. Ergebnisse aus dem Kopernikus-Projekt – Synchronisierte und energieadaptive Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine fluktuierende Energieversorgung | SynErgie.

[VER19] VDI-Richtlinie VDI 5207, 10.2019: Energieflexible Fabrik: Grundlagen.

[BAR15] Barbara Schlomann; Katharina Wohlfarth; Heinrich Kleeberger; Lukas Hardi; Bernd Geiger; Antje Pich et al. (2015): Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen in Deutschland für die Jahre 2011 bis 2013. Schlussbericht. Hg. v. Fraunhofer ISI, IfE, GfK und IREES.

[UMW20] Umweltbundesamt (2020): Energieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energietraegern-sektoren>.

[BDE19] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (Hg.) (2019): Entwicklung des Wärmeverbrauchs in Deutschland. Basisdaten und Einflussfaktoren. Online verfügbar unter https://www.bdew.de/media/documents/20190529_Waermeverbrauchsanalyse-Foliensatz-2019_42008Va.pdf.

[KBA20] KBA (2020): Fahrzeugzulassungen (FZ), Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen, 1. Januar 2020, FZ 13. Kraftfahrt-Bundesamt.

[KFW20] KfW Kreditanstalt für Wiederaufbau (Hg.) (2020): Förderreport KfW Bankengruppe. Online verfügbar unter https://www.kfw.de/PDF/Unternehmen/Zahlen-und-Fakten/KfW-auf-einen-Blick/F%C3%B6rderreport/KfW-F%C3%B6rderreport_2020.pdf.

[STA19] Statistisches Bundesamt (Destatis) (Hg.) (2019): Gebäude und Wohnungen. Bestand an Wohnungen und Wohngebäuden Bauabgang von Wohnungen und Wohngebäuden Lange Reihen ab 1969 - 2019. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Publicationen/Downloads-Wohnen/fortschreibung-wohnungsbestand-pdf-5312301.pdf?__blob=publicationFile.

[MÄR20] Märkel, Christian; Frahm, Thorben; Doelling, Robert (2020): Heizleistung berechnen. Hamburg. Online verfügbar unter <https://www.heizungsfinder.de/elektroheizung/kosten-preise/heizleistung-berechnen>, zuletzt geprüft am 09.11.2020.

[WIN11] Winter, Wilhelm; Neddermann, Bernd; Knorr, Kaspar; Grave, Katharina; Lindenberger, Dietmar (2011): Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015 - 2020 mit Ausblick auf 2025. In: *Zeitschrift für Energiewirtschaft : ZfE* 35 (2), S. 139–153.

[BEN20] Benthin, Jörn et al.; Krassowski, Joachim et al. (2020): Integrierte Betrachtung von Strom-, Gas- und Wärmesystemen zur modellbasierten Optimierung des Energieausgleichs-

und Transportbedarfs innerhalb der deutschen Energienetze. Oberhausen/Essen,. Online verfügbar unter https://www.gwi-essen.de/fileadmin/user_upload/IntegraNet_0324027_Abschlussbericht.pdf.

[MAR17] Martin Roesch, Martin Brugger, Stefan Braunreuther, Gunther Reinhart (2017): Klassifizierung von Energieflexibilitätsmaßnahmen. In: *ZWF*.

[NAT20] Nationale Leitstelle LAdeinfrastruktur (Hg.) (2020): Ladeinfrastruktur nach 2025/2030: Szenarien für den Markthochlauf. Studie im Auftrag des BMVI. Berlin. Online verfügbar unter https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/11/Studie_Ladeinfrastruktur-nach-2025.pdf, zuletzt geprüft am 19.11.2020.

[DUF17] Dufter, Christa; Guminski, Andrej; Orthofer, Clara; Roon, Serafin von; Gruber, Anna (2017): Lastflexibilisierung in der Industrie - Metastudienanalyse zur Identifikation relevanter Aspekte bei der Potenzialermittlung.

[DIC14] Dickert, Jörg; Panitz, Felix; Schegner, Peter (2014): Lastverschiebungspotenzial von Haushaltsgeräten unter Berücksichtigung von Effizienzsteigerungen und Komfortansprüchen. Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik; Institut für Energietechnik. Dresden. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/profile/Joerg_Dickert/publication/267642554_Lastverschiebungspotenzial_von_Haushaltsgeraeten_unter_Beruecksichtigung_von_Effizienzsteigerungen_und_Komfortanspruechen/links/54574fb40cf2bccc490f793a.pdf.

[PFE15] Pfeiffenberger, Ulrich (2015): Marktentwicklung und Rahmenbedingungen für die Klimaindustrie. Hg. v. Fachverband Gebäude-Klima e. V. Online verfügbar unter <http://docplayer.org/70301967-7-deutsche-waermekonferenz-marktentwicklung-und-rahmenbedingungen.html>.

[ADN08] Adnot, Jérôme et al.; Andre, Philippe et al.; Luis Alexandre, José et al.; Benke, George et al.; Conroy, Amanda et al.; Karatasou, Stavroula (2008): Preparatory study on the environmental performance of residential room conditioning appliances (airco and ventilation). Hg. v. DGTREN. Online verfügbar unter https://www.eup-network.de/fileadmin/user_upload/Produktgruppen/Aircon_Final_report_of_Task_2.pdf.

[KRA20] Kraftfahrt-Bundesamt (Hg.) (2020): Pressemitteilung Nr. 6/2020 - Der Fahrzeugbestand am 1. Januar 2020. Online verfügbar unter https://www.kba.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2020/Fahrzeugbestand/pm06_fz_bestand_pm_komplett.html, zuletzt geprüft am 09.11.2020.

[DEN20] dena Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (2020): Privates Ladeinfrastrukturpotenzial in Deutschland. Herausforderungen bei der Entwicklung der privaten Ladeinfrastruktur zur Beschleunigung des Markthochlaufs der Elektromobilität in Deutschland. Hg. v. dena Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) und Prognos AG.

[GRE18] Greml, Andreas; Kapferer, Roland; Leitzinger, Wolfgang (2018): Strombedarf und Energieeinsparung von Komfortlüftungen. Hg. v. komfortlueftung.at. Online verfügbar unter

http://www.komfortlueftung.at/fileadmin/komfortlueftung/EFH/komfortlueftung.at_-_Info_Nr._23_Strombedarf_und_Energieeinsparung_EFH_V_2.2.pdf.

[LII19] Liimatainen, Heikki; van Vliet, Oscar; Aplyn, David (2019): The potential of electric trucks – An international commodity-level analysis. In: *Applied Energy* 236, S. 804–814. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.12.017.

[FIG18] Figgner, Jan et al. (2018): Wissenschaftliches Mess- und Evaluierungsprogramm Solarstromspeicher 2.0. Jahresbericht 2018. Hg. v. Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe RWTH Aachen. Online verfügbar unter http://www.speichermonitoring.de/fileadmin/user_upload/Speichermonitoring_Jahresbericht_2018_ISEA_RWTH_Aachen.pdf.

[HÄN19] Händel, Claus (2019): Wohnungslüftung auf Stand von Markt und Normen. Marktentwicklung für Wohnungslüftungsgeräte sowie Ausblick zur Regelwerkssetzung der DIN 1946-6 und weiterer Normen. Hg. v. Fachverband Gebäude-Klima e.V. Online verfügbar unter https://www.ikz.de/index.php?id=283&L=1&tx_news_pi1%5Bnews%5D=27874&tx_news_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx_news_pi1%5Baction%5D=detail&cHash=3eeab4b269c338eafda5a9ce3bb9834a.

[ANN17] Anna-Maria Gruber (2017): Zeitlich und regional aufgelöstes industrielles Lastflexibilisierungspotenzial als Beitrag zur Integration Erneuerbarer Energien.

[ZWI20] Zwißler, Johannes (2020): Zulassung von KWK-Anlagen nach dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG). Hg. v. Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle. Online verfügbar unter https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/kwk_statistik_zulassungen_2009_2019.html.