

STUDY

Nr. 404 · November 2018

INNOVATION ENERGIESPEICHER

Chancen der deutschen Industrie

Christine Brandstätt, Jürgen Gabriel, Karin Jahn und Fabian Peters
unter Mitarbeit von Janik Serkowsky

Diese Study erscheint als 404. Band der Reihe Study der Hans-Böckler-Stiftung. Die Reihe Study führt mit fortlaufender Zählung die Buchreihe „edition Hans-Böckler-Stiftung“ in elektronischer Form weiter.

STUDY

Nr. 404 · November 2018

INNOVATION ENERGIESPEICHER

Chancen der deutschen Industrie

Christine Brandstätt, Jürgen Gabriel, Karin Jahn und Fabian Peters
unter Mitarbeit von Janik Serkowsky

© 2018 by Hans-Böckler-Stiftung
Hans-Böckler-Straße 39, 40476 Düsseldorf
www.boeckler.de



„Innovation Energiespeicher“ von Christine Brandstätt, Jürgen Gabriel, Karin Jahn und Fabian Peters ist lizenziert unter

Creative Commons Attribution 4.0 (BY).

Diese Lizenz erlaubt unter Voraussetzung der Namensnennung des Urhebers die Bearbeitung, Vervielfältigung und Verbreitung des Materials in jedem Format oder Medium für beliebige Zwecke, auch kommerziell.

(Lizenztext: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/de/legalcode>)

Die Bedingungen der Creative Commons Lizenz gelten nur für Originalmaterial. Die Wiederverwendung von Material aus anderen Quellen (gekennzeichnet mit Quellenangabe) wie z. B. von Schaubildern, Abbildungen, Fotos und Textauszügen erfordert ggf. weitere Nutzungsgenehmigungen durch den jeweiligen Rechteinhaber.

Satz: DOPPELPUNKT, Stuttgart

ISBN: 978-3-86593-317-1

INHALT

Abkürzungsverzeichnis	9
Zusammenfassung	10
1 Einleitung	15
1.1. Hintergrund	15
1.2. Struktur der Untersuchung	16
2 Spezifische Effekte unterschiedlicher Speicher- technologien	18
2.1. Investition durch unterschiedliche Technologien	21
2.2. Import- und Export-Effekte	25
3 Marktreife der Technologien	30
3.1. Batterien	30
3.2. Elektrolyse	32
3.3. Brennstoffzellen	34
3.4. Methanisierung	36
4 Investitions- und Beschäftigungseffekte	38
4.1. Die Analyseszenarien	38
4.2. Kumulierte Investitions- und Beschäftigungseffekte	41
4.3. Ergebnisse in den Zieljahren 2030 und 2050	45
4.4. Zeitverlauf der Investitions- und Beschäftigungseffekte	46
4.5. Szenariovarianten	49
4.6. Sensitivitätsanalyse	51
4.7. Sonstige Aspekte	53
5 Fazit und Ausblick	55
Literaturverzeichnis	57

Anhang	61
Anhang 1: Methodik der Szenarienauswahl	61
Anhang 2: Methodik der erweiterten Input-Output-Analyse	67
Anhang 3: Daten für die erweiterte Input-Output-Analyse	75
Anhang 4: Literaturverzeichnis zum Anhang	83

Autorinnen und Autoren	88
-------------------------------	-----------

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beschäftigung im Zieljahr 2030/2050	11
Abbildung 2: Kumulierte Investitionen der Szenarien 1 bis 4 (Zieljahr 2030) und der Szenarien 5 und 6 (Zieljahr 2050)	12
Abbildung 3: Beschäftigungseffekte der Szenarien mit Zieljahr 2030 nach Technologien und Art der Beschäftigung	13
Abbildung 4: Kumulierte Ausgaben für eine netzwirksame Leistung von 10 GW _{el} bis 2030 nach Technologieoptionen	21
Abbildung 5: Kumulierte Beschäftigung für eine netzwirksame Leistung von 10 GW _{el} bis 2030 nach Technologieoptionen	23
Abbildung 6: Investitionen und spezifische Beschäftigungseffekte je 1 Mio. Euro Industrieinvestition für die Errichtung von Produktionskapazitäten für eine netzwirksame Leistung von 10 GW _{el} bis 2030 nach Technologieoptionen	25
Abbildung 7: Fertigungskapazität für Lithium-Ionen-Zellen nach Produktionsstandort 2016 und Planung bis 2025	29
Abbildung 8: Bestand an Elektro- und Hybrid-Personenkraftwagen am 1. Januar des jeweiligen Jahres	31
Abbildung 9: Vom Originalszenario zum Analyseszenario und Szenariovarianten	39
Abbildung 10: Kumulierte Investitionen der Szenarien 1 bis 4 (Zieljahr 2030) und der Szenarien 5 und 6 (Zieljahr 2050)	41

Abbildung 11: Kumulierte Investitionen der Szenarien 1 bis 4 (Zieljahr 2030) nach Technologien	42
Abbildung 12: Kumulierte Beschäftigungseffekte der Szenarien 1 bis 4 (Zieljahr 2030) und der Szenarien 5 und 6 (Zieljahr 2050)	43
Abbildung 13: Kumulierte Beschäftigungseffekte der Szenarien mit Zieljahr 2030 – nach Technologien und Art der Beschäftigung	44
Abbildung 14: Beschäftigung im Zieljahr 2030/2050	46
Abbildung 15: Szenario 5 – Entwicklung der Investitionen bis 2050 nach Technologien	47
Abbildung 16: Szenario 5 – Entwicklung der Beschäftigung bis 2050 nach Technologien	48
Abbildung 17: Kumulierte Investitionen in Abhängigkeit vom Importanteil	50
Abbildung 18: Kumulierte Beschäftigung in Abhängigkeit vom Importanteil	51
Abbildung 19: Entwicklung der Kosten (inkl. Installation) von Lithium-Ionen-Batterien	78
Abbildung 20: Fertigungskapazität für Lithium-Ionen-Zellen nach Unternehmenssitz 2016 und Planung bis 2025	78
Abbildung 21: Herstellungskosten Alkalische Elektrolyse	79

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kosten der einzelnen Technologien	20
Tabelle 2: Abhängigkeit der kumulierten Beschäftigungseffekte vom Import (50%) bzw. Export (150%) – Zieljahr 2030	26
Tabelle 3: Große Batteriespeicher im Stromnetz	32
Tabelle 4: Bedeutung der Methoden zur Herstellung von Wasserstoff	33
Tabelle 5: Die Analyseszenarien	40

Tabelle 6: Auswirkung der Veränderung der Eingangsparameter ($\pm 10\%$) auf die Beschäftigungs- und Investitionseffekte	52
Tabelle 7: Analyse der Originalszenarien nach obligatorischen Kriterien	61
Tabelle 8: Auswertung weiterer Originalszenarien – Aufteilung Speicherbedarf	63
Tabelle 9: Die Analyseszenarien	65
Tabelle 10: Bestimmung der Nachfragevektoren	68
Tabelle 11: Beschäftigungseffekte in Personenjahren je 100 Mio. Euro Nettoumsatz	69
Tabelle 12: Branchenspezifische Entwicklung der Arbeitsproduktivität 2005–2016	74
Tabelle 13: Übersicht Pilotprojekte Elektrolyseure in Deutschland	80

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

a. n. g.	anderweitig nicht genannt
BZ	Brennstoffzelle
CH ₄	Methan
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Eneuerbare-Energien-Gesetz)
E-PKW	Elektro-Personenkraftwagen
GW	Gigawatt (10 ⁶ Kilowatt)
GWh	Gigawattstunden (10 ⁶ Kilowattstunden)
GW _{el}	Gigawattstunden, elektrisch
H ₂	Wasserstoff(molekül)
km	Kilometer
KMU	kleine und mittlere Unternehmen
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunden
LKW	Lastkraftwagen
Mio.	Million
Mrd.	Milliarde
MWh	Megawattstunden (10 ³ Kilowattstunden)
Nm ³	Normkubikmeter
PEM	Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse
PJ	Personenjahre
PKW	Personenkraftwagen
P-t-G	Power-to-Gas
P-t-L	Power-to-Liquid-Anlagen
PV	Photovoltaik
TWh	Terawattstunden (10 ⁹ Kilowattstunden)

ZUSAMMENFASSUNG

Der Anteil erneuerbarer Energieträger an der Energiebereitstellung hat – insbesondere beim Strom – in den vergangenen Jahren deutlich zugenommen und wird auch weiterhin ansteigen. Die Integration dieser weitgehend dargebotsabhängigen Energiequellen erfordert zukünftig vor allem im Stromsektor zusätzliche Flexibilitäten. Hierzu gehören

- die Verschiebung von Lasten,
- Im- und Exporte,
- die Nutzung von erneuerbarem Strom in anderen, bislang weniger nachhaltigen Sektoren wie Wärme und Verkehr sowie
- der Einsatz von Speichern.

Die Marktpotenziale und Industriechancen für verschiedene Batteriespeichertechnologien wurden bereits in mehreren Studien untersucht. Allerdings fehlt in den existierenden Untersuchungen zu Speichern bislang ein systematischer Vergleich der Investitionen und Beschäftigungseffekte der unterschiedlichen innovativen Speichertechnologien. Dies ist jedoch eine wichtige Grundlage für die Einschätzung, welche Chancen verschiedene Speicherstrategien für die inländische Industrie eröffnen können.

Die vorliegende Studie befasst sich daher mit der Frage, welche Effekte verschiedene Speicherstrategien in der deutschen Industrie auslösen können. Hierfür wird anhand von Zukunftsszenarien die Bandbreite der Investitions- und Beschäftigungseffekte verschiedener Optionen eingeschätzt. Der Fokus der Studie liegt dabei auf Batteriespeichern und Wasserstofftechnologien. Letztere beinhalten Elektrolyse als Wasserstoffquelle und Methanisierung als Methanquelle sowie Brennstoffzellen als Technologie zur Nutzung der „grünen Gase“.

Basierend auf vorhandenen Studien zur Entwicklung des Energiesystems wurden vier Analyseszenarien ausgewählt, die den Größenkorridor der möglichen Entwicklung bis 2030 widerspiegeln. Die Szenarien unterscheiden sich durch die Annahmen zum Anteil erneuerbarer Energien an der Strombereitstellung und den Umfang des Einsatzes der verschiedenen Speicheroptionen (siehe Kapitel 4.1). Die mögliche Entwicklung bis 2050 wird durch zwei ergänzende Szenarien beleuchtet. Maßstäbe für die Bewertung sind die zu erwartenden Industrieinvestitionen und die Beschäftigungseffekte. Nicht berücksichtigt werden mögliche negative Effekte der Nutzung der Speicher-

technologien wie z.B. der Wegfall von Arbeitsplätzen beim Übergang von Verbrennerfahrzeugen zu Elektromobilen.

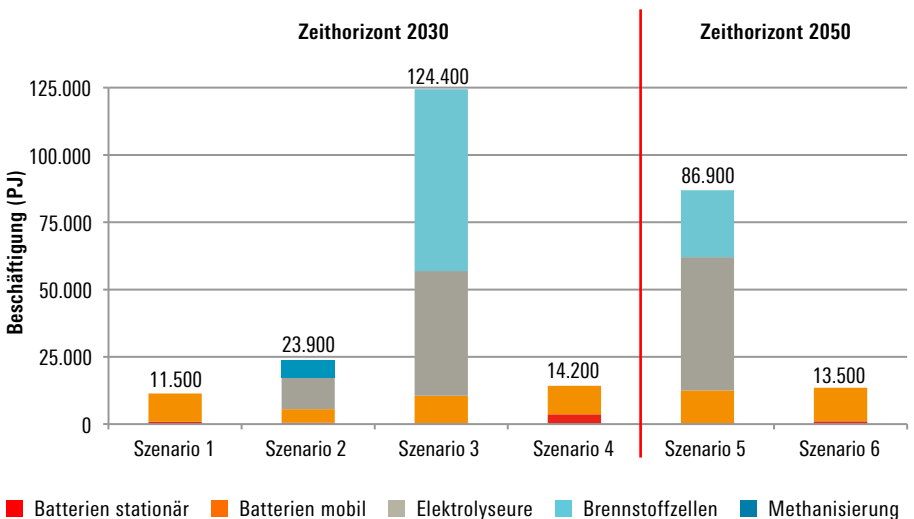
Im Jahr 2030 sind in den unterschiedlichen Szenarien in Abhängigkeit vom Ausbau der erneuerbaren Energien im Stromsektor, den Dekarbonisierungsanstrengungen im Verkehr und vor allem vom Technologiemark zwischen gut 11.000 und fast 125.000 Beschäftigte durch Speichertechnologien möglich (Abbildung 1), im Vergleich zu aktuell rund 960.000 im Maschinenbau und knapp 400.000 in der Herstellung von elektrischer Ausrüstung.

Die hierfür erforderlichen kumulierten Industrieinvestitionen betragen in den Szenarien bis 2030 zwischen 1 und 25 Milliarden Euro (durchschnittlich 0,1 bis 2 Milliarden Euro jährlich). Bis 2050 belaufen sich die Industrieinvestitionen im Durchschnitt auf 0,2 bis 1,2 Milliarden pro Jahr.

Die mit Abstand höchsten kumulierten Investitionen – 25 Milliarden Euro für 2030 bzw. ca. 40 Milliarden Euro für 2050 – weisen die Szenarien mit einer großen Zahl (mobiler) Brennstoffzellen auf (siehe Abbildung 2). Die kumulierten Investitionen der anderen Szenarien sind deutlich geringer

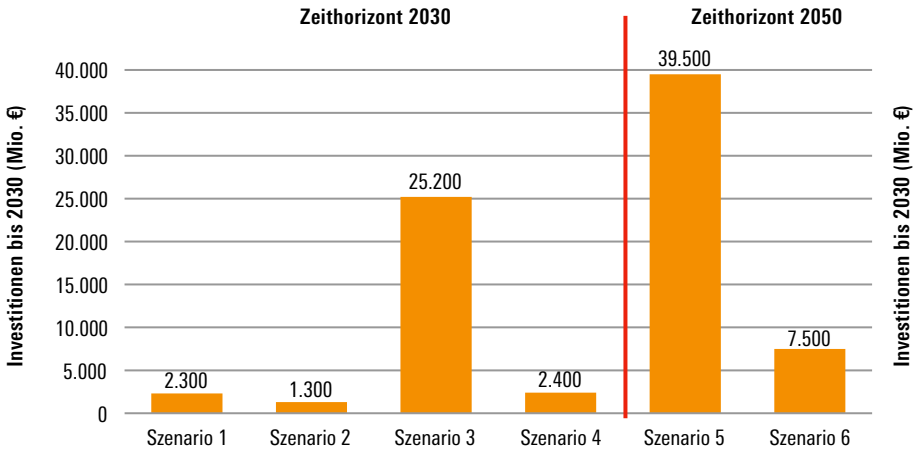
Abbildung 1

Beschäftigung im Zieljahr 2030/2050



Quelle: eigene Darstellung Fraunhofer Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM)

Kumulierte Investitionen der Szenarien 1 bis 4 (Zieljahr 2030) und der Szenarien 5 und 6 (Zieljahr 2050)



Quelle: eigene Darstellung Fraunhofer IFAM

und liegen für 2030 zwischen 1,3 Milliarden Euro (Szenario 2) und 2,4 Milliarden Euro bzw. bei 7,5 Milliarden Euro für 2050 (Szenario 6).

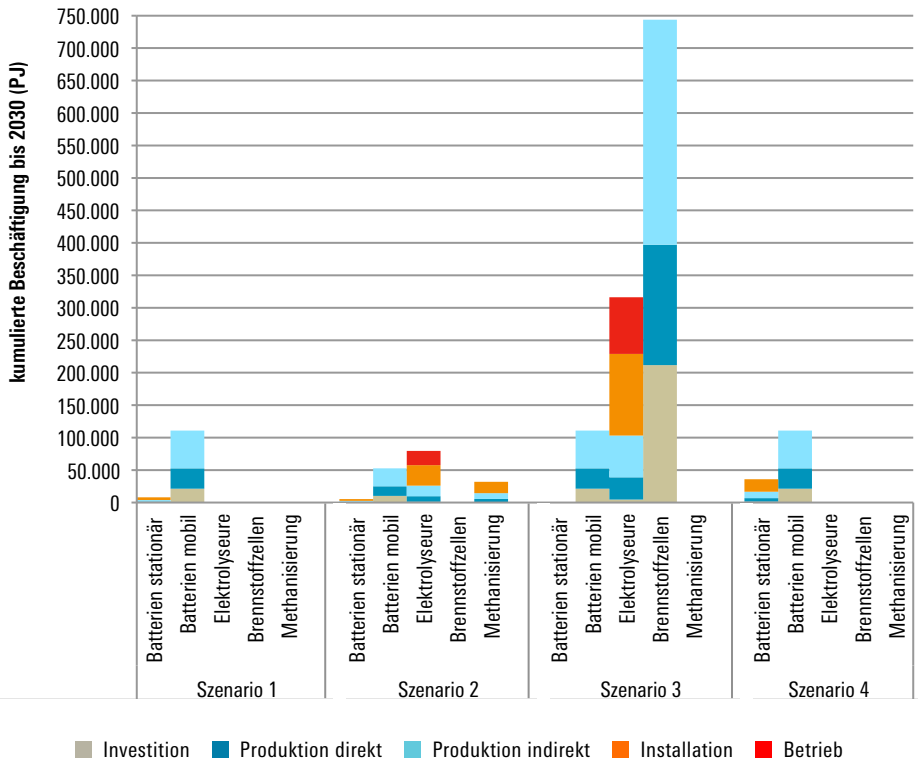
Der wichtigste Treiber für den Einsatz von Speichern ist in der Perspektive bis 2030 die Energiewende im Verkehr. Stationäre Speicher haben dagegen eine geringere Bedeutung, da die hier zukünftig erwarteten Leistungen erheblich kleiner sind als die Batterieleistungen der Elektromobile bzw. die Leistung von Brennstoffzellenfahrzeugen.

Der zeitliche Verlauf der Investitionen in den Szenarien bis 2050 verdeutlicht, dass in den Jahren bis 2030 hohe Investitionen in die Produktionsstätten für Brennstoffzellen getätigt werden müssen, um die für 2030 angestrebte Menge an Brennstoffzellen herzustellen (siehe Kapitel 4.4). Diese Kapazitäten reichen auch für die Produktion der in 2050 gewünschten Gesamtleistung an Brennstoffzellen aus. Der rasche Aufbau der Produktionskapazitäten bereits bis 2030 erscheint aus Sicht der Industrie allerdings nicht nachhaltig. Eine stetige Entwicklung der Investitionen ist vorteilhafter.

Die Beschäftigungseffekte werden in den Szenarien überwiegend durch die Herstellung der Produkte ausgelöst (siehe Abbildung 3).

Abbildung 3

Beschäftigungseffekte der Szenarien mit Zieljahr 2030 nach Technologien und Art der Beschäftigung



Quelle: eigene Darstellung Fraunhofer IFAM

Die Investitionen in die Produktionsanlagen tragen nur in geringem Maß zu den Beschäftigungseffekten bei. Installation und Betrieb der Anlagen führen nur bei Elektrolyseuren und Methanisierern in nennenswertem Umfang zu Beschäftigung. Die zentrale Rolle für die Beschäftigungseffekte in Deutschland spielt die Herstellung der Speichertechnologien im Inland. Nur wenn ein erheblicher Teil der in Deutschland eingesetzten Speichertechnologien auch im Land gefertigt werden, sind hier signifikante Beschäftigungseffekte zu erwarten (siehe Kapitel 4.5).

Das gilt für alle Technologien, insbesondere aber für Batterien. Die Wertschöpfung der Batterieproduktion entfällt derzeit zu rund zwei Dritteln auf die Zellen. Die Zellfertigung findet bislang fast vollständig im Ausland statt, insbesondere in China, Japan und Südkorea (siehe Kapitel 2.2). Aktuell ergreift die deutsche Industrie Initiativen, um eine konkurrenzfähige Zell- und Batteriefertigung in Deutschland und Europa aufzubauen. Nur wenn dies gelingt, kann die Batteriefertigung in nennenswertem Umfang zu Beschäftigung in Deutschland führen.

Die höchsten Investitionssummen und Beschäftigungseffekte weisen die Szenarien mit Elektrolyseuren und einer großen Zahl (mobiler) Brennstoffzellen auf (Szenario 3 und Szenario 5). Beide Szenarien sind mit hohen Industrieinvestitionen und Ausgaben für die Herstellung der Produkte verbunden. Brennstoffzellen sind derzeit noch weiter vom Markt entfernt als Batteriefahrzeuge und werden erst mittel- und langfristig kostengünstiger (siehe Kapitel 3.3). Bislang gibt es erst wenige marktgängige Brennstoffzellen-PKW asiatischer Hersteller und nur Prototypen bzw. Konzepte für Schwerlastfahrzeuge und Züge. Mittel- und langfristig sind Brennstoffzellen aber aufgrund der höheren Speicherdichte von Wasserstoff und der größeren Reichweiten der Fahrzeuge eine interessante Option für den Fern-, Schwerlast- und Schienenverkehr.

Im Gegensatz zur Batterie- und Brennstoffzellentechnologie hat Deutschland bei der Elektrolyse die internationale Technologieführerschaft, vor allem im Bereich der alkalischen Elektrolyse. Dies spiegelt sich u. a. im hohen Anteil deutscher Publikationen bzw. der deutschen Patente im internationalen Vergleich wider. Die Herstellung von Wasserstoff mittels Elektrolyse spielt aber noch eine untergeordnete Rolle (siehe Kapitel 3.2). Sie wird mit steigendem Anteil erneuerbarer Energien an der Stromversorgung und durch die Dekarbonisierung des Verkehrs mittelfristig an Bedeutung gewinnen.

Die Entwicklung der innovativen Speichertechnologien hängt entscheidend von den energiepolitischen Weichenstellungen ab. Bislang hat die Diskussion um Speicher und ihren Einsatz in verschiedenen Anwendungen noch nicht den Stellenwert, der ihr im Kontext der Energie- und Verkehrswende eigentlich gebührt. Eine klare Speicherstrategie ist in Deutschland gegenwärtig noch nicht erkennbar. Die ausgewählten Szenarien spiegeln die Bandbreite möglicher Entwicklungen wider. Für die Politik besteht die Herausforderung, die Chancen der deutschen Industrie für Beschäftigung vor Ort vor dem Hintergrund einer teilweise starken internationalen Konkurrenz (Batterien) und vergleichsweise hohen Aufwendungen im Zuge der Markteinführung (Wasserstofftechnologien) bei strategischen Entscheidungen zu Flexibilität und Speicherung mit zu berücksichtigen.

1 EINLEITUNG

Die Energie- und Umweltpolitik war in der Vergangenheit ein wichtiger Impulsgeber für Innovationen. Dies gilt auch für den Ausbau der erneuerbaren Energieerzeugung, die zum Bruttostromverbrauch inzwischen mehr als 30 Prozent beiträgt (BMWi 2017a). Die Integration dieser weitgehend dargebotsabhängigen Energiequellen zieht nun weitere Neuentwicklungen nach sich. Für eine Energieversorgung, die überwiegend auf erneuerbaren Energien beruht, wird vor allem im Stromsektor ein Bedarf für zusätzliche Flexibilitäten vorausgesehen. Hierzu gehört neben der Verschiebung von Lasten, Im- und Exporten, der Nutzung von erneuerbarem Strom in anderen, bislang weniger nachhaltigen Sektoren wie Wärme und Verkehr auch der Einsatz von Speichern.

Während bereits Untersuchungen zu Marktpotenzialen und Industriechancen für verschiedene Batteriespeichertechnologien vorliegen, fehlt in den existierenden Studien zu Speichern bislang eine systematische Abschätzung der Investitionen und Beschäftigungseffekte. Diese sind eine wichtige Grundlage für die Einschätzung, welche Chancen verschiedene Speicherstrategien für die inländische Industrie eröffnen können. Ziel der Studie ist ein Vergleich der Effekte unterschiedlicher Strategien. Hierfür wird anhand von Zukunftsszenarien die Wertschöpfung verschiedener Optionen wie Batteriespeicher, Power-to-Gas, Methanisierung und Brennstoffzellen analysiert und eingeschätzt, wie gut die deutsche Industrie derzeit aufgestellt ist, um daran vor allem in Form von Investitionen und Beschäftigung zu partizipieren.

1.1. Hintergrund

Aktuell werden verschiedene, teils konkurrierende Speicherstrategien diskutiert und parallel vorangetrieben, etwa ein starker Zuwachs von Elektromobilität, die Förderung von Power-to-Gas, die Verbreitung der Brennstoffzelle oder eine Zunahme der Verbrauchsoptimierung durch Hausspeicher. Eine Konkurrenz zwischen Batterien und Power-to-Gas-Anwendungen wird z.B. bei der Bereitstellung von Regelenergie gesehen (Buttler et al. 2015). Bei der Optimierung im Verteilnetz werden sowohl die Flexibilisierung der dezentralen Einspeisung durch Hausbatterien (siehe z.B. AGORA 2014) als auch ein netzseitiger Ausgleich durch größere Netzbatterien (siehe z.B. Sterner

et al. 2015a) oder durch Elektrolyseure (siehe z.B. Thüga 2014) diskutiert. Auch in der Mobilität konkurrieren batteriebasierte Konzepte – Elektromobilität – mit Power-to-Gas-Lösungen, wie Gas- oder Brennstoffzellenfahrzeugen (Eurotransport 2017).

Die Politik erwartet durch diese Entwicklungen positive Auswirkungen nicht nur auf die Energieversorgung, sondern auch für die deutsche Industrie und ihre Beschäftigten. Bislang ist jedoch unklar, in welchem Maß sich verschiedene Speicherstrategien auf die Investitionen und die Beschäftigung auswirken. Die Klärung dieser Frage ist von besonderem Interesse für die betroffenen Industriebranchen – insbesondere im Maschinen- und Anlagenbau – und die dort Beschäftigten, da gegenwärtig die Weichenstellung für die Energiespeicherung in den kommenden Jahrzehnten stattfindet.

Die Studie liefert den Beschäftigten und ihren Interessenvertretungen eine Basis, um die zukünftigen Innovationsprozesse besser zu verstehen, sie beurteilen zu können und somit an einer arbeitnehmerfreundlichen Gestaltung dieser Prozesse mitzuwirken.

Die Ergebnisse der Studie ermöglichen es nicht zuletzt den politischen Entscheidungsträgern, die wichtige Perspektive der Industrie- und Arbeitsmarktentwicklung bei der Gestaltung der deutschen Energiespeicherstrategie zu berücksichtigen. Sie versetzt darüber hinaus die Interessenvertreter in die Lage, die möglichen Auswirkungen der verschiedenen Strategien einzuschätzen und ihren politischen Einfluss bei der strategischen Ausrichtung der Energiespeicherentwicklung gezielter für die Entwicklung des Industriesandortes Deutschland zu nutzen.

1.2. Struktur der Untersuchung

Der Fokus der Studie liegt auf Batteriespeichern¹ und Wasserstofftechnologien. Letztere beinhalten Elektrolyse als Wasserstoffquelle und Methanisierung als Methanquelle sowie Brennstoffzellen als Technologie zur Nutzung der „grünen Gase“. Es wird untersucht, inwiefern die deutsche Industrie von Entwicklung und Einsatz dieser Technologien profitieren kann. Maßstäbe für die Bewertung sind die zu erwartenden Industrieinvestitionen und die Beschäftigungseffekte. Beide Größen hängen im Wesentlichen von zwei Faktoren ab: dem spezifischen Beschäftigungs- und Investitionseffekt der Techno-

1 Die korrekte fachliche Bezeichnung lautet Akkumulatoren. Im Folgenden wird jedoch die an die englische Bezeichnung angelehnte Formulierung Batterie bzw. Batteriespeicher genutzt.

logien und dem Umfang, in dem diese in Zukunft zum Einsatz kommen. Inhalt des Projekts sind daher die Ermittlung und der Vergleich der spezifischen Effekte sowie die Abschätzung der zu erwartenden Investitionen und Beschäftigungseffekte für unterschiedliche zukünftige Speicherstrategien.

Die Untersuchung zeigt anhand von Szenarien auf, in welchem Umfang die verschiedenen Speichertechnologien zu neuer Beschäftigung führen können. Nicht berücksichtigt wurden mögliche negative Effekte der Nutzung der Speichertechnologien wie z.B. der Wegfall von Arbeitsplätzen beim Übergang von Verbrennerfahrzeugen zu Elektromobilen.

Diese Effekte wurden u. a. in den Studien „Elektromobilität und Beschäftigung“ (Spath et al. 2012) und „Entwicklung der Beschäftigung im After Sales – Effekte aus der Elektromobilität“ (e-mobil BW 2014) untersucht.

Der vorliegende Bericht umfasst fünf Ergebnisebenen: Zunächst werden die *spezifischen Effekte der einzelnen Technologien* betrachtet (Kapitel 2). Anschließend wird der Einsatz der Speichertechnologien aufgrund unterschiedlicher Speicherstrategien im Rahmen von *Analyseszenarien* abgesteckt (Kapitel 4.1). Die damit verbundene industrielle Wertschöpfung wird im nächsten Schritt abgeschätzt und die daraus resultierenden Investitionen und Beschäftigungseffekte in Deutschland werden mithilfe einer Input-Output-Analyse beziffert (Kapitel 4.2, Kapitel 4.3 und Kapitel 4.4). Die Effekte ausgewählter Aspekte werden in *Szenariovarianten* untersucht (Kapitel 4.5). Der Einfluss relevanter Eingangsparameter wird durch eine *Sensitivitätsanalyse* aufgezeigt (Kapitel 4.6). In Kapitel 4.7 wird auf ausgewählte *sonstige Aspekte* eingegangen. Kapitel 5 enthält ein Fazit und einen Ausblick auf die mögliche Entwicklung der Speichertechnologie in Deutschland.

2 SPEZIFISCHE EFFEKTE UNTERSCHIEDLICHER SPEICHERTECHNOLOGIEN

Als Zwischenschritt vor der Interpretation der Zukunftsszenarien soll ein direkter Vergleich der Technologien zeigen, welche spezifischen Investitions- und Beschäftigungseffekte zu erwarten sind, wenn die Speichertechnologien in vergleichbarem Maße zum Einsatz kommen. In der Untersuchung werden fünf Technologieoptionen betrachtet:

- stationäre Batterien,
- mobile Batterien,
- Elektrolyseure,
- Elektrolyseure mit Methanisierer,
- Elektrolyseure mit Brennstoffzellen.

Da Methanisierer und Brennstoffzellen Wasserstoff verarbeiten, werden sie nicht einzeln betrachtet, sondern jeweils in Kombination mit Elektrolyseuren. Bei den Brennstoffzellen (BZ) wird zusätzlich angenommen, dass diese in Brennstoffzellen-Fahrzeugen verbaut sind. Dies ist gerechtfertigt, da bis zum Zeithorizont 2030 Verstromung von Wasserstoff durch Brennstoffzellen für das Stromnetz vernachlässigbar ist (Kirchner et al. 2016). Vereinfachend wird angenommen, dass es sich dabei um Brennstoffzellen-PKW handelt, da es hier erste Serienfahrzeuge am Markt gibt. Zukünftig können Brennstoffzellenantriebe im Schwerlastverkehr – LKW und Bus – sowie im Schienenverkehr an Bedeutung gewinnen (Gnann et al. 2017, HA 2015, Hydrogeit 2017).²

Die Technologieoptionen haben verschiedene mögliche Einsatzbereiche – vom Betrieb von Elektro-PKWs über die Stabilisierung des Stromnetzes oder die Erhöhung des Eigenverbrauchs durch den Einsatz von Batterien bis hin zur Nutzung von Wasserstoff oder Methan im Schwerlastverkehr oder in der chemischen Industrie. Für die verschiedenen Technologieoptionen gibt es daher keine offenkundige Vergleichsgröße wie z.B. die erzeugte Strommenge für verschiedene Stromerzeugungsoptionen.

2 Hinsichtlich des Brennstoffverbrauchs entspricht ein Bus bei einer durchschnittlichen Jahresfahrleistung von 45.000 km etwa 50 PKW, ein LKW im Durchschnitt ca. 20 PKW. Details hierzu sind im [Anhang 3](#) unter Brennstoffzellen zu finden.

Ein Ansatz für einen sinnvollen Vergleich ist die Wirkung auf das Stromnetz, da alle Technologieoptionen die Netzlast beeinflussen können. Dieser Effekt wird mit zunehmenden Stromanteilen aus fluktuierenden Energiequellen wie Windkraft und Photovoltaik in Zukunft an Bedeutung gewinnen. Der nachfolgende Technologievergleich geht daher von folgender Frage aus:

Welche Investitions- und Beschäftigungseffekte entstehen, wenn die jeweilige Technologieoption bis 2030 zu einer netzwirksamen Leistung von 10 GW_{el} ausgebaut wird?

Für stationäre Batterien entspricht dies der Installation von Batterien im Umfang von 10 GW mit einer Speicherkapazität von 12,5 GWh. Bei den mobilen Batterien entspräche eine netzwirksame Leistung von 10 GW insgesamt 4,5 Millionen Elektrofahrzeugen, wenn man davon ausgeht, dass im Durchschnitt 10 Prozent der Fahrzeuge mit einer Leistung von 22 kW laden. Für die Elektrolyse wird analog eine Output-Leistung von 7 GW Wasserstoff angenommen. Bei einem Wirkungsgrad von 70 Prozent würden die dafür erforderlichen Anlagen 10 GW_{el} aus dem Netz entnehmen. Für ein Szenario mit Methanisierung werden, bei einem Wirkungsgrad von 80 Prozent, also insgesamt 56 Prozent, weitere 5,6 GW Output-Leistung Methan veranschlagt. Wird der Wasserstoff hingegen in Brennstoffzellenfahrzeugen verwendet, so wären dazu bei einer durchschnittlichen jährlichen Fahrleistung von 14.500 km und einem Kraftstoffbedarf von 1 kg H₂/100 km rund 5,8 Millionen Brennstoffzellenfahrzeuge erforderlich.

Für den Technologievergleich werden neben diesen Ansätzen noch weitere Annahmen getroffen:

- Der Bau der Fabriken startet in 2018, erste Produkte werden in 2019 hergestellt.
Dies gilt für alle Technologiekombinationen außer für die Kombination „Elektrolyse mit Brennstoffzelle“. Hier wird von einer zeitlichen Verzögerung von zwei Jahren ausgegangen, da die Brennstoffzellen in der Entwicklung noch nicht den Stand der anderen Technologien erreicht haben.
- Der Aufbau der Produktionskapazitäten und der Hochlauf der Herstellung der Produkte erfolgen gleichmäßig bis zum Zieljahr 2030. In 2030 sind dann alle erforderlichen Komponenten in Betrieb, um eine netzdienliche Leistung von 10 GW bereitzustellen.
- Es muss kein Ersatz von Anlagen im Betrachtungszeitraum bis 2030 vorgenommen werden.

Tabelle 1

Kosten der einzelnen Technologien

Technologie	Industrieinvestition je jährliche Produktionskapazität*	Herstellungskosten der Produkte			Installation	Wartung
	Mio. €/GWh (Batterie)/ Mio. €/GW (andere)	€/kWh (Batterie)/ €/kW (andere)			% der Investition	
		2018	2030	2050		
Stationäre Batterien*	125	625	250	125	20%	–
Mobile Batterien	125	255	102	51	–	–
Elektrolyse	167	900	600	500	20%	3%
Brennstoffzellen, mobil*	167	300	75	42	–	–
Methanisierung	167	950	740	500	20%	3%

Anmerkung: *Bei stationären und mobilen Batterien wird angenommen, dass Batteriezellen und Batteriemodule in einer Fabrik gefertigt werden. Details siehe [Anhang 3](#) unter Batterien.

Quelle: eigene Darstellung Fraunhofer IFAM

Grundlage für die Abschätzung der Investitions- und Beschäftigungseffekte sind die Ausgaben, die mit dem Ausbau der einzelnen Technologien verbunden sind. Die Ausgaben umfassen die Industrieinvestitionen (= Investitionen zur Errichtung der Produktionskapazitäten), die Herstellungskosten für die Produkte, die Installationskosten sowie die Wartungskosten.³ Die hierbei angesetzten Daten sind in [Tabelle 1](#) zusammengefasst. Es wird zudem davon ausgegangen, dass die Industrieinvestitionen durch die Steigerung der Arbeitsproduktivität pro Jahr um 2 Prozent sinken. Darüber hinaus gehen noch weitere Annahmen zu ökonomischen Daten ein, die im [Anhang 3](#) erläutert werden.

³ Detaillierte Angaben zu den Kostenkomponenten finden sich im [Anhang 3](#).

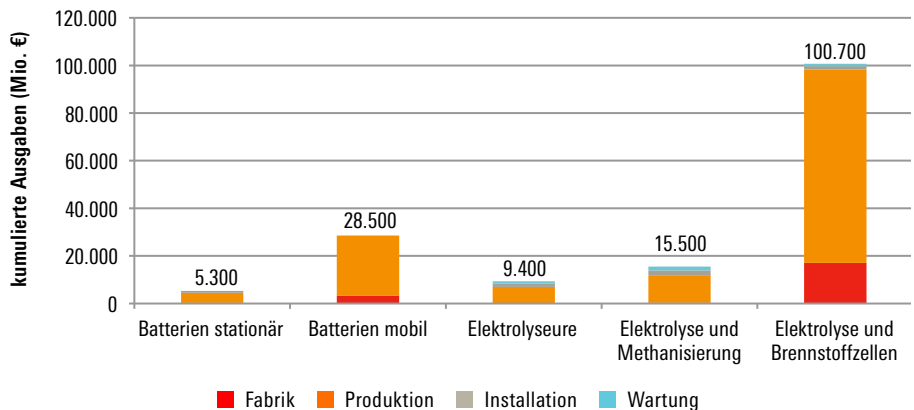
2.1. Investition durch unterschiedliche Technologien

Ausgehend von den in [Tabelle 1](#) genannten Kostenkomponenten werden die erforderlichen Industrieinvestitionen und die Ausgaben ermittelt, die für die Realisierung der Technologieoptionen bis zum Zieljahr 2030 erforderlich sind. Für die Abschätzung der Beschäftigungseffekte wird auf die Methode der erweiterten Input-Output-Analyse zurückgegriffen, die im [Anhang 2](#) eingehend erläutert wird. Bei der Abschätzung der Effekte der unterschiedlichen Technologieoptionen wird zunächst angenommen, dass alle eingesetzten Technologien auch in Deutschland gefertigt werden. In zwei Szenariovarianten wird untersucht, welchen Einfluss Importe bzw. Exporte auf die Ausgaben und die Beschäftigungseffekte haben können ([siehe Kapitel 2.2](#)).

Auf Basis der oben erläuterten Annahmen ergeben sich für die verschiedenen Optionen sehr unterschiedliche Ausgaben und daraus resultierende Beschäftigungseffekte. Die [Abbildung 4](#) zeigt die bis 2030 erforderlichen Ausgaben der fünf Technologieoptionen.

Abbildung 4

Kumulierte Ausgaben für eine netzwirksame Leistung von 10 GW_{el} bis 2030 nach Technologieoptionen



Anmerkung: Die Ausgaben umfassen die Industrieinvestitionen (= Investitionen zur Errichtung der Produktionskapazitäten), die Herstellungskosten für die Produkte, die Installationskosten sowie die Wartungskosten.

Quelle: eigene Darstellung Fraunhofer IFAM

Für die Bereitstellung der netzwirksamen Leistung ist der Einsatz von stationären Batterien mit den geringsten Investitionskosten verbunden. Etwas höher sind die Ausgaben, wenn Elektrolyseure zur Lastverschiebung genutzt werden. Diese Technologie hätte zusätzlich den Vorteil, dass der produzierte Wasserstoff vielfältig eingesetzt werden könnte, z. B. in Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen, in Brennstoffzellen oder als Ausgangsstoff bei der Methanisierung.

Die beiden letztgenannten Nutzungsfälle sind durch die Technologieoptionen „Elektrolyseure mit Methanisierung“ und „Elektrolyseure mit mobilen Brennstoffzellen“ repräsentiert. Elektrolyseure und Methanisierer haben zwar vergleichsweise hohe spezifische Kosten. Die Leistung, die für die Bereitstellung der netzdienlichen Leistung von 10 GW installiert werden muss, ist jedoch erheblich geringer als im Fall der Technologieoption „Elektrolyseure mit mobilen Brennstoffzellen“. Diese Technologieoption weist die höchsten Ausgaben auf. Ausschlaggebend hierfür ist die große Zahl von mobilen Brennstoffzellen mit einer Gesamtleistung von 580 GW, die erforderlich ist, um den durch Elektrolyse erzeugten Wasserstoff zu nutzen. Um eine netzdienliche Leistung von 10 GW mittels mobiler Batterien zu erreichen, müssen im Vergleich zu stationären Batterien deutlich höhere Ausgaben getätigt werden. Dies ist durch die Annahme bedingt, dass nur 10 Prozent der mobilen Batterien gleichzeitig am Netz sind.

Bei der Interpretation der Kosten sollte berücksichtigt werden, dass die betrachteten Technologieoptionen neben der Wirkung auf das Stromnetz teils auch anderen Zwecken dienen. So werden mobile Batterien und Brennstoffzellen (in Kombination Wasserstoff aus Elektrolyse mit EE-Strom) primär für eine umweltfreundliche Mobilität eingesetzt. Die hierfür erforderlichen Investitionen in die Infrastruktur sind nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchungen. Es gibt jedoch Hinweise, dass die Kosten für den Ausbau des Stromnetzes und die Ladeinfrastruktur für Elektromobile etwas höher sein könnten als die Investitionen in ein Wasserstoffnetz (FZ Jülich 2017).

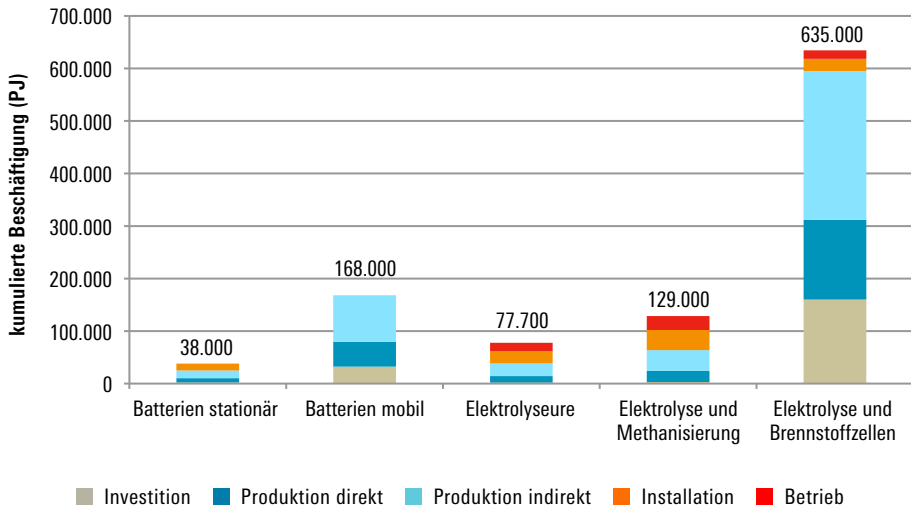
Die Beschäftigung, die durch die in [Abbildung 4](#) genannten Ausgaben ausgelöst wird, ist in [Abbildung 5](#) dargestellt. Diese zeigt, dass höhere Ausgaben automatisch zu höheren Beschäftigungseffekten führen.

Aus der Perspektive der Unternehmen ist es interessant, welchen Beschäftigungseffekt Investitionen in Produktionsanlagen auslösen.

Für die Überlegung, durch welche Ausgaben die höchsten Beschäftigungseffekte ausgelöst werden, ist der spezifische Beschäftigungseffekt (Quotient aus Beschäftigung und Ausgaben in Personenjahren (PJ) je 1 Million

Abbildung 5

Kumulierte Beschäftigung für eine netzwirksame Leistung von 10 GW_{el} bis 2030 nach Technologieoptionen



Quelle: eigene Darstellung Fraunhofer IFAM

Euro Ausgaben) aussagekräftiger als der absolute Beschäftigungseffekt. Er ist für mobile Batterien mit 5,9 Personenjahren je 1 Million Euro Ausgaben am niedrigsten und für Elektrolyse (mit oder ohne Methanisierung) mit 8,3 PJ/Mio. Euro am höchsten. Stationäre Batterien liegen mit 7,2 PJ/Mio. Euro und die Elektrolyse mit Brennstoffzellen mit 6,3 PJ/Mio. Euro dazwischen.

Der Vergleich der spezifischen Beschäftigung je 1 Million Euro Ausgaben zeigt, dass

- die spezifischen Beschäftigungseffekte von Elektrolyseuren bzw. der Kombination „Elektrolyseure mit Methanisierung“ höher sind als die der Batterieszenarien. Dies ist im Wesentlichen dadurch bedingt, dass bei diesen Technologieoptionen auch Installations- und Wartungskosten anfallen, bei stationären Batterien aber nur Installationskosten und bei mobilen Batterien nur die Herstellungskosten (siehe Tabelle 1).
- mobile Technologieoptionen („mobile Batterien“ und „Elektrolyseure mit Brennstoffzellen“) die geringsten spezifischen Beschäftigungseffekte

auslösen. Grund hierfür ist, dass bei diesen Technologieoptionen keine zusätzlichen Installations- und Wartungskosten zu berücksichtigen sind (siehe [Tabelle 1](#)).

Aus der Perspektive der Unternehmen ist darüber hinaus eine andere Fragestellung interessant:

Wie hoch müssten die Investitionen in die entsprechenden Fabriken sein, um 10 GW_{el} netzirksame Leistung bereitzustellen? Und welche spezifischen Beschäftigungseffekte würden durch diese Investitionen letztendlich ausgelöst?

Hierfür müssen zunächst die Industrieinvestitionen (= Investitionen zur Errichtung der Produktionskapazitäten, siehe [Abbildung 6](#)) ermittelt werden. Diese sind für die Technologieoption „Elektrolyse mit Brennstoffzellen“ besonders hoch, da diese Option erhebliche Produktionskapazitäten für die große Zahl von Brennstoffzellen beinhaltet.

Mit den Daten zu den Beschäftigungseffekten aus [Abbildung 5](#) ergibt sich der in [Abbildung 6](#) dargestellte spezifische Beschäftigungseffekt.

Die höchsten Beschäftigungseffekte je Investition weisen mit 410 bis 450 PJ/Mio. Euro die Technologieoptionen auf, bei denen die Produkte hohe spezifische Kosten haben und Installation und Wartung zu berücksichtigen sind – Elektrolyseure und Methanisierung.

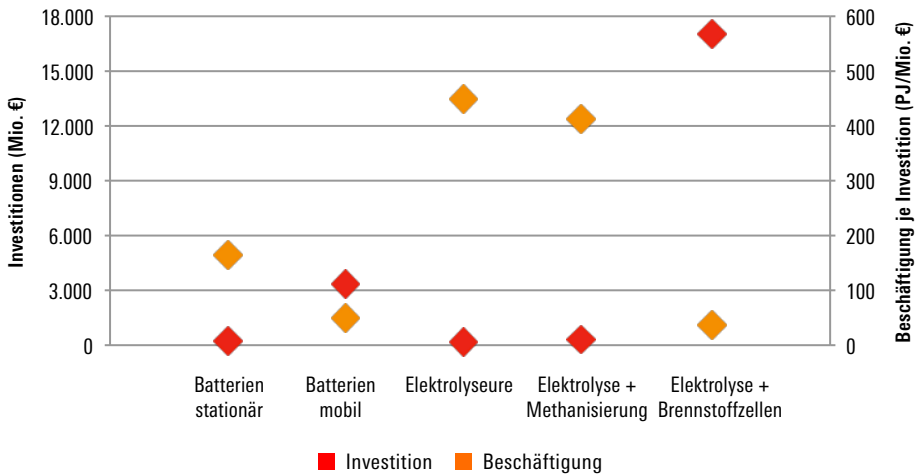
Mittlere Beschäftigungseffekte je Investition ergeben sich für die stationären Batterien. Sie sind teurer als mobile Batterien und es fallen Installationskosten an.

Die mobilen Anwendungen von Speichern weisen die niedrigsten spezifischen Effekte unter den Technologieoptionen auf. Dies ist durch die bereits (vergleichsweise) niedrigeren Produktkosten und die Tatsache, dass keine Installations- und Wartungskosten anfallen, bedingt.

So könnte der Schluss gezogen werden, dass vorzugsweise in die Fertigung von Elektrolyseuren und Methanisierung investiert werden sollte, um hohe Beschäftigungseffekte zu erreichen. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass diese Technologien heute noch nicht in signifikantem Ausmaß marktgängig sind. Dies ist bei den mobilen Anwendungen, insbesondere bei mobilen Batterien eher gegeben und mittelfristig in zunehmendem Ausmaß zu erwarten. Elektrolyse und Methanisierung können jedoch mittel- und langfristig bei der Erreichung der Klimaziele durch den Einsatz „grünen“ Wasser-

Abbildung 6

Investitionen und spezifische Beschäftigungseffekte je 1 Mio. Euro Industrieinvestition für die Errichtung von Produktionskapazitäten für eine netzwirksame Leistung von 10 GW_{el} bis 2030 nach Technologieoptionen



Quelle: eigene Darstellung Fraunhofer IFAM

stoffe in der Mobilität und in der Industrie an Bedeutung gewinnen. Der Korridor, in dem der Ausbau der Nutzung der verschiedenen Speichertechnologien erfolgen könnte, wird im [Kapitel 4](#) anhand von Analyseszenarien aufgezeigt.

Derzeit ist der Anteil deutscher Unternehmen an der Produktion der untersuchten Technologien noch gering. Daher stellt sich die Frage, in welchem Maß die zuvor genannten Beschäftigungseffekte vom Anteil des Imports bzw. des Exports der Produkte abhängen. Dies wird im Folgenden dargestellt.

2.2. Import- und Export-Effekte

Bei der Berechnung der Investitions- und Beschäftigungseffekte im [Kapitel 2.1](#) wurde angenommen, dass alle eingesetzten Technologien auch in Deutschland gefertigt werden. Dies wird in der Realität jedoch nicht der Fall

Tabelle 2

Abhängigkeit der kumulierten Beschäftigungseffekte vom Import (50 %) bzw. Export (150 %) – Zieljahr 2030

Technologieoptionen	Batterien stationär	Batterien mobil	Elektrolyseure	Elektrolyseure mit Methanisierung	Elektrolyseure mit Brennstoffzellen
Kumulierte Beschäftigung bis 2030 in Personenjahren					
100 % Fertigung in D	45.400	176.900	77.700	128.700	634.600
150 % Fertigung in D (50 % Export)	60.300	265.400	96.800	160.500	932.200
50 % Fertigung in D (50 % Import)	30.600	88.500	58.600	96.500	337.000

Quelle: eigene Darstellung Fraunhofer IFAM

sein. Daher wird im Folgenden der Einfluss des Imports bzw. des Exports in zwei Varianten untersucht. In der einen Variante werden 50 Prozent der Produkte importiert. In der zweiten Variante wird davon ausgegangen, dass in Deutschland so viel (150 Prozent) produziert wird, dass zusätzlich 50 Prozent der im Ausgangsszenario angenommenen Produktmenge exportiert werden kann. Die Effekte auf die kumulierte Beschäftigung bis 2030 sind in [Tabelle 2](#) dargestellt.

[Tabelle 2](#) verdeutlicht, dass die möglichen Beschäftigungseffekte stark vom Anteil der deutschen Wirtschaft an der Produktion der Speichertechnologien abhängen. Bei den mobilen Batterien skalieren die Beschäftigungseffekte direkt mit der Produktion in Deutschland (Elastizität = 1), da hier nur die Industrieinvestitionen und die Herstellungskosten der Batterien eingehen: Bei geringerer Produktion werden auch weniger Fabriken errichtet.⁴ Auch beim Szenario „Elektrolyse mit mobilen Brennstoffzellen“ nimmt die Beschäftigung (fast) in gleichem Maß zu oder ab, in dem Produktionsmen-

⁷ Es wird davon ausgegangen, dass die Produktionskapazitäten voll ausgelastet sind und kein Zubau ohne Auslastung erfolgt.

gen in Deutschland erhöht oder reduziert werden. Dies ist dadurch bedingt, dass der Großteil der Investitionen auf die Brennstoffzellen entfällt. Für diese wurden – wie bei mobilen Batterien – nur Industrieinvestitionen und die Herstellungskosten angesetzt (siehe Tabelle 1).

Dagegen ist der Einfluss des Imports bzw. Exports bei den Technologieoptionen „Elektrolyseure“ und „Elektrolyseure mit Methanisierung“ deutlich geringer. Hier verändert sich die kumulierte Beschäftigung nur um ± 25 Prozent, wenn sich die Produktionsmenge um ± 50 Prozent verändert (Elastizität = 0,5). Die Ursache für die geringere Elastizität dieser Technologieoptionen ist, dass bei beiden neben den Industrieinvestitionen und den Herstellungskosten auch noch Kosten für Installation und Wartung zu berücksichtigen sind. Diese sind, kumuliert bis 2030, fast genauso hoch wie die Industrieinvestitionen und die Herstellungskosten und hängen nicht von den Import- oder Exportanteilen ab. Vielmehr werden sie allein durch die Zahl der in Deutschland installierten bzw. genutzten Produkte bestimmt. Diese Zahl wurde bei der Untersuchung der spezifischen Effekte Technologieoptionen nicht verändert.

Die Höhe der Beschäftigungseffekte für die Technologieoption „Stationäre Batterien“ verändert sich mit dem Import bzw. Export nicht so stark wie bei den mobilen Batterien, aber stärker als bei den Technologieoptionen „Elektrolyseure“ und „Elektrolyseure mit Methanisierung“. Ursache hierfür ist, dass zwar Installationskosten berücksichtigt werden, die Anlagen jedoch keine Wartung benötigen (siehe Anhang 3 zu Batteriespeichern).

Als Ergebnis der Szenariovarianten kann man feststellen,

- dass die Beschäftigungseffekte bei mobilen Batterien direkt mit dem Anteil der Importe bzw. Exporte der Produkte korrelieren (Elastizität = 1),
- dass bei den Technologieoptionen „Elektrolyseure“ und „Elektrolyseure mit Methanisierung“ die Veränderung der Beschäftigungseffekte nur halb so groß ist wie die Änderung bei Importen bzw. Exporten (Elastizität = 0,5) und
- dass der Einfluss des Imports bzw. Exports auf die Beschäftigungseffekte für das Szenario „Stationäre Batterien“ zwischen dem für mobile Batterien und dem für die beiden anderen Technologieoptionen liegt (Elastizität = 0,7)

Die oben dargestellten Beschäftigungseffekte können allerdings nur dann realisiert werden, wenn ein signifikanter Anteil der in Deutschland eingesetzten Speicher auch im Land hergestellt wird. Im nachfolgenden Exkurs werden am Beispiel der Lithium-Ionen-Batterien der derzeitige Status der Fertigung dargestellt und die daraus resultierenden Herausforderungen aufgezeigt.

Fertigung Lithium-Ionen-Batterien – Exkurs

Für die Einschätzung, welche Beschäftigungseffekte durch die Fertigung von Batterien bzw. deren Komponenten in der deutschen Industrie entstehen können, ist einerseits wichtig, wo derzeit die Fertigung der Batterien bzw. der Batteriekomponenten erfolgt, und andererseits, welche Wertschöpfungsstufen bei der Batteriefertigung besonders hohe Anteile haben.

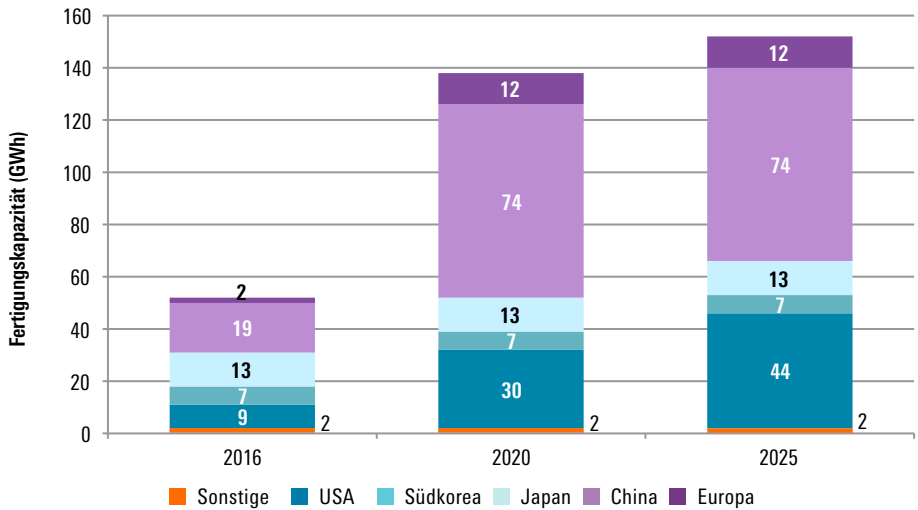
Eine Einschätzung, welchen Anteil die Komponenten einer Batterie an der Wertschöpfung haben, zeigt die Wertschöpfungskette der Batterieproduktion. Die Zellherstellung hat den größeren Anteil an der Herstellung eines Batteriepacks. Dabei entfallen 42 Prozent auf die Komponentenherstellung (Kathode, Anode usw.) und 25 Prozent auf die Zellfertigung. Den kleineren Anteil an der Wertschöpfung hat die Herstellung der Module und Batteriepacks, bestehend aus der Fertigung der mechanischen und elektrischen Komponenten des Batteriepacks (29 Prozent) und der eigentlichen Fertigung der Packs (4 Prozent) (Fraunhofer ISI 2013). Die Zahlen verdeutlichen, dass die Zellherstellung aktuell mit rund zwei Dritteln den größten Anteil an der Wertschöpfung hat (VDMA 2015, S. 10). Auf die Batterieherstellung ohne Zellproduktion entfällt nur etwa ein Drittel der Herstellungskosten des fertigen Batteriepacks. Dies verdeutlicht, dass die Modul- und Batteriepackherstellung allein zu erheblich geringeren Investitions- und Beschäftigungseffekten führen würde als die gesamte Wertschöpfungskette. Daher wird in den folgenden Betrachtungen davon ausgegangen, dass sowohl Zell- als auch Batterieproduktion in Deutschland stattfinden.

Zur Verdeutlichung, welche Herausforderung die Etablierung signifikanter Produktionskapazitäten in Deutschland darstellt, zeigt [Abbildung 7](#) die derzeitige weltweite Konkurrenzsituation bei der Zellherstellung und den geplanten Ausbau. Die Unternehmen, die Batteriezellen herstellen, haben ihren Firmensitz (fast) nur in Asien (China, Japan und Südkorea), dies wird sich nach bisheriger Planung auch nicht grundlegend ändern (siehe [Abbildung 20](#) im Anhang).

Im Kontext der vorliegenden Untersuchung ist allerdings besonders interessant, in welchen Ländern sich die Produktionsstätten der Unternehmen befinden ([siehe Abbildung 7](#)).

Viele Unternehmen haben in Japan und Südkorea ihren Sitz, der Anteil an den Produktionsstätten ist in diesen Ländern jedoch deutlich geringer. Dies gilt bereits für 2016 und verschärft sich nach den bisherigen Planungen deutlich bis 2025. In 2025 haben nach bisherigen Planungen Unternehmen mit Sitz in Japan mit 58,3 GWh einen Anteil von 38 Prozent an der weltwei-

Abbildung 7

Fertigungskapazität für Lithium-Ionen-Zellen nach Produktionsstandort 2016 und Planung bis 2025

Quelle: eigene Darstellung Fraunhofer IFAM nach VDMA 2016, S. 17

ten Produktionskapazität, hiervon befinden sich in Japan aber nur 9 Prozent (13 GWh – siehe [Abbildung 7](#)). Für Südkorea ergibt sich ein vergleichbares Bild: In 2025 haben die dortigen Unternehmen einen Anteil von 20 Prozent (31 GWh) an der Produktionskapazität für Zellen, aber nur 5 Prozent der Produktionskapazitäten sind auch in Südkorea angesiedelt. Die Unternehmen aus diesen beiden Ländern planen Produktionsstätten sowohl in China als auch in den USA und in Europa. Für Europa ergibt sich nach den genannten Zahlen eine Steigerung des Anteils an der Zellproduktionskapazität von 2 Prozent in 2016 auf 12 Prozent in 2025. Allerdings planen die asiatischen Firmen bislang keine Produktion in Deutschland.

Die Zahlen verdeutlichen, dass es massiver Anstrengungen der deutschen Wirtschaft bedarf, wenn Unternehmen in Deutschland von den Beschäftigungseffekten der Batteriefertigung zukünftig profitieren wollen. Signifikante Effekte werden dabei nur erzielt, wenn auch die Zellfertigung in Deutschland stattfindet.

3 MARKTREIFE DER TECHNOLOGIEN

Bei der Interpretation der spezifischen Effekte der einzelnen Technologien spielt vor allem auch die Marktreife eine große Rolle. Sie wird im Folgenden für die einzelnen Technologien kurz skizziert.

3.1. Batterien

Batterien kommen in vielen Bereichen zum Einsatz. Im Kontext der vorliegenden Untersuchung sind besonders die Nutzung als stationärer Stromspeicher im Netz und der Einsatz im Verkehr (Elektromobilität) von Bedeutung.

Batterien zur Stromspeicherung sind in Deutschland bereits in zahlreichen stationären und mobilen Anwendungen zu finden. So ist die Zahl der Photovoltaiksysteme mit Speichern in den vergangenen Jahren stark angestiegen und lag Ende April 2017 bei ca. 61.300 (Figgenger et al. 2017). Die Anschaffung von Photovoltaikspeichern (PV-Speichern) erfolgt zu einem Großteil bereits heute ohne Förderung. Es ist zu erwarten, dass die Zahl der installierten PV-Speicher auch in Zukunft noch zunehmen wird, da die Speicherkosten weiter sinken werden. Zudem wird bei vielen PV-Anlagen nach 20 Jahren Betrieb keine Vergütung nach dem EEG mehr gezahlt. Bei diesen, meist noch voll funktionstüchtigen Anlagen ist die Ergänzung durch einen Speicher zur Erhöhung des Eigenverbrauchs wirtschaftlich interessant.

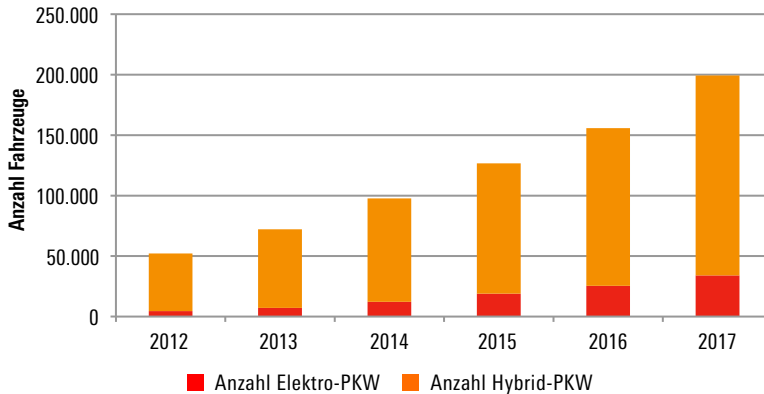
Ein zweiter, starker Impuls für den Einsatz von Batteriespeichern geht vom Verkehr aus. Die Zahl der Elektro- und Hybridfahrzeuge in Deutschland hat sich in den vergangenen sechs Jahren vervierfacht. Durchschnittlich stieg die Zahl der Elektro- und Hybrid-PKW um 30 Prozent pro Jahr (siehe [Abbildung 8](#)).

Aufgrund der derzeitigen Marktsituation und der Vorgaben der Politik ist zu erwarten, dass dieses Wachstum auch weiterhin anhalten wird. Außerdem haben die Diskussion um die Umweltverträglichkeit des Dieselantriebs und die kürzlich verkündete Einführung einer Quote für Elektroautos in China dem Trend hin zu Elektromobilität zusätzlichen Schwung verliehen.

Dies spiegelt sich auch in den jüngsten Äußerungen der Automobilindustrie wider. Daimler kündigte vor einigen Monaten den Bau einer Batteriefabrik an und VW-Markenvorstand Herbert Diess forderte im September 2017 eine gemeinsame europäische Initiative zum Aufbau einer Zellproduktion für Batterien für Elektrofahrzeuge (Daimler 2017, Diess 2017). In dieselbe

Abbildung 8

Bestand an Elektro- und Hybrid-Personenkraftwagen am 1. Januar des jeweiligen Jahres



Quelle: eigene Darstellung IFAM nach KBA 2017, KBA 2016, KBA 2015, KBA 2014, KBA 2013, KBA 2012

Richtung weist die Initiative der EU, die die Batteriefertigung in Europa voranbringen will, um mit den asiatischen Lieferanten konkurrenzfähig zu werden (Reuters 2017).

Die skizzierte Entwicklung weist darauf hin, dass die Zahl der Batteriefahrzeuge auch zukünftig steigen wird. Bei gleichbleibender Wachstumsrate läge die Gesamtzahl der Elektro- und Hybrid-PKW im Jahr 2030 bei sechs Million Fahrzeugen. Dies entspricht bei einer typischen Speicherkapazität der Traktionsbatterie eines Elektro-PKWs von 40 kWh einer Gesamtkapazität von 240.000 MWh.

Die meisten Elektro- und Hybrid-PKW sind mit Traktionsbatterien auf Lithium-Ionen-Basis ausgestattet. Diese kommen zunehmend auch in großen Stromspeichern im Netz zum Einsatz (siehe Tabelle 3).

Für die breite Markteinführung stellt der Ausbau der Infrastruktur noch eine Herausforderung dar. Hier fehlt es insbesondere an einem ausreichend dichten Netz von Schnellladestationen. Es ist jedoch zu erwarten, dass durch die bereits bestehenden Förderprogramme des Bundes und der Länder dieser Ausbau in den kommenden Jahren an Dynamik gewinnen wird. Zusätzliche Impulse wird in den nächsten Jahren die Diskussion um die Umweltverträglichkeit von Verbrennerfahrzeugen geben.

Tabelle 3

Große Batteriespeicher im Stromnetz

Ort	Leistung	Kapazität	Baujahr	Batterietyp
	MW	MWh		
Braderup ¹	2	2	2014	Li-Ionen
Braderup ¹	0,325	1	2014	Redox-Flow
Alt Daber ²	k. A.	2	2014	Blei-Akku
Schwerin ³	10	14,5	2014/2017	Li-Ionen
Lünen ⁴	16,5	13	2015	Li-Ionen (Second life)
Dresden ⁵	2	2,7	2015	Li-Polymer
Feldheim ⁶	10	10	2015	Li-Ionen
Neuhardenberg ⁶	5	5	2015	Li-Ionen
Aachen ⁷	5	5	2016	Hybridspeicher
Hannover ⁸	15	17,5	2017	Li-Ionen
Jardelund ⁹	48	51	Ende 2017	Li-Ionen
Deutschland/Österreich ¹⁰	k. A.	100	2017/2018	Li-Ionen

Quelle: eigene Darstellung IFAM nach ¹ Bosch 2014, ² Erneuerbare Energien 2014, ³ WEMAG 2017, ⁴ Daimler 2016, ⁵ Weckbrodt 2015, ⁶ Energiezukunft 2016, ⁷ RWTH, E.ON, IAEW 2016, ⁸ enercity 2016, ⁹ Flensburger Tageblatt 2017, pv magazine 2017, ¹⁰ LUNA 2017

3.2. Elektrolyse

In den kommenden Jahren wird der Anteil des Stroms aus fluktuierenden Energiequellen wie Windkraft und Photovoltaik deutlich zunehmen. Hierdurch wird auch der Bedarf an Flexibilität steigen. Die Nutzung von Überschussstrom zur Erzeugung von Wasserstoff durch Elektrolyse ist dabei eine von mehreren Optionen. Der durch Elektrolyse erzeugte Wasserstoff kann

dann z. B. bei Bedarf wieder verstromt werden oder in Brennstoffzellenfahrzeugen zum Einsatz kommen.

Heutzutage wird Wasserstoff fast ausschließlich in der Industrie eingesetzt. Er wird in industriellen Prozessen zur Raffination von Rohöl, zur Fethärtung und bei der Herstellung von Düngemitteln, Kunststoffen, Kunstharzen und Lösungsmitteln genutzt. In Westeuropa liegt der jährliche Wasserstoffverbrauch bei rund 60 Millionen Kubikmeter. Der Großteil des Wasserstoffs entfällt auf die Bereiche Raffination (50 Prozent) und die Herstellung von Ammoniak (32 Prozent). Die jährliche Wasserstoffproduktion in der EU beträgt ca. 90 Millionen Kubikmeter, davon entfallen knapp 20 Millionen Kubikmeter auf Deutschland (Maisonnier et al. 2007). Rund zwei Drittel des Wasserstoffs werden in der Industrie für den Eigenbedarf hergestellt. Die Wasserstoffherstellung erfolgt zum Großteil durch chemische Prozesse, insbesondere durch Dampfreformierung (siehe Tabelle 4). Etwa ein Drittel des Wasserstoffs entsteht als Beiprodukt in chemischen Prozessen (Maisonnier et al. 2007).

Tabelle 4

Bedeutung der Methoden zur Herstellung von Wasserstoff

Methode	Menge in Mrd. Normkubikmeter (Nm ³)	
	Deutschland	Weltweit
Dampfreformierung von Erdgas oder Naphta	6	190
Partielle Oxidation von Schweröl	3	120
Petrochemie: Benzinreformierung	2,5	90
Petrochemie: Ethylenproduktion	3,6	33
Sonstige chemische Industrie	0,9	7
Chlor-Alkali-Elektrolyse	0,9	10
Kohlevergasung (Koksgas)	2,1	50
Gesamt	19	500

Quelle: DWV o. J.

Durch Elektrolyse erzeugter Wasserstoff ist bislang am Markt noch nicht verfügbar. In den vergangenen Jahren wurden aber bereits mehr als 20 Pilotanlagen errichtet. Diese haben eine Leistung von wenigen kW bis zu mehreren Megawatt (MW) (siehe [Tabelle 13](#) im Anhang und dena 2017). Im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) der Bundesregierung werden auch weiterhin Maßnahmen zur Wasserstoffproduktion aus erneuerbaren Energien gefördert, um die Nutzung „grünen“ Wasserstoffs im Verkehr voranzutreiben (BMVI 2016).

Der Einsatz von Elektrolyse zur Nutzung von Überschussstrom und die Bereitstellung von Wasserstoff im Verkehr spielen derzeit noch kaum eine Rolle. Ein wesentliches Hindernis für die Nutzung im Verkehr ist die fehlende Infrastruktur für die Betankung mit Wasserstoff (siehe auch [Kapitel 3.3](#)).

Die Machbarkeit der großtechnischen Herstellung von Wasserstoff durch Elektrolyse ist nachgewiesen. Allerdings sind die Kosten hoch und es besteht noch Bedarf bei der Entwicklung und Erprobung größerer Anlagen sowie der Systemintegration (siehe auch Köckhuber 2017). Dies gilt insbesondere für die Polymerelektrolytmembran-Elektrolyse (PEM-Elektrolyse), die noch nicht so ausgereift ist wie die alkalische Elektrolyse. Aber einschlägige Forschungsergebnisse zeigen, dass auch hier durch technische Entwicklungen Kostenreduktionen erreicht werden können (Rieger 2017).

Allerdings konkurriert die Elektrolyse mit anderen, derzeit noch kostengünstigeren Maßnahmen zur Stabilisierung des Stromsystems. Der erwartete Ausbau erneuerbarer Stromerzeugung und die Dekarbonisierung des Verkehrs können jedoch mittel- und langfristig zu einem wachsenden Markt für Elektrolyse führen.

Im Gegensatz zur Batterietechnologie besitzt Deutschland bei der Elektrolyse eine internationale Technologieführerschaft. Dies spiegelt sich u. a. im hohen Anteil der in Deutschland geschriebenen Publikationen bzw. der deutschen Patente im internationalen Vergleich wider (BMW 2017b, S. 38).

3.3. Brennstoffzellen

Brennstoffzellen können prinzipiell in verschiedenen Anwendungsfeldern eingesetzt werden, u. a. in energieautarken Systemen, Fahrzeugantrieben, Notstromversorgung und stationären Anwendungen zur Netzstabilisierung. In Japan waren bis Mitte 2015 bereits mehr als 100.000 stationäre Anlagen zur Gebäudeheizung im Einsatz (Mitzel, Friedrich 2016).

In Deutschland spielen Brennstoffzellen dagegen bei der Gebäudeheizung trotz Förderung bislang nur eine geringe Rolle. Die Markteinschätzungen bezüglich des Einsatzes von Brennstoffzellen zur Gebäudeheizung in Deutschland sind aktuell sehr unterschiedlich. Einige Hersteller setzen auf zeitnahe Markteinführung, andere haben Produkte wieder vom Markt genommen (IWR 2017). Nach Einschätzung des VDMA (2017) wird sich das in 2016 verzeichnete Wachstum fortsetzen und es wird für 2017 mit der Installation von rund 5.000 Brennstoffzellen zur Hausenergie- und kritischen Stromversorgung gerechnet. In 2022 rechnet der VDMA (2017) mit der Installation von Brennstoffzellen mit einer Leistung von insgesamt mehr als 100 MW.

Nach Ansicht von Experten wird in Zukunft der Fahrzeugmarkt den globalen Absatz von Brennstoffzellen dominieren (VDMA 2017). Allerdings sind bislang nur von zwei Herstellern – Toyota und Hyundai – Serienfahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb am Markt. Deutsche Hersteller bieten noch keine Serienfahrzeuge an, haben aber mehrere Modelle in der seriennahen Fertigung (Mitzel, Friedrich 2016).

Für eine erfolgreiche Markteinführung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen (BZ-Fahrzeugen) müssen einerseits BZ-Serienprodukte entwickelt werden. Andererseits ist die Weiterentwicklung der Systemkomponenten erforderlich, um die Zuverlässigkeit der Produkte zu erhöhen und die Preise zu senken. Die EU unterstützt einschlägige Forschungs- und Entwicklungsvorhaben, z.B. die Projekte Auto-Stack CORE (Auto-Stack CORE 2017) und Stack-Test (Stack-Test 2015) im Rahmen der „Gemeinsamen Technologieinitiative für Brennstoffzellen und Wasserstoff“ (FCH 2017).

Wesentliche Hürden für die Markteinführung sind die kostenintensive Entwicklung und die dadurch hohen Kosten von BZ-Fahrzeugen sowie die fehlende Infrastruktur. Für die Nutzung von Wasserstoff im Verkehr gibt es noch keine nutzbare Infrastruktur in der Fläche, sondern nur örtlich begrenzte Angebote. Der Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur ist – neben der Entwicklung und Marktvorbereitung von Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie – ein Ziel des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (BMVI 2016). Eine weitere Möglichkeit der Speicherung des Wasserstoffs ist prinzipiell die Einspeisung in das Erdgasnetz. Allerdings ist die Beimischung ohne technische Anpassungen aktuell noch auf einen Anteil von bis zu 5 Prozent begrenzt, wird jedoch absehbar auf 10 Prozent oder sogar darüber hinaus gesteigert werden (EWI et al. 2015). Der Bau einer Wasserstoffinfrastruktur für die Versorgung des Verkehrs ist, ebenso wie der Ausbau der Ladeinfrastruktur für Batteriefahrzeuge, mit hohen Kosten und hohem technischen Aufwand verbunden (FZ Jülich 2017).

Für Norwegen wurden z.B. die erforderlichen Investitionskosten für den Aufbau einer landesweiten Wasserstoffinfrastruktur mit 1.100 Tankstellen bis 2050 auf 1,5 Milliarden Euro geschätzt (NTU et al. 2009).

Mittel- und langfristig kann die Nutzung von Wasserstoff im Verkehr an Bedeutung gewinnen, insbesondere im Schwerlastverkehr. Auch der Einsatz auf noch nicht elektrifizierten Bahnstrecken ist denkbar. So läuft seit März 2017 ein Zug mit Brennstoffzellen-Antrieb im Testbetrieb, der ab 2018 in Deutschland auf der Strecke Buxtehude–Cuxhaven im Regelbetrieb eingesetzt werden soll (IV 2017).

Unter ökologischen Gesichtspunkten ist der Einsatz von Wasserstoff als Kraftstoff derzeit noch kritisch zu beurteilen, da Wasserstoff bislang meist noch konventionell aus Dampfreformierung hergestellt wird (siehe Tabelle 4). Der Einsatz von Wasserstoff aus Elektrolyse in der Mobilität ist ökologisch erst sinnvoll, wenn die Herstellung des Wasserstoffs durch Elektrolyse mit (Überschuss-)Strom aus erneuerbaren Energien erfolgt. Hiermit wird allerdings in nennenswertem Umfang nicht vor 2030 zu rechnen sein.

3.4. Methanisierung

Methanisierung wird bislang noch nicht zur großtechnischen Gewinnung von Methan genutzt, da Methan kostengünstiger aus Erdgas gewonnen werden kann. Methanisierung wird aber bereits in chemischen Prozessen zur Entfernung des Katalysatorgifts Kohlenmonoxid eingesetzt. Zudem kann mittels Methanisierung synthetisches Erdgas (Synthetic Natural Gas) aus Gasen mit hohem CO-Anteil gewonnen werden.

Verfahren zur Herstellung von synthetischem Methan sind der Sabatier-Prozess und die biologische Methanisierung. Bei beiden Methoden besteht noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Die Herstellung von synthetischen Methan aus Überschussstrom aus erneuerbaren Energien und die Einbindung in das Energieversorgungssystem wurde in mehreren Forschungsvorhaben untersucht (siehe u. a. Store & Go ohne Jahr).

Bislang gibt es in Deutschland erste Pilotanlagen, die in der Regel gekoppelt mit Elektrolyseanlagen betrieben werden. Die bislang größte Pilotanlage dieser Art verfügt über eine (Eingangs-)Leistung von 6 MW und wurde von der Audi AG im niedersächsischen Werlte errichtet. Sie erzeugt Methan als Kraftstoff (Audi 2013).

Bei der biologischen Methanisierung werden die in einer Biogasanlage ohnehin ablaufenden mikrobiellen Prozesse genutzt. Das im Biogas vorhan-

dene CO_2 wird durch entsprechende Bakterien zusammen mit von außen zugeführtem Wasserstoff in Methan umgewandelt. Das Verfahren wird bislang nur in Pilotanlagen eingesetzt, z. B. in der Power-to-Gas-Anlage Allendorf (MicrobEnergy et al. 2015).

Synthetisches Methan ist bislang am Markt nicht konkurrenzfähig mit Methan aus Erdgas. Zudem ist die Methanisierung zur Erzeugung von Methan aus Elektrolyse-Wasserstoff aus ökologischen Gründen erst sinnvoll, wenn der Wasserstoff aus Überschussstrom aus erneuerbaren Energien hergestellt werden kann. Wie in [Kapitel 3.3](#) bereits dargestellt, ist hiermit erst nach 2030 zu rechnen.

4 INVESTITIONS- UND BESCHÄFTIGUNGSEFFEKTE

Im Zentrum der Studie steht die Frage, welche Chancen sich durch verschiedene Speicherstrategien ergeben können. Für die Untersuchung der Fragestellung, welche Industrieinvestitionen und Beschäftigungseffekte durch den Ausbau verschiedener Speichertechnologien zu erwarten sind, ist das Maß, in dem die jeweiligen Technologien zukünftig zum Einsatz kommen, ausschlaggebender als die bisher betrachteten spezifischen Beschäftigungseffekte der Technologieoptionen. Hierzu können jedoch keine exakten Aussagen getroffen werden, insbesondere nicht für die Langfristperspektive bis 2050. Allerdings kann anhand von Szenarien aufgezeigt werden, in welchem Größenkorridor sich der Einsatz der Technologien bewegen könnte. Um einen möglichen Entwicklungskorridor aufzuzeigen, wurden im Folgenden sechs Analyseszenarien betrachtet.

4.1. Die Analyseszenarien

Die Festlegung von Szenarien ist in besonderem Maße geeignet, die Unsicherheit über die Zukunft der Energiespeicherung abzubilden. Unterschiedliche Szenarien spannen einen Korridor möglicher Entwicklungen auf, wo eine konkrete Voraussage nicht möglich ist. So kann die Studie die Bandbreite möglicher Investitions- und Beschäftigungseffekte aufzeigen.

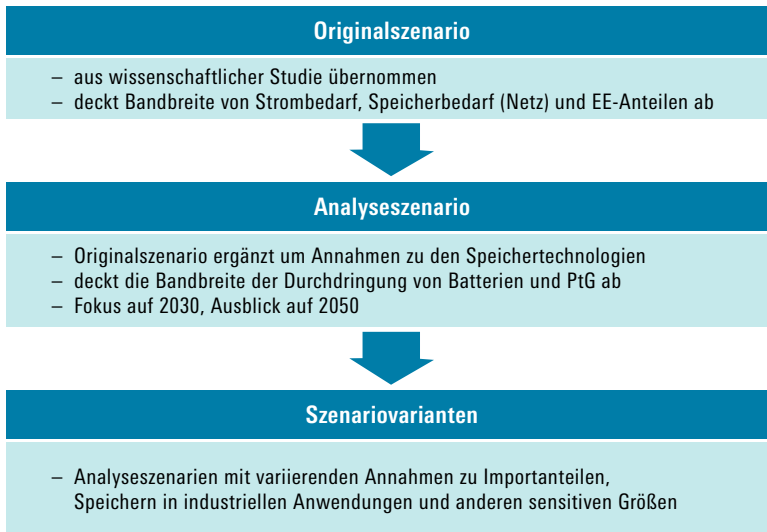
Im Rahmen der Studie werden jedoch keine neuen, eigenen Szenarien erstellt. Vielmehr wird auf vorhandene Untersuchungen zurückgegriffen und es werden solche Szenarien ausgewählt, die

- einen Fokus auf 2030 haben und möglichst auch einen Ausblick auf 2050 enthalten,
- eine Bandbreite des jährlichen Strombedarfs darstellen,
- eine Bandbreite des Anteils von Strom aus erneuerbaren Energien repräsentieren,
- die unterschiedlichen Technologieoptionen in unterschiedlichem Maß berücksichtigen.

Existierende Szenarien können diese Anforderungen allerdings nicht alle gleichzeitig erfüllen. Daher wurden die Analyseszenarien in drei Schritten zusammengestellt (siehe [Abbildung 9](#)). Zunächst wurde eine umfangreiche

Abbildung 9

Vom Originalszenario zum Analyseszenario und Szenariovarianten



Quelle: eigene Darstellung Fraunhofer IFAM

Literaturrecherche durchgeführt und eine Vielzahl von Szenarien bestehender Studien (= Originalszenarien) analysiert. Diese Studien wurden anhand von obligatorischen und optionalen Kriterien bewertet und für die weitere Untersuchung geeignete Originalszenarien ausgewählt (siehe Anhang 1). Die ausgewählten Originalszenarien wurden im nächsten Untersuchungsschritt, wo erforderlich, um Annahmen zum Einsatz von Speichertechnologien zu Analyseszenarien ergänzt. Im letzten Schritt wurden zusätzlich Szenariovarianten festgelegt, mit denen sensitive Größen genauer untersucht werden können.

Insgesamt wurden sechs Analyseszenarien definiert, vier Szenarien für das Untersuchungsjahr 2030 sowie zwei Szenarien für die Zeitperspektive 2050. Für diese sechs Szenarien sind in Tabelle 5 die Daten und Annahmen, die für die Abschätzung der Investitions- und Beschäftigungseffekte relevant sind, zusammengefasst.

Ausgehend von diesen Szenarien und unter Berücksichtigung der Kosten der Technologieoptionen (siehe Tabelle 1) wurden durch die erweiterte

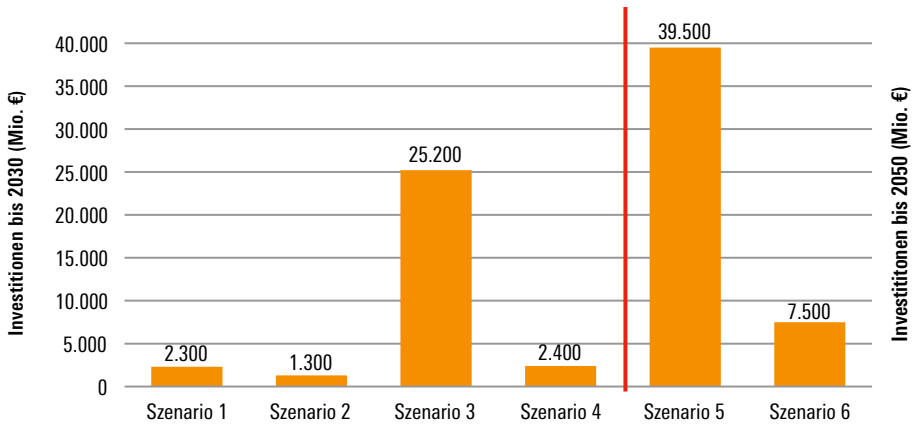
Die Analyseszenarien

		2030				2050	
Zeithorizont		Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4	Szenario 5	Szenario 6
Interpretation	wenig Speicher		mittleres Szenario	viel EE und Elektrolyse	viel EE und Batterie	viel EE und Elektrolyse	viel EE und viele Batterien
	wenig EE-Strom, mäßiger Ausbau Netzspeicher, Ausbau E-Mobilität gem. Bundesregierung	hoher Anteil EE-Strom, wenig Ausbau Netzspeicher, moderater Ausbau E-Mobilität und BZ-Fahrzeuge, Nutzung H ₂ und CH ₄ in anderen Bereichen	sehr hoher Anteil EE-Strom, kein Ausbau Netzspeicher, Ausbau E-Mobilität gem. Bundesregierung, starker Ausbau BZ-Fahrzeuge	sehr hoher Anteil EE-Strom, kein Ausbau E-Mobilität gem. Bundesregierung, starker Ausbau Speicher	sehr hoher Anteil EE-Strom, kein Ausbau Netzspeicher, Ausbau E-Mobilität gem. Bundesregierung, starker Ausbau BZ-Fahrzeuge	sehr hoher Anteil EE-Strom, kein Ausbau Netzspeicher, Ausbau E-Mobilität gem. Bundesregierung, starker Ausbau Speicher	sehr hoher Anteil EE-Strom Ausbau E-Mobilität gem. Bundesregierung, starker Ausbau Speicher
		450 TWh/a	510 TWh/a	730 TWh/a	730 TWh/a	1.120 TWh/a	1.120 TWh/a
Strombedarf		36%	61%	77%	77%	99%	99%
Batterien stationär mobil		3 GW	2 GW	–	13,2 GW	–	68 GW
	6 Mio. Fahrzeuge	2,85 Mio. Fahrzeuge	6 Mio. Fahrzeuge	6 Mio. Fahrzeuge	6 Mio. Fahrzeuge	18 Mio. Fahrzeuge	18 Mio. Fahrzeuge
Elektrolyse H ₂ mobil H ₂ Sonstiges		–	11,4 GW _{el} 2,1 GW _{el}	54 GW _{el}	–	134 GW _{el}	–
		–	–	15,5 Mio. Fahrzeuge	–	31 Mio. Fahrzeuge	–
	Brennstoffzelle	–	–	–	–	–	–
Methanisierer		–	25,3 TWh	–	–	–	–

Quelle: eigene Darstellung Fraunhofer IFAM

Abbildung 10

Kumulierte Investitionen der Szenarien 1 bis 4 (Zieljahr 2030) und der Szenarien 5 und 6 (Zieljahr 2050)



Quelle: eigene Darstellung Fraunhofer IFAM

Input-Output-Analyse⁵ die Investitions- und Beschäftigungseffekte der sechs Szenarien abgeschätzt. Dabei wurde der Vergleichbarkeit halber angenommen, dass die Hälfte der in Deutschland installierten Anlagen auch in Deutschland gefertigt wurde.⁶

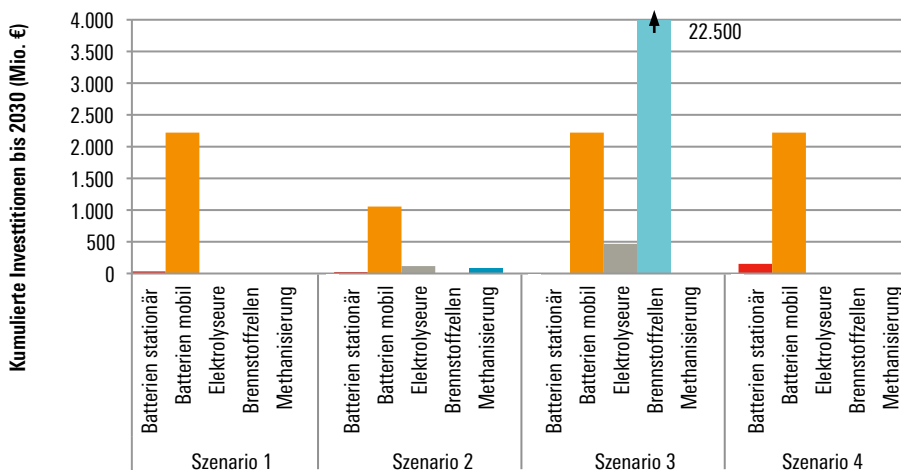
4.2. Kumulierte Investitions- und Beschäftigungseffekte

Die kumulierten Werte geben an, welche Investitions- bzw. Beschäftigungseffekte im gesamten Zeitraum bis zum Zieljahr des jeweiligen Szenarios erreicht werden. In [Abbildung 10](#) sind für die sechs Szenarien die kumulierten Investitionen dargestellt, die für die Errichtung der Fabriken bis zum jeweiligen Zieljahr 2030 bzw. 2050 aufgewendet werden müssen.

⁵ Auf die erweiterte Input-Output-Analyse wird im [Anhang 2](#) genauer eingegangen.

⁶ Mitunter sind für die einzelnen Technologien in Zukunft unterschiedliche abweichende Importanteile wahrscheinlich. Auf die Effekte des Im- und Exports wird detaillierter in [Kapitel 2.2](#) (spezifische Effekte) und [Kapitel 4.5](#) (Varianten der Analyseszenarien) eingegangen.

Kumulierte Investitionen der Szenarien 1 bis 4 (Zieljahr 2030) nach Technologien



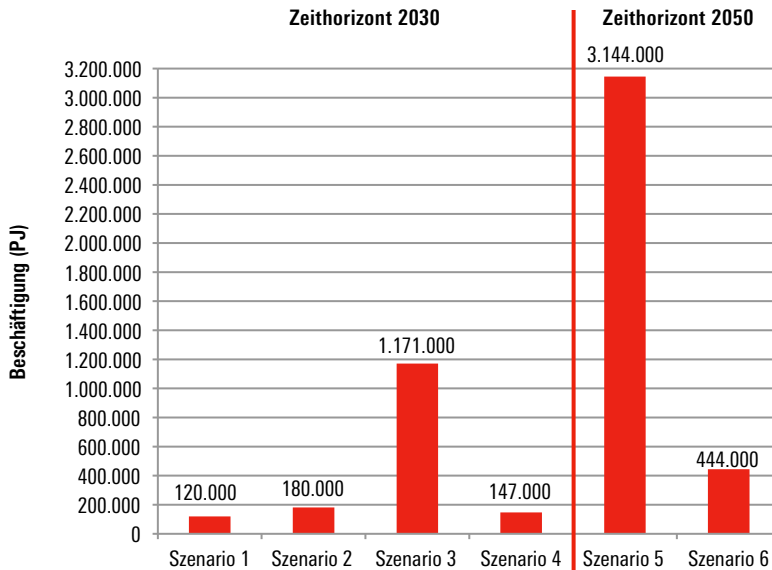
Quelle: eigene Darstellung Fraunhofer IFAM

Die mit Abstand höchsten kumulierten Investitionen weisen das Szenario 3 mit 25 Milliarden Euro und das Szenario 5 mit ca. 40 Milliarden Euro auf. Dies entspricht im Durchschnitt 2 Milliarden Euro jährlich (Szenario 3) bzw. 1,2 Milliarden Euro jährlich (Szenario 5). Die beiden Szenarien sind durch einen hohen Anteil von Strom aus erneuerbaren Energien, Einsatz von Elektrolyseuren und – insbesondere – durch eine große Zahl mobiler Brennstoffzellen in Fahrzeugen gekennzeichnet (siehe [Abbildung 11](#) und [Tabelle 5](#)). Letzteres erfordert die Errichtung entsprechend großer Produktionskapazitäten. Die kumulierten Investitionen der anderen Szenarien sind deutlich geringer und liegen in den Szenarien mit Zieljahr 2030 zwischen 1,3 Milliarden Euro (Szenario 2) und 2,4 Milliarden Euro bzw. bei 7,5 Milliarden Euro für Szenario 6.

[Abbildung 11](#) verdeutlicht den Anteil der verschiedenen Technologien an den Investitionen für die Errichtung der Fabriken. Die mit Abstand höchsten Investitionen entfallen auf die Produktionsstätten für Brennstoffzellen, gefolgt von Fabriken für mobile Batterien. Die Investitionen, die für

Abbildung 12

Kumulierte Beschäftigungseffekte der Szenarien 1 bis 4 (Zieljahr 2030) und der Szenarien 5 und 6 (Zieljahr 2050)



Anmerkung: gerundet auf 1.000 Personenjahre

Quelle: eigene Darstellung Fraunhofer IFAM

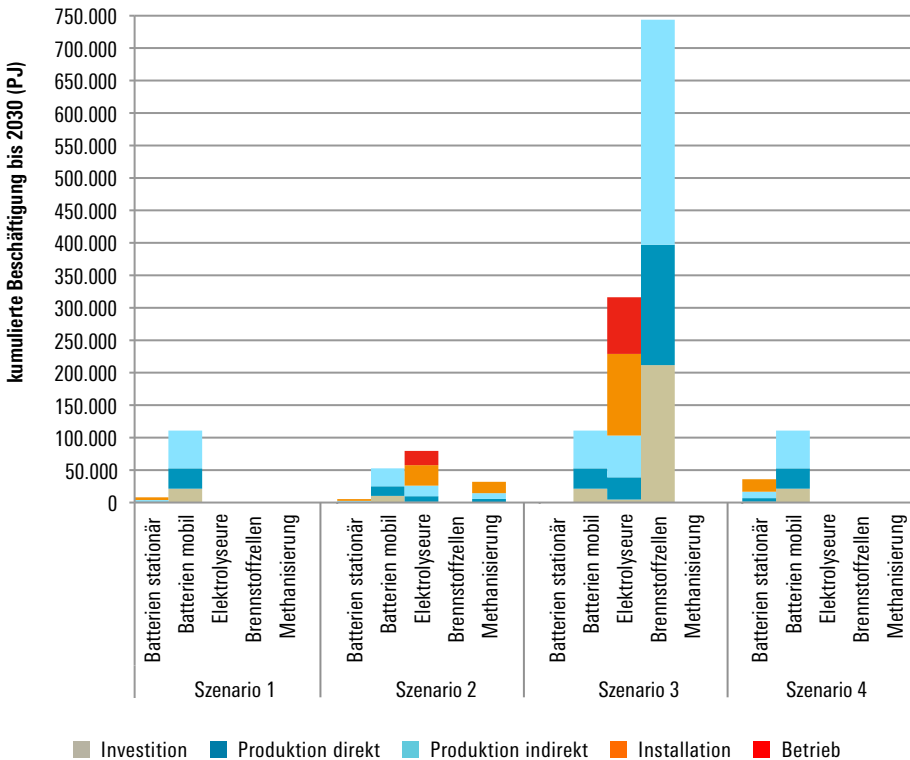
die anderen Technologien erforderlich sind, sind dagegen deutlich geringer.

Abbildung 12 zeigt die kumulierten Beschäftigungseffekte, die durch die Errichtung der Produktionskapazitäten, die Herstellung der Produkte sowie deren Installation und Betrieb bis zum jeweiligen Zieljahr ausgelöst werden. Auch hier weisen die Szenarien mit hohen Investitionskosten die höchsten Werte auf: Szenario 3 mit ca. 1,2 Millionen PJ und Szenario 5 mit ca. 3,1 Millionen PJ. Die Effekte der anderen Szenarien fallen mit 0,12 Millionen PJ (Szenario 1) bis 0,44 Millionen PJ (Szenario 6) deutlich geringer aus.

Der Beschäftigungseffekt im Verhältnis zu den aufgewandten Investitionen ist im Szenario 2 höher als bei den Szenarien 1 und 4. Die Ursache hierfür sind die Annahmen zu den Technologien „Elektrolyseure“ und „Methanisierung“, die in diesem Szenario berücksichtigt wurden. Der Einfluss

Abbildung 13

Kumulierte Beschäftigungseffekte der Szenarien mit Zieljahr 2030 – nach Technologien und Art der Beschäftigung



Quelle: eigene Darstellung Fraunhofer IFAM

der Auswahl der Technologien auf die Beschäftigungseffekte ist für die verschiedenen Szenarien in [Abbildung 13](#) ersichtlich. Diese zeigt die kumulierten Beschäftigungseffekte für die Szenarien mit Zieljahr 2030 differenziert nach den Technologien und der Art der Beschäftigung.

Am auffälligsten ist der hohe Anteil der Brennstoffzellen am kumulierten Beschäftigungseffekt im Szenario 3: Mit 734.700 PJ entfallen fast zwei Drittel des Beschäftigungseffekts auf diese Technologie. Davon findet rund ein Vier-

tel beim Aufbau der Produktionskapazitäten statt, ein Viertel ist der direkte Beschäftigungseffekt bei der Herstellung der Produkte und knapp die Hälfte des Beschäftigungseffekts entfällt auf die indirekte Produktion in anderen Wirtschaftszweigen wie z. B. in der Herstellung von Metallerzeugnissen oder im Bereich Handel und Verkehrsdienstleistungen.

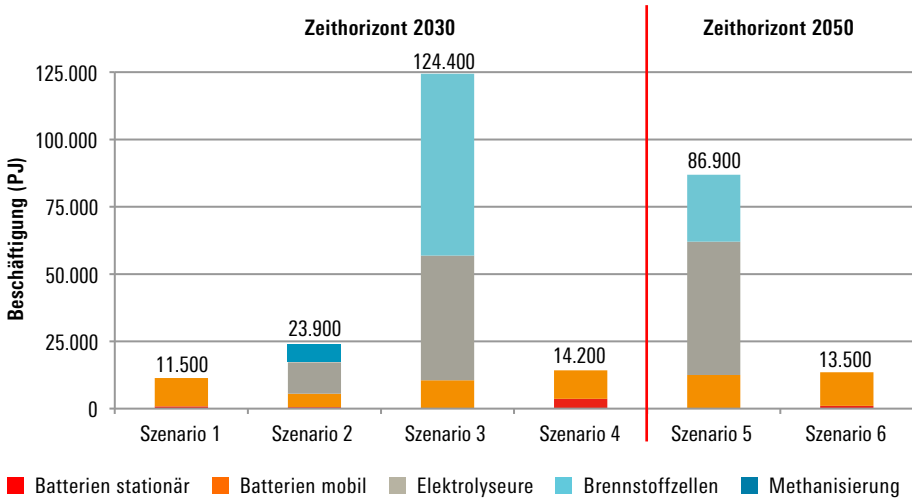
Ein weiterer Effekt ist bei den Technologien „Elektrolyseure“ und „Methanisierung“ zu erkennen. Bei diesen Technologien entfallen große Anteile der kumulierten Beschäftigungseffekte auf die Installation der Elektrolyseure bzw. der Methanisierer und den Betrieb der Anlagen – Kostenkomponenten, die bei mobilen Batterien und mobilen Brennstoffzellen nicht zusätzlich anfallen (siehe auch Tabelle 1). Die Investitionen in die Produktionsstätten haben bei den Technologien „Elektrolyseure“ und „Methanisierung“ nur einen sehr geringen Anteil von wenigen Prozent. Auf die Herstellung der Produkte entfällt knapp ein Drittel der Beschäftigungseffekte und zwei Drittel werden durch die Installation und den Betrieb der Anlagen ausgelöst. Die letztgenannten Tätigkeiten fallen stets im Inland an – im Gegensatz zur Produktion der Anlagen, die auch importiert werden können.⁷

4.3. Ergebnisse in den Zieljahren 2030 und 2050

Neben der kumulierten Beschäftigung, die im Zeitraum zwischen 2018 und dem Zieljahr 2030 bzw. 2050 ausgelöst wird, ist eine weitere Kennzahl das Beschäftigungsniveau im jeweiligen Zieljahr. Die Ergebnisse hierzu zeigt die Abbildung 14. Für die vier Szenarien 1, 2, 4 und 6 liegt der Beschäftigungseffekt im jeweiligen Zieljahr zwischen 11.400 und knapp 24.000 Personenjahren. Dies entspricht 3 bis 6 Prozent der Beschäftigten, die in 2013 im Wirtschaftszweig „Elektrische Ausrüstungen“ tätig waren (VGR 2016).

Die Szenarien 3 und 5 weisen die höchsten Investitionen und auch die höchsten Beschäftigungseffekte auf. Der Beschäftigungseffekt des Szenarios 3 entspricht dabei ca. 30 Prozent der Beschäftigten im Wirtschaftszweig „Elektrische Ausrüstungen“ im Jahr 2016, der Effekt des Szenarios 5 immerhin noch 22 Prozent. Diese hohen Effekte werden im Wesentlichen durch die große Zahl von Brennstoffzellen und Elektrolyseuren, die in den Szenarien angesetzt wurde, ausgelöst.

⁷ Dabei handelt es sich, wie in Kapitel 1.2 beschrieben, lediglich um den direkten Beschäftigungseffekt. Etwaige negative Effekte in anderen Branchen sind darin nicht berücksichtigt. Zu den Effekten von Im- und Exporten siehe Kapitel 4.5.

Beschäftigung im Zieljahr 2030/2050

Quelle: eigene Darstellung Fraunhofer IFAM

Die Ergebnisse für die beiden Szenarien verdeutlichen einerseits das hohe Potenzial der Technologien. Andererseits zeigt der Vergleich mit den derzeitigen Beschäftigungszahlen in den Wirtschaftszweigen auch, dass ein derart massiver Ausbau mit Konzentration auf wenige Technologien eher unwahrscheinlich ist.

Beim Vergleich der Ergebnisse der Szenarien 3 und 5 fällt ein weiterer Effekt auf: Die Beschäftigung für Szenario 5 ist in 2050 niedriger als diejenige für Szenario 3 in 2030 – und dies, obwohl in Szenario 5 von einer deutlich höheren Leistung von Elektrolyseuren und einer größeren Zahl von mobilen Brennstoffzellen ausgegangen wird. Vor diesem Hintergrund ist die zeitliche Entwicklung der Beschäftigungseffekte und der Investitionen aufschlussreich.

4.4. Zeitverlauf der Investitions- und Beschäftigungseffekte

Der zeitliche Verlauf der Investitions- und Beschäftigungseffekte wird im Folgenden am Beispiel des 5. Szenarios aufgezeigt. Dieses Szenario wurde ge-

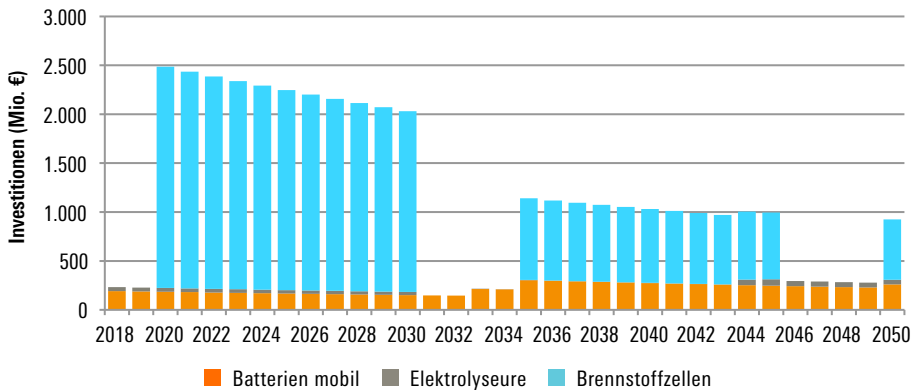
wählt, da es drei der fünf untersuchten Speichertechnologien beinhaltet – mobile Batterien, Elektrolyseure und mobile Brennstoffzellen – und auf das Zieljahr 2050 gerichtet ist. Die in [Abbildung 15](#) dargestellte Entwicklung der Investitionen in die Produktionsanlagen für die drei Technologien verdeutlicht, dass mit den im Szenario getroffenen Annahmen

- nur geringe Investitionen in Fabriken zur Fertigung von Elektrolyseuren anfallen,
- bis 2050 kontinuierlich in die Produktionsstätten für mobile Batterien investiert wird und
- die Investitionen für Brennstoffzellenfabriken diskontinuierlich stattfinden.

Die diskontinuierliche Entwicklung der Investitionen bei den Brennstoffzellen ist dadurch bedingt, dass das Szenario 5 auf dem Szenario 3 aufbaut. Dementsprechend wird in den Jahren 2020 bis 2030 die Produktionskapazität errichtet, die für die Produktion der in 2030 angestrebten Leistung an Brennstoffzellen erforderlich ist. Diese Produktionskapazität ist so hoch, dass in den Folgejahren keine neuen Fabriken für Brennstoffzellen mehr errichtet werden müssen, um die in 2050 angestrebte Gesamtleistung an Brennstoffzellen zu erreichen. Allerdings sind ab 2035 Reinvestitionen in die Produktionsanlagen der bestehenden Fabriken erforderlich.

Abbildung 15

Szenario 5 – Entwicklung der Investitionen bis 2050 nach Technologien



Quelle: eigene Darstellung Fraunhofer IFAM

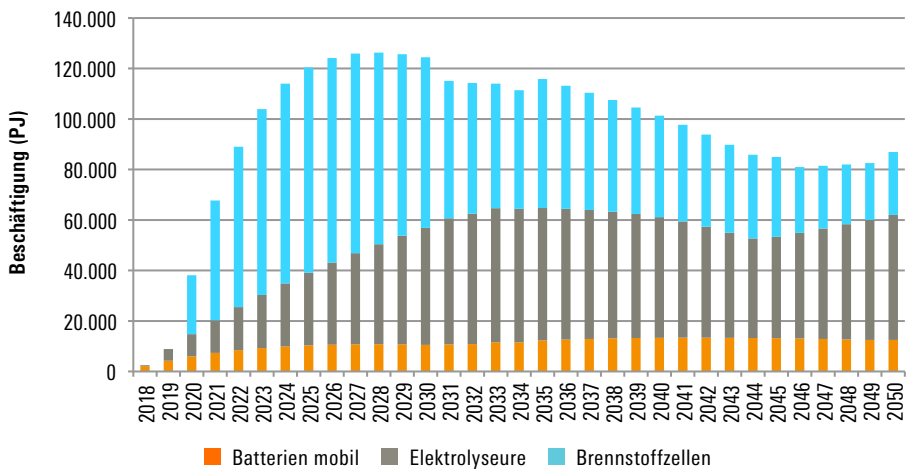
Ein solches unstetiges Investitionsverhalten wie das für die mobilen Brennstoffzellen dargestellte entspricht allerdings nicht der in der Industrie üblichen Investitionsstrategie. Hier wäre ein langsamerer, kontinuierlicher Aufbau der Kapazitäten realistischer. Es kann daher geschlussfolgert werden, dass das Ausbauziel für Brennstoffzellen bis 2030 im Szenario 3 aus Sicht der Industrie zu hoch ist. Dabei ist allerdings zu bedenken, dass das Szenario 3 ein Maximalszenario darstellt. Zudem wurde es aus der Perspektive der Energiewirtschaft abgeleitet und die ökonomischen Randbedingungen der Industrie wurden bei der Szenariendefinition nicht berücksichtigt.

Auch die Entwicklung der Beschäftigung, die in [Abbildung 16](#) dargestellt ist, spiegelt den Verlauf der Investitionen in Brennstoffzellenfabriken wider. Die Beschäftigung durch den Aufbau von Brennstoffzellenfabriken und die Herstellung der Brennstoffzellen steigt bis 2028 an und nimmt ab 2030 bis 2050 durch den Wegfall von Neuinvestitionen in Fabriken kontinuierlich ab. Nur in 2035 bewirken die Reinvestitionen eine leichte Zunahme der Beschäftigung, die dann bis 2050 wieder zurückgeht auf ca. 24.000 PJ.

Dagegen nimmt die durch mobile Batterien ausgelöste Beschäftigung bis 2030 zu und bleibt bis 2050 auf einem – wenn auch niedrigen – Niveau von

Abbildung 16

Szenario 5 – Entwicklung der Beschäftigung bis 2050 nach Technologien



Quelle: eigene Darstellung Fraunhofer IFAM

ca. 12.000 PJ bis 13.000 PJ. Der durch Elektrolyseure ausgelöste Beschäftigungseffekt verläuft ebenfalls gleichmäßiger als im Fall der Brennstoffzellen und liegt von 2028 bis 2050 zwischen 40.000 PJ und 50.000 PJ.

Die zeitlichen Verläufe der Beschäftigung durch den Einsatz mobiler Batterien und Elektrolyseure zeigen, dass die für 2030 und 2050 gewählten Ziele für diese Technologien einen gleichmäßigeren Aufbau der Produktion ermöglichen als im Fall der Brennstoffzellen. Ob eine Umsetzung in dem angenommenen Umfang allerdings realistisch sein könnte, hängt insbesondere von der Marktreife der Produkte und den politischen Rahmenbedingungen ab. Diese sind derzeit noch eher unklar.⁸

4.5. Szenariovarianten

Für zwei zentrale Annahmen wurden Szenariovarianten untersucht: einerseits zum Anteil des Imports nach Deutschland und andererseits zur Lebensdauer mobiler Batterien.

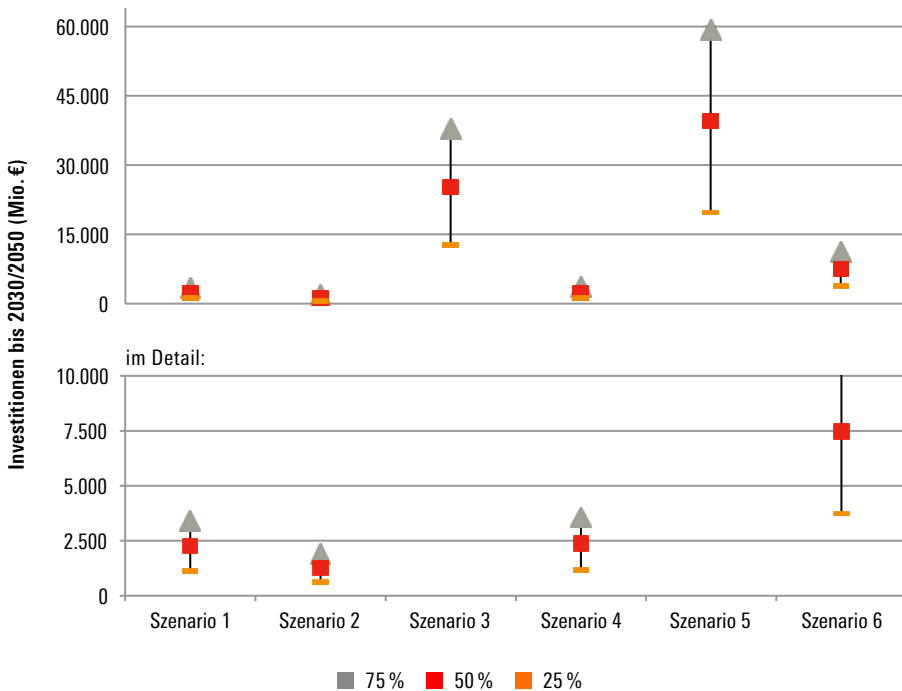
Die Abschätzung der Investitions- und Beschäftigungseffekte geht von einem Importanteil von 50 Prozent aus. Um den Einfluss höherer oder niedriger Importanteile aufzuzeigen, wurden für alle sechs Szenarien Berechnungen mit einem höheren Importanteil von 75 Prozent und einer niedrigeren Importquote von 25 Prozent durchgeführt.⁹ Die Ergebnisse zeigen [Abbildung 17](#) und [Abbildung 18](#).

Im unteren Teil der [Abbildung 17](#) und [Abbildung 18](#) sind die Ergebnisse für die Szenarien 1, 2, 4 und 6 vergrößert dargestellt. Bei fast allen Szenarien nehmen die Investitionen und die Beschäftigung (fast) in gleichem Maß zu oder ab, in dem Importanteile reduziert bzw. erhöht werden. Eine Ausnahme bildet das Szenario 2, bei dem die Beschäftigungseffekte maßgeblich durch die Technologien „Elektrolyseure“ und „Methanisierung“ bestimmt werden. Bei diesen beiden Technologien tragen neben dem Aufbau der Fabriken und der Herstellung der Produkte auch die Installation und der Betrieb der Anlagen zu den Beschäftigungseffekten bei. Die beiden letztgenannten Komponenten fallen – unabhängig von der Herkunft der Produkte – immer

⁸ Siehe hierzu auch [Kapitel 3](#) und [Kapitel 5](#).

⁹ Die Prozentangaben können hier als Netto-Importquote verstanden werden. Wenn also beispielsweise künftig 25 Prozent der E-Fahrzeuge in Deutschland mit vor Ort hergestellten Batterien ausgestattet würden und genauso viele Batterien exportiert würden, so ergäbe sich eine deutsche Fertigung von insgesamt 50 Prozent der für Deutschland angesetzten Fahrzeugbatterien.

Kumulierte Investitionen in Abhängigkeit vom Importanteil



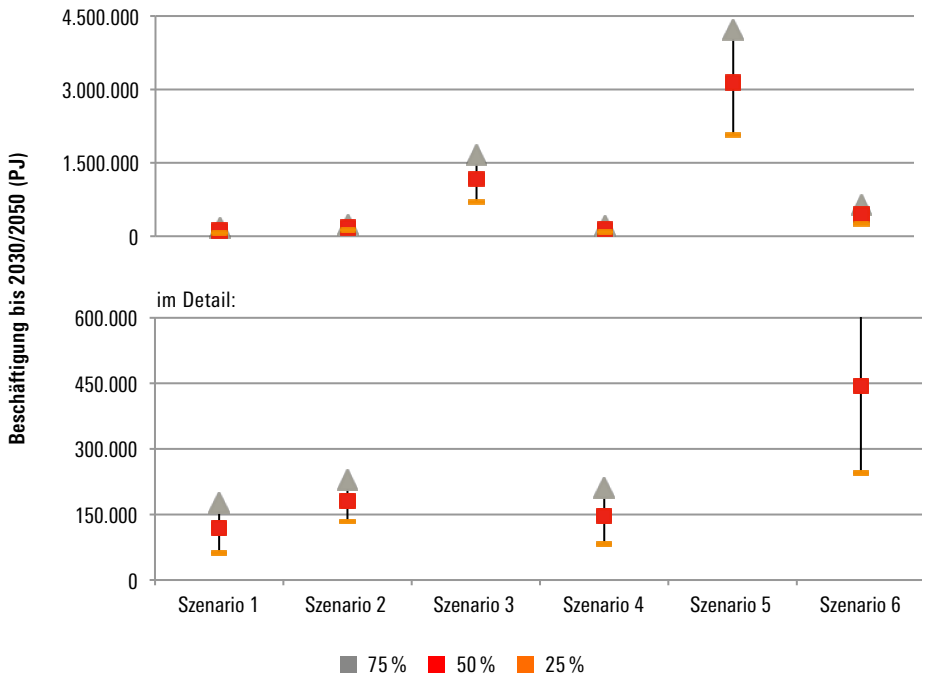
Quelle: eigene Darstellung Fraunhofer IFAM

im Inland an, da die Anlagen dort installiert und betrieben werden. Daher verändern sich zwar die Investitionen proportional zum Anteil der inländischen Fertigung. Die Beschäftigung durch Installation und Betrieb ist dagegen unabhängig vom Ort der Fertigung der Produkte.

In einer weiteren Szenariovariante wurde am Beispiel des ersten Szenarios untersucht, welchen Einfluss die Lebensdauer der mobilen Batterien auf die Beschäftigungseffekte hat. Bei der Berechnung der Analyseszenarien wurde von einer Nutzungsdauer von zehn Jahren ausgegangen. Bislang geben Hersteller von Elektrofahrzeugen jedoch in der Regel nur eine Garantie von acht Jahren auf die Batterie. Daher wurden für das Szenario 1 die Berechnungen auch in einer Variante mit einer Nutzungsdauer von acht Jah-

Abbildung 18

Kumulierte Beschäftigung in Abhängigkeit vom Importanteil



Quelle: eigene Darstellung Fraunhofer IFAM

ren durchgeführt. Das Ergebnis zeigt, dass diese Verkürzung der Lebensdauer um 25 Prozent aufgrund von frühzeitigem Ersatzbedarf zu einer Steigerung des Beschäftigungseffekts um 15 Prozent führt – von 111.000 PJ auf 127.600 PJ.

4.6. Sensitivitätsanalyse

Um den Einfluss weiterer Annahmen einschätzen zu können, wurden für elf Parameter Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Dabei wurde jeder Parameter um ± 10 Prozent verändert und die Auswirkung auf die Beschäftigungs- und

Tabelle 6

Auswirkung der Veränderung der Eingangsparameter ($\pm 10\%$) auf die Beschäftigungs- und Investitionseffekte

Variierter Parameter	Veränderung der	
	Beschäftigung	Investitionen
Herstellungswert der Produkte (Basis 2018)	bis zu 10 %	0 %
spezifischer Beschäftigungseffekt der Herstellung der Produkte	bis zu 10 %	0 %
jährliche Preisentwicklung der Speichertechnologien	bis zu 6 %	0 %
spezifischer Beschäftigungseffekt der Installation	bis zu 5 %	0 %
Installationskosten in % der Herstellungskosten	bis zu 5 %	0 %
spezifische Investitionskosten für Fabriken (Basis 2018/2020) ¹	bis zu 3 %	10 %
Effizienz neuer Produktionsstätten	bis zu 3 %	0 %
Betriebskosten in % der Investitionskosten	bis zu 3 %	0 %
spezifischer Beschäftigungseffekt der Investitionen	bis zu 3 %	0 %
Entwicklung der Produktivität (Gesamtwirtschaft)	bis zu 2 %	0 %
Zeitliche Entwicklung der spez. Investitionskosten	bis zu 1 %	bis zu 2 %

¹ Bau der ersten Produktionsstätten für Brennstoffzellen erst 2020 („Sonstige Eingangsdaten“ in [Anhang 3](#))

Quelle: eigene Darstellung Fraunhofer IFAM

Investitionseffekte wurden berechnet.¹⁰ Die Ergebnisse sind in [Tabelle 6](#) zusammengefasst.

Auf die *Höhe der Investitionen* zur Errichtung der Fabriken wirken sich nur zwei der Parameter aus: die spezifischen Investitionskosten für Fabriken sowie deren zeitliche Entwicklung. Die spezifischen Investitionskosten skalieren dabei die Investitionen linear. Eine zehnprozentige Modifikation der zeitlichen Entwicklung der spezifischen Investitionskosten verändert die Investitionen nur um ein bis zwei Prozent.

10 Die Ansätze für die verschiedenen Parameter sind in [Anhang 3](#) zu finden.

Der Beschäftigungseffekt wird dagegen durch alle hier aufgelisteten Parameter beeinflusst. Am stärksten wirken sich die Veränderungen des Herstellungswerts der Produkte und entsprechend des spezifischen Beschäftigungseffekts der Herstellung der Produkte aus (ca. 10 Prozent).¹¹ Nur etwa halb so stark sind die Auswirkungen der Preisentwicklung der Speichertechnologie, der Installationskosten und des spezifischen Beschäftigungseffekts der Installation. Alle anderen Parameter haben nur geringen Einfluss auf die Beschäftigungseffekte (<3 Prozent).¹²

4.7. Sonstige Aspekte

Die kumulativen Beschäftigungseffekte wurden auch noch dahingehend untersucht, welche Anteile auf kleine und mittlere Unternehmen (KMU) entfallen und wie hoch der Anteil der Beschäftigten in der Industrie ist. Dieser Auswertung liegen die KMU-Anteile der einzelnen Wirtschaftszweige (IfM 2016) der Input-Output-Analyse zugrunde.

Der Anteil der Beschäftigung in KMU liegt in den Szenarien zwischen 43 Prozent im Szenario 5 und 54 Prozent im Szenario 4.

Der KMU-Anteil hängt davon ab, welchen Anteil die verschiedenen Beschäftigungsarten – Investition (= Bau der Fabriken), Produktion der Anlagen (direkte und indirekte), Installation und Betrieb – in dem jeweiligen Szenario haben. Die höchsten KMU-Anteile weisen die Szenarien auf, in denen Technologien mit Installations- und Betriebskosten eine maßgebliche Rolle spielen. Dies sind die Szenarien 2 (53 Prozent) und 4 (54 Prozent). In den Szenarien 3 und 6 liegt der Anteil mit 51 Prozent nur knapp darunter. Den geringsten Beschäftigungsanteil in KMUs hat das Szenario 5 (43 Prozent). Das Szenario 1 ist mit 49 Prozent dazwischen zu verorten. In diesem werden die Beschäftigungseffekte durch eine große Zahl von Brennstoffzellen in Fahrzeugen dominiert, bei denen keine Installations- und Betriebskosten angesetzt wurden (siehe Tabelle 1).

Für die Zielsetzung der Studie ist darüber hinaus der Anteil der Beschäftigten in der Industrie von Interesse. Hierfür wurde exemplarisch der Anteil der Beschäftigung in der Industrie bei der Fertigung von Batterien betrachtet.

11 Der Beschäftigungseffekt hängt methodisch sehr stark, aber nicht ausschließlich, von diesen Parametern ab.

12 Prinzipiell können sich die in Tabelle 6 aufgeführten Prozentwerte auch kumulieren. Welche Effekte hierdurch auftreten könnten, wurde im Rahmen der Untersuchung nicht weiter analysiert.

Entsprechend der Zuordnung der einzelnen Wirtschaftszweige entfallen hier 63 Prozent des Beschäftigungseffektes auf die Industrie und weitere 19 Prozent auf industrienähe Dienstleistungen.

Untersucht man den Anteil des Beschäftigungseffekts für die einzelnen Technologien, so ergibt sich der mit 62 Prozent höchste KMU-Anteil an der für die stationären und der niedrigste mit 47 Prozent bei den mobilen Batterien. Für die Wasserstofftechnologien liegt er mit 52 Prozent für Elektrolyseure und Elektrolyseure mit Methanisierung sowie mit 50 Prozent für Elektrolyseure in Kombination mit Brennstoffzellen dazwischen.

5 FAZIT UND AUSBLICK

Für eine stabile Stromversorgung mit hohen Anteilen aus fluktuierenden erneuerbare Energien sind zukünftig Flexibilitäten im gesamten Energiesystem erforderlich. Stromspeicher spielen dabei eine zentrale Rolle. Ein weiterer Treiber für die Nutzung von Stromspeichern ist der Ausbau der Elektromobilität. Die vorliegende Studie ergänzt die existierende Literatur zu Speichern um eine systematische Abschätzung der Investitionen und Beschäftigungseffekte verschiedener Speicherstrategien.

In den unterschiedlichen Szenarien sind – abhängig vom Ausbau der erneuerbaren Energien im Stromsektor, den Dekarbonisierungsanstrengungen im Verkehr und vor allem vom Technologiemix – zwischen 11.000 und 125.000 Beschäftigte durch Speichertechnologien im Jahr 2030 denkbar, im Vergleich zu aktuell rund 960.000 im Maschinenbau und knapp 400.000 in der Herstellung von elektrischer Ausrüstung. Dem stehen Industrieinvestitionen von 1 bis 25 Milliarden Euro bis 2030 (also durchschnittlich 0,1 bis 2 Milliarden Euro jährlich) gegenüber. Bis 2050 betragen die Industrieinvestitionen durchschnittlich 0,2 bis 1,2 Milliarden Euro jährlich.

Die Ergebnisse aller Szenarien verdeutlichen, dass mittelfristig der Verkehrssektor die entscheidende Größe ist. Stationäre Speicher spielen für die Beschäftigung in Deutschland eine untergeordnete Rolle, da die hier zu erwartende installierte Leistung erheblich geringer ist als die Batterieleistung von Elektromobilen bzw. die Leistung von Brennstoffzellenfahrzeugen.

Betrachtet man den zeitlichen Verlauf der Investitionen in den Szenarien bis 2050, wird deutlich, dass in den Jahren bis 2030 hohe Investitionen in die Produktionsstätten für Brennstoffzellen getätigt werden müssen, um die für das Zieljahr 2030 erforderlichen Produktionskapazität zu errichten. Diese reichen aus, um die in 2050 angestrebte Gesamtleistung an Brennstoffzellen zu produzieren. Der rasche Aufbau der Produktionskapazitäten bereits bis 2030 erscheint weniger nachhaltig. Eine stetige Entwicklung der Investitionen ist für die Industrie wünschenswerter.

In den Szenarien ist der Großteil des Beschäftigungseffekts auf die Herstellung der Produkte zurückzuführen. Die Investitionen in die Produktionsanlagen spielen eine untergeordnete Rolle. Beschäftigungseffekte durch Installation und Betrieb der Anlagen treten in nennenswertem Umfang nur bei Elektrolyseuren und Methanisierern auf. Dies unterstreicht die Bedeutung der Herstellung der Speichertechnologien im Inland für die Beschäftigungs-

effekte in Deutschland. Nur wenn ein erheblicher Teil der in Deutschland eingesetzten Speichertechnologien auch im Land gefertigt werden, sind signifikante Beschäftigungseffekte zu erwarten.

In besonderem Maße gilt dies für Batterien. Von der Wertschöpfung der Batterieproduktion entfallen gegenwärtig rund zwei Drittel auf die Zelle. Die Zellfertigung findet derzeit aber (nahezu) vollständig im Ausland statt, insbesondere in China, Japan und Südkorea. Aktuelle Entwicklungen zeigen die Bestrebung der deutschen Industrie, eine konkurrenzfähige Zell- und Batteriefertigung in Deutschland und Europa aufzubauen. Nur wenn diese Bestrebungen erfolgreich sind, wird die Batteriefertigung in nennenswertem Umfang zur Beschäftigung in Deutschland beitragen können.

Die Szenarien mit Elektrolyseuren und Brennstoffzellen weisen die höchsten Beschäftigungseffekte auf. Sie sind aber mit hohen Investitionen und Ausgaben verbunden. Brennstoffzellen sind derzeit noch weiter vom Markt entfernt als Batteriefahrzeuge. Es gibt erst wenige marktgängige Brennstoffzellen-PKW asiatischer Hersteller und nur Prototypen bzw. Konzepte für Schwerlastfahrzeuge und Züge. Mittel- und langfristig sind sie aber wegen der höheren Speicherdichte von Wasserstoff und der größeren Reichweiten der Fahrzeuge eine interessante Option für den Fern-, Schwerlast- und Schienenverkehr. Die Bundesregierung unterstützt daher die Entwicklung und Marktvorbereitung von Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologien und den Ausbau der Wasserstoffinfrastruktur.

Im Gegensatz zur Batterie- und Brennstoffzellentechnologie besitzt Deutschland bei der Elektrolyse eine internationale Technologieführerschaft, insbesondere im Bereich der alkalischen Elektrolyse. Dies spiegelt sich u. a. im hohen Anteil deutscher Publikationen bzw. der deutschen Patente im internationalen Vergleich wider.

Die Entwicklung im Bereich innovativer Speichertechnologien hängt entscheidend von den energiepolitischen Rahmenbedingungen ab. Bislang hat die Diskussion um Speicher und ihren Einsatz in verschiedenen Anwendungen noch nicht den Stellenwert, der ihr im Kontext der Energie- und Verkehrswende eigentlich gebührt. Eine klare Speicherstrategie ist in Deutschland gegenwärtig noch nicht erkennbar. Die ausgewählten Szenarien spiegeln die Bandbreite möglicher Entwicklungen wider. Für die Politik gilt es, die Chancen der deutschen Industrie für Beschäftigung vor Ort vor dem Hintergrund einer teilweise starken internationalen Konkurrenz (Batterien) und vergleichsweise hohen Aufwendungen im Zuge der Markteinführung (Wasserstofftechnologien) bei strategischen Entscheidungen zu Flexibilität und Speicherung mit zu berücksichtigen.

LITERATURVERZEICHNIS

(Die Quellen für den Anhang werden weiter unten separat ausgewiesen.)

AGORA – Agora Energiewende (Hrsg.) (2014): Stromspeicher in der Energiewende. Berlin, September 2014.

Audi GmbH (2013): Audi e-gas Projekt, Quelle: <http://www.powertogas.info/power-to-gas/pilotprojekte-im-ueberblick/audi-e-gas-projekt/> (Abruf am 30.07.2018).

Auto-Stack CORE (2017): Automotive Fuel Cell Stack Cluster Initiative for Europe II – Auto-Stack CORE. Quelle: <http://autostack.zsw-bw.de/index.php?id=7> (Abruf am 30.07.2018).

KBA – Kraftfahrt-Bundesamt (2012): Bestand an Pkw am 1. Januar 2012 nach ausgewählten Kraftstoffarten. Quelle: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/2012/2012_b_emi_eckdaten_absolut.html?nn=663508 (Abruf am 30.07.2018).

KBA – Kraftfahrt-Bundesamt (2013): Bestand an Pkw am 1. Januar 2013 nach ausgewählten Kraftstoffarten. Quelle: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/2013/2013_b_umwelt_dusl_absolut.html?nn=793894 (Abruf am 30.07.2018).

KBA – Kraftfahrt-Bundesamt (2014): Bestand an Pkw am 1. Januar 2014 nach ausgewählten Kraftstoffarten. Quelle: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/2014/2014_b_umwelt_dusl_absolut.html?nn=1137062 (Abruf am 30.07.2018).

KBA – Kraftfahrt-Bundesamt (2015): Bestand an Pkw am 1. Januar 2015 nach ausgewählten Kraftstoffarten. Quelle: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/2015/2015_b_umwelt_dusl_absolut.html?nn=1378446 (Abruf am 30.07.2018).

KBA – Kraftfahrt-Bundesamt (2016): Bestand an Pkw am 1. Januar 2016 nach ausgewählten Kraftstoffarten. Quelle: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/2016/2016_b_umwelt_dusl.html?nn=1609370 (Abruf am 30.07.2018).

KBA – Kraftfahrt-Bundesamt (2017): Bestand an Pkw am 1. Januar 2017 nach ausgewählten Kraftstoffarten. Quelle: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/2017_b_umwelt_dusl.html?nn=663524 (Abruf am 30.07.2018).

BMVI – Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2016): Fortsetzung des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) 2016 – 2026. Berlin, September 2016.

BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2017a): Zahlen und Fakten – Energiedaten – Nationale und Internationale Entwicklung – Bruttostromerzeugung 2016. Aktualisierung 4.10.2017.

BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2017b): Strategisches Leitprojekt des BMWi: Trends und Perspektiven der Energieforschung – Konferenzunterlagen für die interaktiven Workshops, Berlin, Mai 2017

Bosch GmbH (2014): Doppelbatterie für den Stromspeicher Braderup. Quelle: <http://www.bosch-presse.de/pressportal/de/de/doppelbatterie-fuer-den-stromspeicher-braderup-42631.html> (Abruf am 30.07.2018).

Büttler, A./Hentschel, J./Kahlert, S./Angerer, M. (2015): Statusbericht Flexibilitätsbedarf im Stromsektor. In: Schriftenreihe Energiesystem im Wandel – Teil I. Technische Universität München, März 2015.

Daimler AG (2016): Weltweit größter 2nd-Use-Batteriespeicher geht ans Netz. Quelle: <http://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Weltweit-groesster-2nd-Use-Batteriespeicher-geht-ans-Netz.xhtml?oid=13634457>, September 2016. (Abruf am 30.07.2018).

Daimler AG (2017): In Kamenz steigt die Spannung – Daimler baut eine der größten und modernsten Batteriefabriken der Welt. Quelle: <https://www.daimler.com/innovation/effizienz/kamenz2017.html> (Abruf am 30.07.2018).

Diess, H. (2017): VW wünscht sich Mitsstreiter zum Aufbau einer Zellproduktion für Elektroauto-Batterien. Quelle: <https://ecomento.de/2017/09/20/vw-wuenscht-sich-mitsstreiter-aufbau-zellproduktion- elektroauto-batterien/> (Abruf am 6.10.2017).

DWV – Deutsche Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband e. V. (o. J.): Herstellungsmenge von Wasserstoff in Milliarden Nm³, ohne Jahresangabe. Quelle: <http://www.energieportal24.de/cms1/wissensportale/brenn-kraftstoffe/wasserstoff/h2-herstellung/> (Abruf am 30.07.2018).

e-mobil BW – Landesagentur für Elektromobilität und Brennstoffzellentechnologie Baden-Württemberg GmbH (Hrsg.) (2014): Entwicklung der Beschäftigung im After Sales – Effekte aus der Elektromobilität. Stuttgart, Oktober 2014.

Energiezukunft (2016): In Feldheim steht die größte Batterie Europas. Quelle: <https://www.energiezukunft.eu/umwelt/technik/in-feldheim-steht-die-groesste-batterie-europas-gn103538/> (Abruf am 30.07.2018).

enercity (2016): enercity integriert Erneuerbare Energien mit innovativer Technik – Niedersachsens Umweltminister Wenzel besucht Innovationsstandort Herrenhausen. Pressemeldung 21.11.2016. Quelle: <https://www.enercity.de/presse/pressemeldungen/2016/2016-11-21-Umweltminister-Wenzel-besucht-Herrenhausen/> (Abruf am 30.07.2018).

Erneuerbare Energien (2014): Solarpark mit Speicher liefert regelbare Leistung, 27.11.2014. Quelle: <https://www.erneuerbareenergien.de/solarpark-mit-speicher-liefert-regelbare-leistung/150/436/83679/> (Abruf am 30.07.2018).

Eurotransport (2017): Batterie oder Brennstoffzelle – Kampf um den Energieträger der Zukunft. In: lastauto omnibus 01/2017. Quelle: <https://www.eurotransport.de/news/batterie-oder-brennstoffzelle-kampf-um-den-energetraeger-der-zukunft-8785145.html> (Abruf am 30.07.2018).

EWI – Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln, FZ Jülich, GWI, RUB, WI, ZBT (2015): Virtuelles Institut: Strom zu Gas und Wärme – Flexibilisierungsoptionen im Strom-Gas-Wärme-System, Abschlussbericht, S. 66, Februar 2015

FCH – Gemeinsames Unternehmen Brennstoffzellen und Wasserstoff (2017): Gemeinsame Technologieinitiative für Brennstoffzellen und Wasserstoff – Gemeinsames Unternehmen FCH 2, Europäische Union, Förderprogramm. Quelle: <https://www.nrwbank.de/de/foerderlotse-produkte/Gemeinsame-Technologieinitiative-fuer-Brennstoffzellen-und-Wasserstoff-Gemeinsames-Unternehmen-FCH-2/15320/produktdetail.html> (Abruf am 30.07.2018).

FCH JU – Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (ohne Jahr): Development of PEM Fuel Cell Stack Reference Test Procedures for Industry – StackTest. Quelle: <http://www.fch.europa.eu/project/development-pem-fuel-cell-stack-reference-test-procedures-industry> (Abruf am 30.07.2018).

Figgner, J./Haberschusz, D./Kairies, K.-P./Wessels, O./Tepe, B./Ebbert, M./Herzog, R./Sauer, D. U. (2017): Wissenschaftliches Mess- und Evaluierungsprogramm Solarstromspeicher 2.0 – Jahresbericht 2017, S. 33. Aachen.

Flensburger Tageblatt (2017): Europas größter Stromspeicher, 03.07.2017, Quelle: <https://www.shz.de/lokales/flensburger-tageblatt/europas-groesster-stromspeicher-id17204521.html> (Abruf am 16.10.2018)

FZ Jülich – Forschungszentrum Jülich (2017):

Vergleichende Infrastrukturanalyse für das Betanken von Wasserstoff-Brennstoffzellen-Fahrzeugen und das elektrische Laden von Batterie-Fahrzeugen – Handout Zusammenfassung. Oktober 2017. Quelle: <http://h2-mobility.de/news-und-infos/vergleichende-infrastrukturanalyse/> (Abruf am 1.11.2017).

Gnann, T./Wietschel, M./Kühn, A./Thielmann, A./Sauer, A./Plötz, P./Moll, C., Stütz, S./Schellert, M./Rüdiger, D., Waßmuth, V./Paufler-Mann, D. (2017): Wissenschaftliche Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie – Teilstudie „Brennstoffzellen-Lkw: kritische Entwicklungshemmnisse, Forschungsbedarf und Marktpotential“. Karlsruhe, August 2017.

HA – Hessen Agentur GmbH (Hrsg.) (2015): Brennstoffzellen im öffentlichen Personennahverkehr. Band 4 der Schriftenreihe Wasserstoff und Brennstoffzellen. 1. Auflage, Juli 2015.

Hettesheimer, T./Hummen, T./Marscheider-Weidemann, F./Schröter, M./Lerch, C./Stahlberger, M./Heussler, A. (2013): Energiespeicher Monitoring für die Elektromobilität (EMOTOR) – Bericht zur Produktion und Ökobilanzierung. S. 25, Karlsruhe, Juni 2013.

Hydrogeit (2017): Mit Brennstoffzelle Zug fahren. In: HZwei – Das Magazin für Wasserstoff und Brennstoffzellen. 7.9.2017. Quelle: <https://www.hzwei.info/blog/2017/09/07/mit-brennstoffzelle-zug-fahren/> (Abruf am 30.07.2018).

IfM – Institut für Mittelstandsforschung (2016): Branchenstruktur der Unternehmen bezogen auf die SV-Beschäftigten und Zahl der Unternehmen laut Unternehmensregister 2014 in Deutschland nach Wirtschaftszweigen, Ergebnisse aus dem Unternehmensregister des Statistischen Bundesamtes. Bonn.

IWR – Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien (2017): Daimler und Vaillant wenden sich von Brennstoffzellen ab. April 2017. Quelle: <http://www.iwr.de/news.php?id=33421> (Abruf am 30.07.2018).

IV – Internationales Verkehrswesen (2017):

Wasserstoff-Triebzug Coradia iLint in der Testphase. Quelle: <https://www.internationales-verkehrswesen.de/wasserstoff-triebzug-coradia-ilint-test/> (Abruf am 30.07.2018).

Kirchner, A./Koziel, S./Mayer, N., Kuns, C. (2016): Flexibilität durch Kopplung von Strom, Wärme und Verkehr – Metaanalyse, Forschungsradar Energiewende, S. 10. Berlin, April 2016.

Köckhuber, C. (2017): Anwendung und Bewertung von erneuerbaren Brennstoffen. München, April 2017.

LUNA Gruppe (2017): Errichtet Batteriespeicher mit 100 Megawatt, Quelle: <http://www.ee-news.ch/de/erneuerbare/forschung/article/35871/luna-gruppe-errichtet-batteriespeicher-mit-100-megawatt> (Abruf am 30.07.2018).

Maisonnier, G./Perrin, J./Steinberger-Wilckens, R./Trümper, S. C. (Hrsg.) (2007): „European Hydrogen Infrastructure Atlas“ and „Industrial Excess Hydrogen Analysis“ – PART II: Industrial surplus hydrogen and markets and production. Paris, Oldenburg, März 2007.

MicrobEnergy GmbH, Schmack Biogas GmbH, Schmack Carbotech GmbH, Viessmann Group (2015): Power-to-Gas-Pilotanlage Allendorf, Allendorf (Eder). 2014. Quelle: <http://www.powertogas.info/power-to-gas/pilotprojekte-im-ueberblick/pilotanlage-allendorf/> (Abruf am 30.07.2018).

Mitzel, J./Friedrich, K. A. (2016): Wasserstoff und Brennstoffzellen. In: BWK, Bd. 68 Nr. 5, S. 126–135.

NTNU – Technisch-Naturwissenschaftliche Universität Norwegens, IFE, SINTEF (2009): Recommendations to the Norwegian Government for the implementation of hydrogen as transportation fuel in Norway. NorWays. Care Message and Executive Summary. Mai 2009.

pv magazine (2017): Eneco und Mitsubishi bauen 48-Megawatt-Batteriespeicher in Deutschland. April 2017. Quelle: <https://www.pv-magazine.de/2017/04/06/eneco-und-mitsubishi-bauen-48-megawatt-batteriespeicher-in-deutschland/> (Abruf am 30.07.2018).

Reuters (2017): EU invites industry chiefs to plug into battery revolution. Oktober 2017. Quelle: <https://www.reuters.com/article/us-eu-autos-electric/eu-invites-industry-chiefs-to-plug-into-battery-revolution-idUSKCN1C81PQ> (Abruf am 6.10.2017).

Rieger, M. (2017): Verbesserungs- und Entwicklungsmöglichkeiten von Wasserelektrolyse-Stacks sowie Identifikation zukünftiger Anwendungsfelder von Elektrolysesystemen. Februar 2017.

RWTH Aachen, E.ON Energy Research Center, Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft (2016): Energie von heute für morgen – M5BAT Batterie-Speicher. Quelle: <http://m5bat.de/de-de/Projekt/Projektbeschreibung> (Abruf am 30.07.2018).

Spath, D./Bauer, W./Voigt, S./Borrmann, D./Herrmann, F./Brand, M./Rally, P./Rothfuss, F./Sachs, C./Friedrich, H. E./Frieske, B./Propfe, B./Redelbach, M./Schmid, S./Dispan, J. (2012): ELAB – Wirkungsanalyse alternativer Antriebskonzepte am Beispiel einer idealtypischen Antriebsstrangproduktion. Stuttgart/Frankfurt/Düsseldorf.

Sterner, M./Eckert, F./Thema, M./Bauer, F. (2015): Der positive Beitrag dezentraler Batteriespeicher für eine stabile Stromversorgung. Forschungsstelle Energienetze und Energiespeicher (FENES) OTH Regensburg, Kurzstudie im Auftrag von BEE e. V. und Hannover Messe. Regensburg/Berlin/Hannover.

Store & Go (ohne Jahr) – Shaping the energy supply for the future. Quelle: <https://www.storeandgo.info/about-the-project> (Abruf am 30.07.2018).

Thüga-Gruppe (2014): Strom zu Gas – Integration erneuerbaren Stroms in die kommunale Gasinfrastruktur. Energiespeicher der Zukunft. September 2014.

VDMA – Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (2015): Batteriezellenproduktion in Deutschland – Chancen für den Maschinen- und Anlagenbau. S. 10

VDMA – Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (2017): Brennstoffzellen-Konjunktur 2017 im Hoch. Frankfurt a. M., April 2017. Quelle <https://www.vdma.org/v2viewer/-/v2article/render/16747148> (Abruf am 30.07.2018).

VGR – Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung des Bundes (2014): Input-Output-Rechnung (Revision 2014, Stand August 2017). Fachserie 18 Reihe 2. Wiesbaden.

Weckbrodt, H. (2015): Größter Batteriespeicher Sachsens in Dresden gestartet. März 2015. Quelle: <http://oiger.de/2015/03/17/groesster-batteriespeicher-sachsens-in-dresden-gestartet/68204> (Abruf am 30.07.2018).

WEMAG (2017): WEMAG Batteriespeicher. Quelle: <https://www.wemag.com/mission/oekostrategie/batteriespeicher> (Abruf am 30.07.2018).

ANHANG

Anhang 1: Methodik der Szenarienauswahl

Die Inhalte von 34 Studien wurden detailliert analysiert und anhand von für die weitere Untersuchung relevanten Kriterien bewertet (siehe Tabelle 7). Dabei wurden in einem ersten Bewertungsschritt zunächst folgende Kriterien herangezogen:

- Studie nicht vor 2012 erstellt
- Untersuchungsregion umfasst mindestens Deutschland
- Zeithorizont mindestens 2030
- quantitative Angabe zum Strombedarf
- quantitative Angabe zu Anteilen Erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung
- quantitative Angabe zum Speicherbedarf (für das Stromnetz)

Das Ergebnis dieses ersten Analyseschritts zeigt Tabelle 7.

Tabelle 7

Analyse der Originalszenarien nach obligatorischen Kriterien

Quelle	Jahr	Zeithorizont		Region	Strombedarf	EE-Anteil	Speicherbedarf
		2030	2050				
Ecke et al. 2017	2017		X	DE	X	X	X
Matthes et al. 2017	2017	X	X	DE	X	X	X
Elsland et al. 2016	2016	X		DE			X
Nitsch 2016	2016	X	X	DE	X	X	
Bauknecht et al. 2016	2016	X	X	DE	X	X	X
Beck 2016	2016	X		DE			(X)
Pellinger et al. 2016	2016	X		DE, A		X	X (P-t-G)
Heinemann et al. 2016	2016	X	X	DE	X	X	
VDE 2015	2015			DE		X	

Quelle	Jahr	Zeithorizont		Region	Strom- bedarf	EE-Anteil	Speicher- bedarf
		2030	2050				
Elsner, Fischedick, Sauer 2015	2015		X	DE			
Repenning et al. 2015	2015		X	DE		X	
FCH JU 2015	2015	X	X	EU			X
Sterner et al. 2015b	2015	X	X	DE			
Nitsch 2015	2015	X	X	DE		X	
AGORA 2014	2014	X		DE, EU		X	X
Dickens et al. 2014	2014	X		DE, Welt			X
Pape et al. 2014	2014		X	DE, EU		X	X
Hacker et al. 2014	2014	X	X	DE			X (Verkehr)
Kempener, Vivero 2015	2014	X		Welt		X	X
Nitsch 2014	2014	X	X	DE		X	
Repenning et al. 2014	2014	X	X	DE	X	X	
Plötz et al. 2014	2014			DE			
Schlesinger et al. 2014	2014	X	X	DE	X	X	X
Gerbert et al. 2013	2013	X	X	DE			
Beyer, Bretschneider 2013	2013	X	X	DE		(X)	X
Barth, Kneiske, Raab, 2013	2013					X	X
Schill 2013	2013		X	DE		X	X
Henning, Palzer 2013	2013		X	DE		X	
UBA 2013	2013	X	X	DE	X	X	
Ueherdt, Luderer, Hansen 2013	2013	X	X	DE		X	
Hartmann et al. 2012	2012	X		DE			(X)
VDE 2012	2012		X	DE			X
dena 2012	2012	X		DE		X	X

Anmerkung: Die sechs ausgewählten Originalszenarien sind farbig hervorgehoben.

Quelle: eigene Darstellung Fraunhofer IFAM

Vier der 36 Studien weisen Originalszenarien auf, die die obligatorischen Kriterien erfüllen. Szenarien aus zwei weiteren Studien wurden zusätzlich in die Untersuchung einbezogen, da sie von einem sehr hohen Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung ausgehen. Hierdurch besteht auch ein höherer Speicherbedarf. Die sechs ausgewählten Originalszenarien sind in [Tabelle 7](#) grau unterlegt.

Darüber hinaus wurde in einem zweiten Schritt anhand optionaler Kriterien untersucht, ob die Szenarien auch differenzierte Angaben zur Art des Speicherbedarfs, zum Einsatz von Power-to-Gas (P-t-G) und Power-to-Liquid-Anlagen (P-t-L-Anlagen) sowie zur Nutzung von Speichern in der Industrie enthalten.

Bezieht man die optionalen Kriterien mit ein, so verbleiben vier Szenarien, die in unterschiedlichem Umfang Informationen zu Art und Umfang der Speichernutzung enthalten (siehe [Tabelle 8](#), grau unterlegte Szenarien). Diese Informationen wurden genauer ausgewertet. Das Ergebnis zeigt [Tabelle 8](#). Dabei wurde deutlich, dass in (Matthes et al. 2017) zwar allgemeine Angaben zu finden waren, aber keine spezifischen Informationen zur Art der Speicher.

Tabelle 8

Auswertung weiterer Originalszenarien – Aufteilung Speicherbedarf

Autor	Kurzzeit-speicher	Langzeit-speicher	E-Mob	Power-to-Gas	Speicherbedarf	Industriespeicher
Schlesinger et al. 2014			X			
Gerbert et al. 2013	X	X	X			
Bauknecht et al. 2016			X		X	
Matthes et al. 2017						
Nitsch 2016			X	X	X	X
Heinemann et al. 2016	X	X				

Anmerkung: Farbig hinterlegt sind die Szenarien, die Informationen zu Art und Umfang der Speichernutzung enthalten.
Quelle: eigene Darstellung Fraunhofer IFAM

Die ausgewählten Originalszenarien repräsentieren eine große Bandbreite der oben genannten, für die Untersuchung wichtigen Parameter. So liegt für das Untersuchungsjahr 2030 die Bandbreite beim Strombedarf zwischen 450 TWh und über 700 TWh pro Jahr. Beim Anteil der erneuerbaren Energien ist der Unterschied mit 31 bis 80 Prozent noch deutlich größer, ebenso hinsichtlich des zusätzlichen Speicherbedarfs im Stromnetz (1,3 bis 13 GW) und der Annahmen zum Strombedarf im Verkehr (3 bis 64 TWh). Bezüglich der Elektromobilität sind oft auch Angaben zur Zahl der Elektromobile zu finden. Am häufigsten wird dabei die Zahl von 6 Millionen Elektromobilen in 2030 genannt. In weiteren Studien finden sich quantitative Angaben zum Einsatz von Elektrolyse und der Nutzung von Wasserstoff und Methan. Für das Untersuchungsjahr 2030 findet man die folgenden Bandbreiten:

- Nutzung Wasserstoff im Verkehr 0–60 TWh
- Nutzung Methan im Verkehr 25–31 TWh
- Nutzung Methan in privaten Haushalten, Gewerbe/Handel/
Dienstleistungen, Industrie 0–37 TWh
- Installierte Elektrolyseleistung 0–70 GW

Für die Festlegung der Analyseszenarien wurden drei der ausgewählten Originalszenarien herangezogen: „Trendstudie 2030+“ (Gerbert et al. 2013), „Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose“ (Schlesinger et al. 2014) und „Die Energiewende nach COP 21“ (Nitsch 2016). Darüber hinaus gingen Daten zum Einsatz von Elektrolyseuren aus (Sternner et al. 2015b) und von Batterien im Stromnetz in 2030 aus (Pape et al. 2014, Seite 88) bzw. für 2050 aus (FCH JU 2015, S. 28) ein. Die Angaben für die mobilen Brennstoffzellen bzw. Methanisierer in den Szenarien 2, 3 und 5 wurden auf der Basis der Annahme abgeleitet, dass der mittels Elektrolyse erzeugte Wasserstoff von diesen Technologien vollständig genutzt wird. Außerdem war es für die Abschätzung der Investitions- und Beschäftigungseffekte erforderlich, die Angaben aus den Studien teils in solche Größen umzurechnen, für die in der Literatur Kostenangaben vorliegen. Das Ergebnis der Definition der Analyseszenarien ist in [Tabelle 9](#) zusammengefasst, die mit [Tabelle 5](#) im Hauptteil der Studie weitgehend identisch ist.

Die Szenarien 1 bis 4 haben 2030 als Zeithorizont. Szenario 5 und 6 dienen dazu, die Perspektive bis 2050 aufzuzeigen.

Das *Szenario 1*, das auf dem Zielszenario der Studie von Geber et al. (2013) basiert, zeichnet sich aus durch

- einen geringen Anteil erneuerbarer Energie an der Stromerzeugung sowie
- einen geringen zusätzlichen Speicherbedarf im Stromnetz.

Tabelle 9

Die Analyseszenarien

Szenario	1	2	3	4	5	6
Zeithorizont	2030			2050		
Interpretation	wenig Speicher	mittleres Szenario	viel EE und Elektrolyse	viel EE und Batterie	viel EE und Elektrolyse	viel EE und viele Batterien
Strombedarf (TWh/a)	450	510	730	730	1.120	1.120
Anteil EE-Strom (%)	36%	61%	77%	77%	99%	99%
Batterien						
• stationär	3 GW	2 GW	–	13,2 GW	–	68 GW
• mobil	6 Mio. E-Fahrzeuge	2,85 Mio. E-Fahrzeuge	6 Mio. E-Fahrzeuge	6 Mio. E-Fahrzeuge	18 Mio. E-Fahrzeuge	18 Mio. E-Fahrzeuge
Elektrolyse						
• H2 mobil	–	11,4 GW _{el}	insgesamt	–	insgesamt	–
• H2 Sonstiges	–	2,1 GW _{el}	54 GW _{el}	–	134 GW _{el}	–
Brennstoffzelle	–	–	15,5 Mio. BZ-Fahrzeuge	–	31 Mio. BZ-Fahrzeuge	–
Methanisierer	–	25,3 TWh	–	–	–	–

Quelle: eigene Darstellung Fraunhofer IFAM

Szenario 2 geht von den Ansätzen des Zielszenarios von Schlesinger et al. (2014) zum Strombedarf und zum Anteil erneuerbarer Energien an der Strombereitstellung aus und beinhaltet eine Mischung verschiedener Speichertechnologien:

- Hinsichtlich der Mobilität wird dabei angesetzt, dass es eine geringere Zahl von batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen als in Szenario 1 gibt.
- Mittels Elektrolyse wird Wasserstoff erzeugt.
- Dieser wird überwiegend in Methan umgewandelt und in gasbetriebenen Fahrzeugen eingesetzt.
- Für einen geringeren Anteil des Wasserstoffs wird angenommen, dass er in sonstigen Anwendungen zum Einsatz kommt (z.B. Beimischung Erdgas, chemische Industrie).

Szenario 3 basiert auf dem Szenario „Klima 2040“ von Nitsch (2016) und zeichnet sich durch hohen Strombedarf und einen hohen Anteil erneuerbarer Energien an der Strombereitstellung aus.

- Mittels Elektrolyse wird Wasserstoff erzeugt.
- Dieser wird zur Hälfte in 15,5 Millionen Brennstoffzellenfahrzeugen genutzt. Auch hier wird wie in [Kapitel 2](#) vereinfachend angesetzt, dass es sich dabei um Brennstoffzellen-PKW handelt.
- Der Rest des Wasserstoffs kommt in anderen, nicht genauer spezifizierten Anwendungen zum Einsatz.

Auch *Szenario 4* basiert auf den Ansätzen von Nitsch (2016) zum Strombedarf und dem Anteil erneuerbarer Energien. Allerdings werden hier folgende Annahmen getroffen:

- Es gibt 6 Millionen E-Fahrzeuge.
- Eine große Zahl stationärer Speicher mit einer Leistung von insgesamt 13,2 GW kommt zum Einsatz. Dies entspricht dem Ansatz von Pape et al. (2014, S. 88).

Die Szenarien 5 und 6 mit dem Zeithorizont 2050 haben ebenfalls das Szenario Klima 2040 von Nitsch (2016) als Basis.

Im *Szenario 5* werden zusätzlich die Ergebnisse von Sterner et al. (2015b) zur Leistung von Elektrolyseuren berücksichtigt, um den Effekt einer hohen Elektrolyseurleistung bei (nahezu) 100 Prozent Strom aus erneuerbaren Energien abzubilden. In diesem Szenario wird zudem davon ausgegangen, dass

- mittels Elektrolyse Wasserstoff erzeugt wird,

- der Wasserstoff – wie bei Szenario 3 – zur Hälfte in Brennstoffzellenfahrzeugen genutzt wird. Der Rest wird in anderen Anwendungen eingesetzt.

Analyseszenario 6 repräsentiert ein System mit (nahezu) 100 Prozent Strom aus erneuerbaren Energien und einer hohen Anzahl von stationären und mobilen Batteriespeichern. Hierfür wurden folgende Ansätze gewählt:

- Die Zahl der Elektromobile wurde aus dem Strombedarf für Elektromobilität von Nitsch (2016) abgeleitet.
- Der Ansatz für die Leistung stationärer Speicher wurde FCH JU (2015) entnommen.

Anhang 2: Methodik der erweiterten Input-Output-Analyse

Input-Output-Tabellen bilden eine Volkswirtschaft ab, indem sie sämtliche Güterströme, die zwischen den einzelnen Sektoren einer Volkswirtschaft fließen, sowie Importe und Exporte darstellen. Sie zeigen somit die wechselseitigen wirtschaftlichen Beziehungen zwischen den Akteuren einer offenen Volkswirtschaft. Dies geschieht in einer hochaggregierten Form, indem eine Vielzahl einzelner Wirtschaftseinheiten zu möglichst homogenen Sektoren zusammengefasst wird (siehe Bleses 2007). Grundlage für die Berechnungen in der vorliegenden Untersuchung ist der Stand von 2013, der die Verflechtung der deutschen Wirtschaft auf der Ebene von 72 Wirtschaftszweigen abbildet.

Die Anwendung der Input-Output-Analyse, die in Kleemann et al. 1999 im Detail beschrieben ist, erfolgt in der vorliegenden Untersuchung einerseits für Investitionen in Produktionsanlagen und andererseits für die Produktion von Batterien oder anderen Speichertechnologien wie z.B. Elektrolyseuren.

Im ersten Rechenschritt wird der sogenannte Nachfragevektor bestimmt; das ist die Verteilung der Nachfrage auf die Wirtschaftszweige. Batterien fallen z.B. in der amtlichen Statistik unter „Elektrische Ausrüstungen“, Elektrolyseure werden im Bereich „Maschinenbau“ hergestellt, genau wie der Maschinenpark für eine Batteriefabrik. Beim Aufbau einer Produktionsanlage wirken viele verschiedene Wirtschaftszweige mit – vom Baugewerbe über die Bauplanung und -genehmigung bis zur Herstellung der elektrischen und maschinellen Ausrüstungsanlagen. Für die Aufteilung in der Zeile „Produktionsanlagen“ der [Tabelle 10](#) wurden plausible Annahmen getroffen, da hierzu keine verlässlichen Daten vorlagen.

Tabelle 10

Bestimmung der Nachfragevektoren

Produktion von	Volumen netto in Mio. €	Beteiligte Wirtschaftszweige						
		elektr. Aus-rüstungen	Maschinen-bau	Hochbau	Tiefbau	Ausbau-gewerbe	Bauplanung/-leitung	Öffentliche Verwaltung
Batterien	100	100	0	0	0	0	0	0
Elektrolyseuren	100	0	100	0	0	0	0	0
Produktions-anlagen	100	20	20	20	5	20	10	5

Quelle: eigene Darstellung Fraunhofer IFAM

Im zweiten Schritt werden mit Hilfe der Input-Output-Tabelle, die die wirtschaftlichen Verknüpfungen für das Jahr 2013 beinhaltet (VGR 2016), und unter Berücksichtigung der zwischen 2013 und 2016 erfolgten Produktivitätsfortschritte die spezifischen Beschäftigungseffekte für 2016 ermittelt, die Aufträge im Umfang von 100 Millionen Euro als Netto-Investition (ohne Mehrwertsteuer) für neue Produktionsanlagen oder für Energiespeicher auslösen.

Tabelle 11 stellt die Beschäftigungseffekte bezogen auf 100 Millionen Euro Nettoumsatz einmal für das Jahr 2016 und dann für das Jahr 2024 dar. 2016 ist das letzte Jahr mit statistischen Aussagen zur Arbeitsproduktivität in den einzelnen Wirtschaftszweigen. 2024 wird als Beispielsjahr gewählt, weil es in der Mitte zwischen heute (2017) und dem Bezugszeitpunkt unserer Studie (2030 bzw. 2050) liegt. Zur Abschätzung der branchenspezifischen Entwicklung der Arbeitsproduktivität zwischen 2013 (Jahr der Input-Output-Rechnung) und 2024 wird mangels verfügbarer Daten dieselbe Entwicklung wie im letzten bekannten Elf-Jahres-Zeitraum zwischen 2005 und 2016 angenommen (= jährliche Steigerung um 2 Prozent).

In Tabelle 11 ist deutlich zu erkennen, dass ein Einsatz der Mittel für den Bau von Elektrolyseuren im Jahr 2016 mit rund 940 Personenjahren (PJ) je 100 Millionen Euro höhere Beschäftigungseffekte auslöst als derselbe Umsatz bei der Herstellung von Batterien im Wirtschaftszweig „Elektrische Ausrüs-

tungen“. Das lässt sich durch die höheren Stückzahlen und den höheren Automatisierungsgrad bei der Herstellung von Batterien im Vergleich zu Elektrolyseuren erklären und wird sich aller Voraussicht nach auch mittelfristig nicht ändern.

Der Aufbau einer Produktionsanlage mit allen Planungs- und Genehmigungsprozessen ist noch wesentlich personalintensiver. Eine erste grobe Schätzung liefert je 100 Millionen Euro Nettoinvestitionen im Jahr 2016 einen Beschäftigungseffekt von über 1.100 PJ.

Tabelle 11

Beschäftigungseffekte in Personenjahren je 100 Mio. Euro Nettoumsatz

CPA	Produktionsbereich	100 Mio. € Nettoumsatz im ... Gewerbe führen zu Beschäftigungseffekten von ... PJ					
		elektrische Ausrüstungen		Maschinen- bau		Bau von Produktions- stätten	
		2016	2024	2016	2024	2016	2024
01	Erzeugnisse der Landwirtschaft, Jagd und Dienstleistungen	0,2	0,1	0,2	0,1	0,5	0,3
02	Forstwirtschaftliche Erzeugnisse und Dienstleistungen	0,2	0,1	0,3	0,2	1,0	0,6
03	Fische, Fischerei- und Aquakulturerzeugnisse	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
05	Kohle	0,5	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4
06	Erdöl und Erdgas	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
07–09	Erze, Steine u. Erden, sonst. Bergbauerzeugn. u. Dienstleistg.	0,2	0,2	0,3	0,2	3,7	3,1
10–12	Nahrungs- und Futtermittel, Getränke, Tabakerzeugnisse	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	0,4
13–15	Textilien, Bekleidung, Leder- und Lederwaren	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
16	Holz, Holz-, Flecht-, Korb- und Korkwaren (ohne Möbel)	0,8	0,6	1,4	1,2	4,3	3,6

17	Papier, Pappe und Waren daraus	2,8	2,3	1,0	0,9	1,2	1,0
18	Druckereileistungen, bespielte Ton-, Bild- und Datenträger	2,8	2,3	2,4	2,0	2,5	2,1
19	Kokerei- und Mineralölerzeugnisse	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
20	Chemische Erzeugnisse	0,6	0,5	1,1	1,0	1,3	1,1
21	Pharmazeutische Erzeugnisse	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
22	Gummi- und Kunststoffwaren	9,1	7,6	11,2	9,3	10,8	9,0
23.1	Glas und Glaswaren	0,9	0,7	0,4	0,4	0,7	0,6
23.2- 23.9	Keramik, bearbeitete Steine und Erden	1,1	0,9	1,1	0,9	18,6	15,5
24.1- 24.3	Roheisen, Stahl, Erzeugn. der ersten Bearbeitung von Eisen und Stahl	3,3	2,7	5,5	4,6	2,6	2,2
24.4	NE-Metalle und Halbzeug daraus	3,0	2,5	1,1	0,9	1,0	0,8
24.5	Gießereierzeugnisse	4,5	3,7	15,9	13,3	4,4	3,6
25	Metallerzeugnisse	23,9	19,9	54,3	45,3	26,7	22,3
26	DV-Geräte, elektron. u. optische Erzeugnisse	6,2	5,2	1,4	1,2	1,8	1,5
27	Elektrische Ausrüstungen	476,1	397,1	7,7	6,5	100,9	84,2
28	Maschinen	2,3	1,9	487,5	406,6	99,6	83,1
29	Kraftwagen und Kraftwagenteile	0,1	0,1	2,4	2,0	0,5	0,5
30	Sonstige Fahrzeuge	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3
31-32	Herstellung von Möbeln und sonstigen Waren	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1
33	Reparatur, Instandh. u. Installation v. Maschinen u. Ausrüstungen	8,2	6,8	13,7	11,5	6,1	5,1
35.1, 35.3	Elektr. Strom, Dienstleistg. der Elektriz., Wärme- und Kälteversorg.	2,1	1,7	2,2	1,9	1,9	1,6
35.2	Industriell erzeugte Gase, Dienstleistungen der Gasversorgung	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4

36	Wasser, Dienstleistungen der Wasserversorgung	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
37–39	Dienstleistg. d. Abwasser-, Abfallentsorg. u. Rückgewinnung	2,2	1,8	2,4	2,0	2,3	1,9
41	Hochbauarbeiten	0,2	0,1	0,2	0,1	117,2	88,5
42	Tiefbauarbeiten	0,3	0,2	0,3	0,3	30,3	22,9
43	Vorb. Baustellen-, Bauinstallations- und sonstige Ausbauarbeiten	8,8	6,6	9,3	7,1	207,2	156,5
45	Handelsleistungen mit Kfz, Instandhaltung und Reparatur an Kfz	4,6	4,2	12,2	11,2	7,4	6,8
46	Großhandelsleistungen (ohne Handelsleistungen mit Kfz)	41,0	37,7	36,2	33,3	41,3	38,0
47	Einzelhandelsleistungen (ohne Handelsl. mit Kfz)	32,5	29,9	16,3	15,0	24,2	22,3
49	Landverkehrs- und Transportleistungen in Rohrfernleitungen	10,3	9,5	13,3	12,2	11,6	10,7
50	Schifffahrtsleistungen	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
51	Luftfahrtleistungen	0,6	0,5	0,8	0,7	0,5	0,4
52	Lagereileistungen, sonstige Dienstl. für den Verkehr	8,7	8,0	15,0	13,8	10,1	9,3
53	Post-, Kurier- und Expressdienstleistungen	19,2	17,7	16,9	15,5	11,1	10,2
55–56	Beherbergungs- und Gastronomieleistungen	1,2	1,1	1,9	1,7	2,0	1,9
58	Dienstleistungen des Verlagswesens	2,4	2,3	2,0	1,9	3,2	3,1
59–60	Dienstleistg. v. audiovisuell. Medien, Musikverlag. u. RF-Veranstalten	0,4	0,4	0,3	0,3	0,4	0,3
61	Telekommunikationsdienstleistungen	1,1	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1
62–63	IT- und Informationsdienstleistungen	11,6	11,3	12,8	12,4	10,0	9,7
64	Finanzdienstleistungen	6,1	5,9	6,5	6,3	9,8	9,6

65	Dienstl. von Versicherungen und Pensionskassen	0,8	0,8	1,0	0,9	1,3	1,2
66	Mit Finanz- und Versicherungsdienstleistg. verbundene Dienstleistg.	2,6	2,6	1,9	1,9	2,8	2,8
68	Dienstl. des Grundstücks- und Wohnungswesens	2,8	2,7	3,3	3,2	9,2	9,0
69–70	Dienstl. der Rechts-, Steuer- und Unternehmensberatung	33,1	32,3	41,1	40,1	40,7	39,7
71	Dienstleistg. v. Architektur- u. Ing.-Büros techn., physik. u. chem. Untersuchung	27,7	27,1	15,8	15,4	121,6	118,6
72	Forschungs- und Entwicklungsleistungen	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
73	Werbe- und Marktforschungsleistungen	4,8	4,7	3,3	3,3	3,0	2,9
74–75	Sonst. freiberuf., wiss., techn. u. veterinärmedizinische Dienstleistg.	3,9	3,8	3,7	3,6	3,7	3,6
77	Dienstl. der Vermietung von beweglichen Sachen	2,1	2,0	2,0	1,9	4,9	4,8
78	Dienstl. der Vermittl. u. Überlassung v. Arbeitskräften	32,8	32,0	49,7	48,4	25,4	24,8
79	Dienstleistg. v. Reisebüros, -veranstaltern u. sonst. Reservierungen	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5
80–82	Wach-, Sicherheitsdienstlg., wirtschaftl. Dienstleistg. a. n. g.	34,7	33,9	37,0	36,1	40,2	39,2
84.1–84.2	Dienstl. der öff. Verwaltung und der Verteidigung	10,1	8,7	7,7	6,6	64,8	55,6
84.3	Dienstleistungen der Sozialversicherung	0,1	0,1	0,1	0,1	0,8	0,7
85	Erziehungs- und Unterrichtsdienstleistungen	4,6	3,9	3,0	2,6	3,2	2,7
86	Dienstleistungen des Gesundheitswesens	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
87–88	Dienstleistungen von Heimen und des Sozialwesens	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

90–92	Dienstl. der Kunst, der Kultur und des Glücksspiels	0,3	0,3	0,3	0,3	0,5	0,5
93	Dienstl. des Sports, der Unterhaltung u. der Erholung	0,2	0,2	0,3	0,2	1,1	0,9
94	Dienstleistg. d. Interessenvertr., kirchl. u. sonst. Vereinigungen	3,2	2,7	2,6	2,3	4,9	4,2
95	Reparaturarbeiten an DV-Geräten und Gebrauchsgütern	4,3	3,7	1,2	1,1	1,9	1,6
96	Sonstige überwiegend persönliche Dienstleistungen	2,5	2,1	2,2	1,9	2,6	2,2
97–98	Waren und Dienstleistungen privater Haushalte ohne ausgeprägten Schwerpunkt	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Summe über alle Produktionsbereiche		873	761	938	817	1116	953

Anmerkung: CPA = Statistische Güterklassifikation in Verbindung mit den Wirtschaftszweigen in der Europäischen Gemeinschaft

Quelle: eigene Darstellung Fraunhofer IFAM

Die Entwicklung der Arbeitsproduktivität, die in den einzelnen Branchen unterschiedlich verlief, wurde auf Basis neuester Daten des Statistischen Bundesamtes ermittelt (Destatis 2017a und Destatis 2017b) und in [Tabelle 12](#) dargestellt. Die Tabelle zeigt für das Baugewerbe eine starke Steigerung der Arbeitsproduktivität um 55,5 Prozent zwischen 2005 und 2016. Im Produzierenden Gewerbe ohne das Baugewerbe lag die Produktivitätsentwicklung im selben Zeitraum dagegen bei 31,0 Prozent. Dies bedeutet, dass die von 100 Millionen Euro Umsatz ausgelösten Beschäftigungseffekte, gemessen in Vollzeitstellen = Personenjahre, im Baugewerbe zwischen 2005 und 2016 wesentlich stärker gefallen sind als im Verarbeitenden Gewerbe. Im Bereich des Dienstleistungsgewerbes fallen die Veränderungen der Arbeitsproduktivität zwischen 2005 und 2016 noch schwächer aus als für das Produzierende Gewerbe ohne das Baugewerbe. Dabei werden mögliche Unterschiede bei der durchschnittlichen Jahres-Arbeitszeit in den verschiedenen Branchen nicht herausgerechnet. Unterschiede bzw. Veränderungen in der Jahres-Arbeitszeit spiegeln sich aber in der Arbeitsproduktivität wider. So können z.B. die Einführung von Kurzarbeit, der Abbau von Überstunden oder ein höherer Anteil von Teilzeitbeschäftigten zu einem Rückgang des Nettoumsatzes je Beschäftigten und somit auch in der Arbeitsproduktivität führen. Anderer-

Tabelle 12

Branchenspezifische Entwicklung der Arbeitsproduktivität 2005–2016

Arbeitsproduktivität = Bruttowertschöpfung je Erwerbstätigen in €/a

		2005	2010	2013	2015	2016
Land- u. Forstwirtschaft, Fischerei	EUR	23.650	25.265	37.449	27.239	29.191
Produzierendes Gewerbe ohne Baugewerbe	EUR	68.022	77.928	81.549	87.481	89.130
Baugewerbe	EUR	35.261	42.833	46.681	51.340	54.824
Handel, Verkehr, Gastgewerbe	EUR	37.254	39.098	40.508	43.645	44.347
Information, Kommunikation, Finanzierung, Grundstücks- und Wohnungswesen und Unternehmensdienstleister	EUR	92.029	90.282	94.370	97.762	99.207
Öffentliche und sonstige private Dienstl.	EUR	36.957	39.807	43.020	45.208	46.388
Land- u. Forstwirtschaft, Fischerei	%	100,0	106,8	158,3	115,2	123,4
Produzierendes Gewerbe ohne Baugewerbe	%	100,0	114,6	119,9	128,6	131,0
Baugewerbe	%	100,0	121,5	132,4	145,6	155,5
Handel, Verkehr, Gastgewerbe	%	100,0	105,0	108,7	117,2	119,0
Information, Kommunikation, Finanzierung, Grundstücks- und Wohnungswesen und Unternehmensdienstleister	%	100,0	98,1	102,5	106,2	107,8
Öffentliche und sonstige private Dienstl.	%	100,0	107,7	116,4	122,3	125,5

Quelle: eigene Berechnungen auf der Basis von Destatis 2017a und Destatis 2017b

seits kann durch organisatorische Maßnahmen wie z.B. einen effizienteren Personaleinsatz eine Erhöhung des Nettoumsatzes je Beschäftigten bzw. der Arbeitsproduktivität erreicht werden.

Anhang 3: Daten für die erweiterte Input-Output-Analyse

Für Abschätzung der Beschäftigungseffekte der verschiedenen Szenarien werden einerseits als Eingangsdaten die Mengengerüste benötigt, die im Wesentlichen durch die Analyseszenarien vorgegeben sind. Andererseits gehen auch technologiespezifische Daten sowie weitere ökonomische Annahmen ein. Die technologiespezifischen Daten sind

- die spezifischen Investitionskosten für die Errichtung der Produktionskapazitäten (= Industrieinvestitionen) und ihre Entwicklung im Betrachtungszeitraum,
- der Zyklus für Reinvestitionen aufgrund von Erneuerung von Produktionsanlagentechnik,
- die spezifischen Kosten der Herstellung der Produkte sowie deren Entwicklung im Betrachtungszeitraum,
- die Kosten der Installation der Batterien,
- die Nutzungsdauern der Anlagen und
- ggf. Kosten für Betrieb und Wartung.

Die Kostenansätze für die Industrieinvestitionen für Fabriken wurden aus Statistiken, Studien und Literatur abgeleitet und im Rahmen von Expertenbefragungen auf Fachmessen und in leitfadengestützten Interviews überprüft. Die Kosten für die Herstellung der Produkte und deren Nutzung wurden anhand der Daten aus Studien und Fachliteratur identifiziert und ebenfalls mit Experten erörtert.

Im Folgenden wird für die vier betrachteten Technologien – Batterien, Elektrolyseure, Brennstoffzellen und Methanisierer – die Herleitung der Daten für die Input-Output-Analyse dargestellt.

Batterien

Die Analyse der Literatur und die Expertengespräche ergaben, dass bis zum Zieljahr 2030 überwiegend Lithium-Ionen-Zellen in Batterien für mobile und stationäre Anwendungen zum Einsatz kommen werden. Andere Batteriekonzepte, die sich noch in der Entwicklung bzw. Erprobung befinden, können langfristig an Bedeutung gewinnen. Allerdings werden sie sich am Markt nur dann durchsetzen, wenn sie hinsichtlich der Eigenschaften und insbesondere bei den Kosten mit Lithium-Ionen-Batterien (Li-Ionen-Batterie) konkurrenzfähig sind. Bei der Kostenabschätzung wurden daher im Folgenden die Kosten der Li-Ionen-Batterie angesetzt.

Bei den Batteriespeichern werden zwei Einsatzgebiete unterschieden: „mobile Batterien“ und „stationäre Batterien“ (siehe auch Kapitel 2). Unter mobilen Batterien versteht man dabei solche, die in Fahrzeugen verbaut sind. Stationäre Batterien können in Privathäusern oder Unternehmen zur Erhöhung des Eigenverbrauchs von Strom aus Photovoltaikanlagen eingesetzt werden oder in größeren Anlagen der Energiewirtschaft der Stabilisierung des Stromnetzes dienen.¹³

Bei den Investitionen für die Herstellung der Produktionsanlagen (= Industrieinvestitionen) muss keine Differenzierung erfolgen, da sich die Produktionsanlagen für die Herstellung mobiler und stationärer Batterien nicht unterscheiden. Auf Basis der Literaturangaben zu realisierten bzw. geplanten Produktionsanlagen und Expertengesprächen ergaben sich Investitionskosten für Batteriefabriken (inkl. Zellherstellung) zu 125 Euro je 1 Million GWh jährliche Produktionskapazität. Allerdings wird davon ausgegangen, dass durch den technischen Fortschritt eine Reduktion der Investitionskosten für Produktionsanlagen von 2 Prozent pro Jahr erreicht wird. Diese Kostenreduktion wird auch bei den Produktionsanlagen für die anderen Speichertechnologien angenommen.

Bei den anderen Kostenkomponenten der Batterien sowie hinsichtlich der Lebensdauern müssen jedoch unterschiedliche Annahmen für die mobile und die stationäre Anwendung getroffen werden.

Mobile Batterien

Für die mobilen Batterien wird von folgenden Annahmen ausgegangen:

- Es sind nur die Herstellungskosten der Batterie zu berücksichtigen.
- Der Einbau der Batterien in das Fahrzeug ist Teil der Montage des Fahrzeugs und führt nicht zu zusätzlichen Beschäftigungseffekten. Daher werden keine Installationskosten berücksichtigt.
- Die Batterien sind wartungsfrei und es fallen keine Kosten für ihren Betrieb im Fahrzeug an.
- Die Nutzungsdauer der Batterie entspricht bis zum Zieljahr 2030 der heute üblichen Garanzzeit von acht Jahren (BMW 2017, Opel 2017, Nissan 2017). Ab 2030 werden Batterien durch Weiterentwicklung eine Lebensdauer von zehn Jahren haben.

14 In Schwarmkonfigurationen zusammengefasst können auch kleine Speicher Netzdienstleistungen erbringen.

Als Herstellungskosten der Li-Ionen-Batterien werden die Angaben von Schmidt et al. (2017) herangezogen. In dieser Arbeit wird die zukünftige Kostenentwicklung auf Basis der Auswertung einer großen Zahl von Studien abgeleitet. Dabei wird auch nach verschiedenen Anwendungen differenziert. Für mobile Batterien ergeben sich dabei die folgenden Herstellungskosten:

- 2018: 255 €/kWh Speicherkapazität
- 2030: 102 €/kWh Speicherkapazität
- 2050: 51 €/kWh Speicherkapazität

Stationäre Batterien

Bei stationären Batterien werden folgende Kosten berücksichtigt:

- Herstellungskosten des Batteriesystems inkl. Wechselrichter und Kommissionierung,
- Installationskosten.

Darüber hinaus werden folgende Annahmen getroffen:

- Stationäre Batterien sind wartungsfrei.
- In der Regel wird der Betrieb größerer Speicher in der Industrie oder bei Energieversorgern durch bestehende Leitzentralen überwacht und es entsteht kein zusätzlicher Personalbedarf für den Betrieb. (Dies ergab sich aus den Expertengesprächen.)
- Die Nutzungsdauer stationärer Batterien wird mit 20 Jahren angesetzt (Umwelt BW 2017). Dies ist insbesondere relevant für die Szenarien mit Zieljahr 2050.

Für stationäre Li-Ionen-Batterien werden ebenfalls die Angaben von Schmidt et al. (2017) zugrunde gelegt. Dabei wird in Anlehnung an BSW (2016) von Installationskosten von 20 Prozent ausgegangen. Damit ergeben sich folgende Herstellungskosten (ohne Installationskosten):

- 2018: 625 €/kWh Speicherkapazität
- 2030: 250 €/kWh Speicherkapazität
- 2050: 125 €/kWh Speicherkapazität

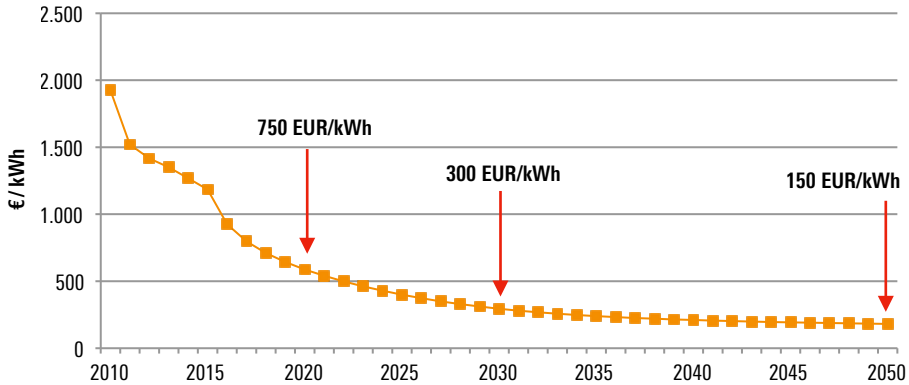
Die prognostizierten Gesamtkosten für stationäre Lithium-Ionen-Batterien sind in **Abbildung 19** dargestellt.

Ein wichtiger Treiber für die Kostenreduktion ist der Mengeneffekt durch den Anstieg der Fertigungskapazitäten. **Abbildung 20** zeigt den geplanten Ausbau der Kapazitäten nach dem Sitz der Unternehmen. Demnach verdrei-

facht sich die weltweite Fertigungskapazität für Lithium-Ionen-Zellen bis 2025 von jährlich rund 52 GWh auf ca. 152 GWh.

Abbildung 19

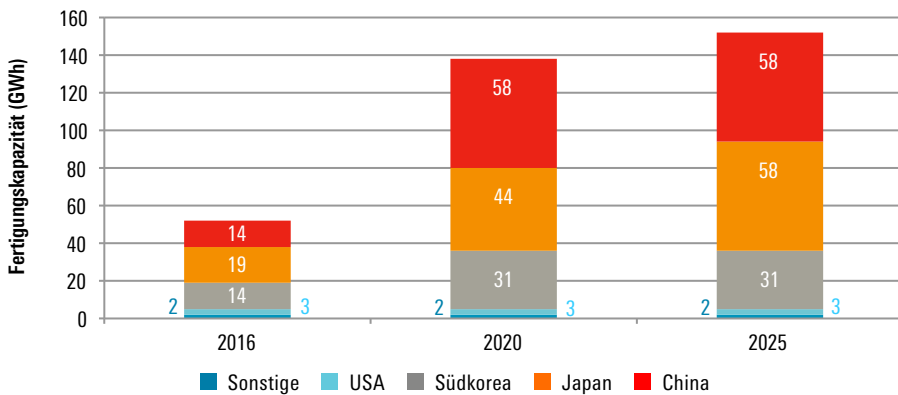
Entwicklung der Kosten (inkl. Installation) von Lithium-Ionen-Batterien



Quelle: Fraunhofer IFAM auf Basis von Schmidt et al. 2017

Abbildung 20

Fertigungskapazität für Lithium-Ionen-Zellen nach Unternehmenssitz 2016 und Planung bis 2025



Quelle: eigene Darstellung Fraunhofer IFAM nach VDMA 2016, S. 17

Elektrolyseure

Bei Elektrolyseuren werden folgende Kostenkomponenten berücksichtigt:

- Investitionen für die Herstellung der Produktionsanlagen (= Industrieinvestitionen)
- Installation der Anlagen
- Kosten für Betrieb und Wartung

Angaben zu den Investitionskosten sind in der Literatur kaum zu finden. Daher werden hier spezifischen Kosten von 167 Euro je GW jährlicher Produktionskapazität angenommen, die sich aus den Angaben von Dupin (2016) ergeben.

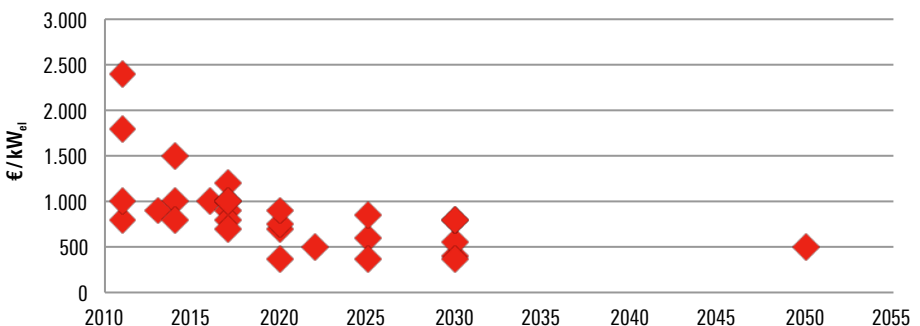
Bei den Kosten der Herstellung von Elektrolyseuren werden die Ergebnisse der Literaturrecherche zu den Kosten alkalischer Elektrolyse herangezogen (siehe Abbildung 21), da diese auch mittelfristig niedriger sein werden als die der PEM-Elektrolyse.

Auf Basis der Rechercheergebnisse wird von folgender Kostenentwicklung für Elektrolyseure ausgegangen:

- 2018: 900 €/kW_{el}
- 2030: 600 €/kW_{el}
- 2050: 500 €/kW_{el}

Abbildung 21

Herstellungskosten Alkalische Elektrolyse



Quelle: Fraunhofer IFAM auf Basis von ADEME 2014, Ausfelder et al. 2015, dena 2013, DVGW 2013, DVGW 2014, E4tech Sàrl/element energy 2014, ELT 2017, ENERTRAG 2017, FCH JU 2015, Nel Hydrogen 2017, NOW 2011, Shell 2017

Für die Installationskosten werden wie bei den Batterien 20 Prozent der Herstellungskosten angesetzt.

Die Literaturangaben zu den Kosten für Wartung und Betrieb von Elektrolyseuren liegen zwischen 2 Prozent und 5 Prozent der Herstellungskosten der Anlagen. (siehe u. a. Bertuccioli et al. 2014 und ee-Consult et al. 2014). In der vorliegenden Studie wird von 3 Prozent der Herstellungskosten der Anlagen ausgegangen.

Die Nutzungsdauer für die (stationär eingesetzten) Elektrolyseure wird mit 20 Jahren angesetzt.

Eine Übersicht über Elektrolyseure, die bereits in Betrieb sind, gibt die [Tabelle 13](#).

Tabelle 13

Übersicht Pilotprojekte Elektrolyseure in Deutschland

Standort	Betreiber	Inbetriebnahme	Elektrolyseleistung
		Jahr	kW _{el}
Allendorf (Eder)	MicroEnergy GmbH, EAM GmbH & Co. KG, IdE – Institut dezentrale Energietechnologien gemeinnützige GmbH, CUBE Engineering GmbH	2013	1.200
Allendorf (Eder)	MicroEnergy GmbH, Schmack Biogas GmbH, Schmack Carbotech GmbH, Viessmann Group	2014	1.100
Arzberg	ZAE (Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V.)	2016	75
Bad Hersfeld	ETOGAS GmbH, Fraunhofer IWES, Hessischen Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt, ZSW Stuttgart	2012	25
Berlin	TOTAL Deutschland GmbH, Linde AG, ENERTRAG AG, McPhy Energy, 2G Energietechnik	2012	500
Cottbus	BTU Cottbus	2015	k. A.
Cottbus	BTU Cottbus	2012	145
Dresden	Sunfire	2011	150

Falkenhagen (Prignitz)	E.ON, SWISSGAS	2013	2.000
Frankfurt/Main	Unternehmen der Thüga Gruppe	2012	300
Grapzow	WIND-projekt GmbH	2012	1.000
Hamburg E.ON Standort Reit- brook	E.ON, Hydrogenics, SolviCore, Fraunhofer IWES, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR)	2015	1.000
Haßfurt	Greenpeace Energy eG, Städtische Betriebe Haßfurt	2016	1.250
Herten	Bundesland Nordrhein-Westfalen, AHG mbH	2011	280
Ibbenbüren	RWE Deutschland AG	2015	150–200
Lemgo	Hochschule Ostwestfalen-Lippe	2016	k. A.
Mainz	Stadtwerke Mainz AG, Hochschule RheinMain, Linde AG, Siemens AG	2013	6.000
Niederaußem	Bayer Technology Services, Bayer Material Science, Bundesministerium für Bildung und Forschung, RWE AG, Siemens AG		300
Prenzlau	ENERTRAG AG	2011	500
Rostock	EXYTRON GmbH	2015	21
Schwandorf	Viessmann Gruppenunternehmen MicrobEnergy GmbH	2012	108
Schwandorf	Zweckverband Verbandskläranlage Schwandorf Wackersdorf, Viessmann mit den Gruppenunter- nehmen MicrobEnergy GmbH und Schmack Bio- gas GmbH, Hochschule Regensburg, Fakultät Elektro- und Informationstechnik	2013	k. A.
Straubing	MicroPyro	2014	k. A.
Stuttgart	ZSW Stuttgart, Fraunhofer IWES	2012	250
Werlte	Audi AG	2011	6.000

Quelle: Fraunhofer IFAM auf Basis von dena 2017

Brennstoffzellen

Bei den Brennstoffzellen werden in dieser Studie nur Brennstoffzellen für den mobilen Einsatz betrachtet. Bei diesen werden – neben den Industrieinvestitionen – nur die Kosten zur Herstellung der Brennstoffzellen berücksichtigt.

Zu den Industrieinvestitionen finden sich in der Literatur keine Angaben und auch die Expertengespräche lieferten hier keinen Aufschluss. Allerdings sind die grundsätzlichen Technologien der Brennstoffzellen und Elektrolyseure sehr ähnlich. Daher wird davon ausgegangen, dass für die Herstellung der Produktionskapazitäten auch die gleichen Kostenansätze (167 Euro je GW jährlicher Produktionskapazität) gewählt werden können.

Bei den Kosten für die Herstellung der Brennstoffzellen werden die Ergebnisse von Schmidt et al. (2017) herangezogen. Daraus wird folgende Entwicklung der Herstellungskosten mobiler Brennstoffzellen abgeleitet:

- 2018: 300 €/kW_{el}
- 2030: 75 €/kW_{el}
- 2050: 42 €/kW_{el}

Als Nutzungsdauer werden für die mobilen Brennstoffzellen 10 Jahre angenommen.

Methanisierung

Auch bei der Methanisierung liegen keine Angaben zu den Industrieinvestitionen vor. Daher werden auch hier für die Herstellung der Produktionskapazitäten die Kostenansätze wie bei der Elektrolyse gewählt.

In Anlehnung an Brandstätt et al. (2015) und DNV KEMA (2013) wird folgende Entwicklung der Herstellungskosten der Anlagen zur Methanisierung angesetzt:

- 2018: 950 €/kW
- 2030: 740 €/kW
- 2050: 500 €/kW

Die Lebensdauer wird, wie bei Elektrolyseuren, mit 20 Jahren angenommen. Der Ansatz für die Installation beträgt 20 Prozent, der für Betrieb und Wartung 3 Prozent der Herstellungskosten der Anlagen.

Sonstige Eingangsdaten

Neben den technischen Daten für die Speichertechnologien werden noch folgende Annahmen getroffen:

- Bis 2030 erfolgt ein gleichmäßiger Aufbau der Produktionskapazitäten bis auf das Niveau, mit dem der in den Szenarien angenommene Ausbau der jeweiligen Speicherarten erreicht werden kann.
- Es wird davon ausgegangen, dass die Produktionskapazitäten voll ausgelastet sind und kein Zubau ohne Auslastung erfolgt.
- Nach 15 Jahren werden Reinvestitionen in die Produktionsanlagen getätigt. Die erforderlichen Investitionen betragen 50 Prozent der Kosten der Neuerrichtung der Produktionsanlagen.
- Die Errichtung der Fabriken für die Herstellung von Brennstoffzellen beginnt erst ab 2020, die Produktion von Brennstoffzellen startet 2021.
- Die Szenarien mit dem Zieljahr 2050 setzen auf Szenarien mit Zieljahr 2030 auf. Das bedeutet, dass nach 2030 gerade die zusätzlichen Produktionskapazitäten errichtet werden, die für die Erreichung des für 2050 angenommenen Ausbaus der jeweiligen Speicherarten erforderlich ist.
- Die Arbeitsproduktivität steigt pro Jahr um 2 Prozent.
- Durch den technischen Fortschritt reduzieren sich die Investitionskosten für Produktionsanlagen von 2 Prozent pro Jahr.
- Aufgrund der Effizienz neuer Produktionsstätten sind bei gleichem Produktionsergebnis im Vergleich zum bisherigen Durchschnitt der Branche nur 50 Prozent der Beschäftigten erforderlich.

Anhang 4: Literaturverzeichnis zum Anhang

ADEME – Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (2014): Etude portant sur l'hydrogène et la méthanation comme procédé de valorisation de l'électricité excédentaire, September 2014, Quelle: www.ademe.fr/sites/default/files/assets/.../etude_powertogas_ademe-grdf-grtgaz.pdf (Abruf am 30.07.2018).

AGORA – Agora Energiewende (Hrsg.) (2014): Stromspeicher in der Energiewende. Untersuchung zum Bedarf an neuen Stromspeichern in Deutschland für den Erzeugungsausgleich, Systemdienstleistungen und im Verteilnetz. Berlin.

Ausfelder, F./Beilmann, C./Bertau, M./Bräuninger, S./Heinzel, A./Hoer, R./Koch, W./Mahlendorf, F./Metzelthin, A./Peuckert, M./Plass, L./Räuchle, M./Reuter, M./Schaub, G./Schiebahn, S./Schwab, E./Schüth, F./Stolten, D./Teßmer, G./Wagemann, K./Ziegahn, K.-F. (2015): Energiespeicherung als Element einer sicheren Energieversorgung. In: Chemie Ingenieur Technik 87, No. 1–2, S. 17–89, Wiley Online Library.

Barth, H./Kneiske, T./Raab, S. (2013):

Untersuchung des Bedarfs elektrochemischer Speicher zur Sicherung der Netzstabilität im Rahmen des Projekts ESPEN, BEIS Konferenz, Hamburg, September 2013, Quelle: <http://espen-projekt.efzn.de/index.php/ver%C3%B6ffentlichungen.html> (Abruf am 30.07.2018).

Bauknecht, D./Heinemann, C./Koch, M./Ritter, D./Harthan, R./Sachs, A./Vogel, M./Tröster, E./Langanke, S. (2016): Systematischer Vergleich von Flexibilitäts- und Speicheroptionen im deutschen Stromsystem zur Integration von erneuerbaren Energien und Analyse entsprechender Rahmenbedingungen. Freiburg/Darmstadt, November 2016.

Beck, H.-P. (2016): Potentiale Elektrochemischer Speicher in elektrischen Netzen in Konkurrenz zu anderen Technologien und Systemlösungen (ESPEN), Goslar, April 2016.

Bertuccioli, L./Chan, A./Hart, D./Lehner, F./Madden, B./Standen, E. (2014): Development of Water Electrolysis in the European Union Final Report. Februar 2014.

Beyer, C./Bretschneider, P. (2013): Modellbasierte, regional aufgelöste Analyse des Bedarfs an netzgekoppelten elektrischen Energiespeichern zum Ausgleich fluktuierender Energien. Oberhausen/Ilmenau, Juni 2013.

Bleses, P (2007) : Input-Output-Rechnung. In: Wirtschaft und Statistik 1/2007. Hrsg. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden. 2007. S. 86–96.

BMW (ohne Jahr): BMW i Batterie Zertifikat, Quelle: <http://www.bmw.de/de/topics/service-zubehoer/gewaehrleistung.html>, Zugriff: 30.07.2018.

Gerbert, P./Herhold, P./Heuskel, D./Klose, F. (2013): Trendstudie 2030+ . Kompetenzinitiative Energie des BDI, The Boston Consulting Group, März 2013.

Brandstätt, C./Fette, M./Meyer, S./Buchmann, M./Friedrichsen, N./Jahn, K./Löchte, M./Ludewig, H./Palovic, M./Rohrbach, N./Schulz, W./Utter, T./Wannack, V./Wellhausen, B. (2015): Multi-Grid-Storage – Flexibilität für Stromversorgung aus Gas- und Wärmenetzen. Juni 2015.

BSW – Bundesverband Solarwirtschaft e.V. (2016): Solarstromspeicher-Preismonitor Deutschland. Ergebnisse 1. Halbjahr 2016, Berlin 2016, Quelle: www.solarwirtschaft.de (Abruf am 30.07.2018).

dena – Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.) (2012): dena-Verteilnetzstudie – Ausbau- und Innovationsbedarf der Stromverteilnetze in Deutschland bis 2030. Berlin, Dezember 2012.

dena –Deutsche Energie-Agentur (Hrsg.) (2013): Power to Gas – Eine innovative Systemlösung auf dem Weg zur Marktreife. Berlin, Dezember 2013.

dena – Deutsche Energie-Agentur (2017): Strategieplattform Power to Gas – Pilotprojekte, Quelle: <http://www.powertogas.info/power-to-gas/pilotprojekte-im-ueberblick/>(Abruf am 30.07.2018).

Destatis – Statistisches Bundesamt (2017a): Erwerbstätige und Arbeitnehmer nach Wirtschaftsbereichen 2005 bis 2016.

Destatis – Statistisches Bundesamt (2017b): Bruttowertschöpfung nach Wirtschaftsbereichen in Deutschland 2005 bis 2016.

Dickens, A./Singh, C./Bosset, P./Mitchell, V./Cuadrado, P./Croftgrove, J./McLoughlin, S. (2014): Energie Storage – Power to the people. London, September 2014.

DNV KEMA (2013): Systems Analyses Power to Gas. Deliverable 1: Technology Review. Final Report. Groningen, Juni 2013.

Dupin, L. (2016): Aux Ulis, Areva H2Gen inaugure la première usine d'électrolyseurs en France, Juni 2016. Quelle: www.usinenouvelle.com/article/aux-ulis-areva-h2gen-inaugure-la-premiere-usine-d-electrolyseurs-en-france.N398897 (Abruf am 8.3.2017).

DVGW – Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. (Hrsg.) (2013): Entwicklung von modularen Konzepten zur Erzeugung, Speicherung und Einspeisung von Wasserstoff und Methan ins Erdgasnetz. Abschlussbericht Energiespeicherkonzepte. Bonn, Februar 2013. Quelle: <https://www.dvgw.de/leistungen/forschung/forschungsberichte/dvgw-forschungsbericht-g-10710/> (Abruf am 30.07.2018).

DVGW – Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. (Hrsg.) (2014): Technoökonomische Studie von Power-to-Gas-Konzepten. Bonn, November 2014. Quelle: <https://www.researchgate.net> (Abruf am 30.07.2018).

E4tech Särl, element energy: (2014): Development of Water Electrolysis in the European Union. Final Report. Brüssel, February 2014. Quelle: www.fch.europa.eu/sites/default/files/study%20electrolyser_0-Logos_0_0.pdf (Abruf am 08.02.2017).

Ecke, J./Klein, S./Klein, S.W./Steinert, T. (2017): Klimaschutz durch Sektorenkopplung: Optionen, Szenarien, Kosten. Berlin, März 2017.

ee-Consult, HESPUL, Solgaro (2014): Etude portant sur l'hydrogène et la méthanation comme procédé de valorisation de l'électricité excédentaire. Cassel, Lyon, Toulouse, September 2014.

Elstrand, R./Boßmann, T./Klingler, A.-L./Herbst, A./Klobasa, M./Wietschel, M. (2016): Netzentwicklungsplan Strom – Entwicklung der regionalen Stromnachfrage und Lastprofile – Begleitgutachten. Karlsruhe, November 2016.

Elsnar, P./Fischedick, M./Sauer, U. (Hrsg.) (2015): Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050. Berlin, November 2015.

ELT – Elektrolyse Technik GmbH (2017): persönliche Information, April 2017.

ENERTRAG AG (2017): persönliche Information, April 2017.

FCH JU (2015): The Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking Commercialisation of Energy Storage in Europe. März 2015. Quelle: www.fch.europa.eu (Abruf am 30.07.2018).

Hacker, F./Hülsmann, F./Kasten, P./Loreck, C./Ludig, S./Mottschall, M./Zimmer, W. (2014): eMobil 2050 – Szenarien zum möglichen Beitrag des elektrischen Verkehrs zum langfristigen Klimaschutz. Freiburg/Berlin/Darmstadt, September 2014.

Hartmann, N./Eltrop, L./Bauer, N./Salzer, J./Schwarz, S./Schmidt, M. (2012): Stromspeicherpotenziale für Deutschland. Stuttgart, Juni 2012.

Heinemann, C./Koch, M./Ritter, D./Vogel, M./Harthan, R./Bauknecht, D. (2016): Ökologische Bereitstellung von Flexibilität im Stromsystem. Freiburg, November 2016.

Henning, H.-M./Palzer, A. (2013): Energiesystem 2050. Freiburg, November 2013.

Kempener, R./Vivero, G. (IRENA) (2015): Renewables and Electricity Storage – A technology roadmap for Remap 2030. Juni 2015.

Kleemann, M./Kuckshinrichs, W./Heckler, R. (1999): CO₂-Reduktion und Beschäftigungseffekte im Wohnungssektor durch das CO₂-Minderungsprogramm der KfW. Forschungszentrum Jülich, Programmgruppe STE. Reihe Umwelt. Band 17, S. 38–69. Jülich.

Matthes, F. Chr./Emele, L./Hermann, H./Loreck, C./Cook, V., Peter, F./Ziegenhagen, I. (2017): Zukunft Stromsystem – Kohleausstieg 2035. WWF Deutschland (Hrsg.), Berlin.

Nel Hydrogen (2017): persönliche Information, April 2017.

Nitsch, J. (2014): Szenarien der deutschen Energieversorgung vor dem Hintergrund der Vereinbarungen der Großen Koalition – Kurzexperte für den Bundesverband Erneuerbare Energien e. V.. Stuttgart, Februar 2014.

Nitsch, J. (2015): SZEN-15 – Aktuelle Szenarien der deutschen Energieversorgung unter Berücksichtigung der Eckdaten des Jahres 2014. Stuttgart, April 2015.

Nitsch, J. (2016): Die Energiewende nach COP 21 – Aktuelle Szenarien der deutschen Energieversorgung (Kurzstudie für den Bundesverband Erneuerbare Energien e. V.). Stuttgart, 7. März 2016.

Nissan (2017): Nissan Elektrofahrzeuge – Garantie und Service. Quelle: <https://www.nissan.de/fahrzeuge/neuwagen/leaf/vorteile.html> (Abruf am 30.07.2018).

NOW – Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (Hrsg.) (2011): Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien. Berlin, Juli 2011. Quelle: www.hs-ansbach.de/uploads/tx_nxlinks/NOW-Studie-Wasserelektrolyse-2011.pdf (Abruf am 08.03.2017).

Opel (2017): Der neue Opel Ampera-e im Überblick – Batterie & Reichweite, Quelle: <http://media.opel.de/media/de/de/opel/news.detail.html/content/Pages/news/de/de/2017/opel/02-13-range-champion-ampera-e.html> (Abruf am 30.07.2018).

Pape, C./Gerhardt, N./Härtel, P./Scholz, A./Schwinn, R., Drees, T./Maaz, A./Sprey, J./Breuer, C./Moser, A., Sailer, F./Reuter, S./Müller, T. (2014): Roadmap Speicher. Speicherbedarf für Erneuerbare Energien – Speicheralternativen – Speicheranreiz – Überwindung rechtlicher Hemmnisse, S. 88. Würzburg, November 2014.

Pelling, C./Schmid, T./Regett, A./Gruber, A./Conrad, J./Wachinger, K./Carr, L./Dronia, M./Nobis, P./Pfeifroth, P./Eller, S./Fischhaber, S. (2016): Verbundforschungsanliegen Merit Order der Energiespeicherung im Jahr 2030 – Teil 1: Hauptbericht, München, Mai 2016.

Plötz, P./Gnann, T./Kühn, A./Wietschel, M. (2014): Markthochlaufsenarien für Elektrofahrzeuge – Langfassung – korrigierte Version, Karlsruhe.

Repenning, J./Matthes, F.-Chr./Blanck, R./Emele, L./Döring, U./Förster, H./Haller, M./Harthan, R./Henneberg, K./Hermann, H./Jörß, W./Kasten, P./Ludig, S./Loreck, C./Scheffler, M./Schumacher, K., Eichhammer, W./Braungardt, Elsland, R./Fleiter, T./Hartwig, J./Kockat, J./Pfluger, B./Schade, W./Schlomann, B./Sensfuß, F., Athmann, U., Ziesing, H.-J. (2014): Klimaschutzszenario 2050 – 1. Modellierungsrunde. Berlin, August 2014.

Repenning, J./Emele, L./Blanck, R./Böttcher, H./Dehoust, G./Förster, H./Greiner, B./Harthan, R./Henneberg, K./Hermann, H./Jörß, W./Loreck, C./Ludig, S./Matthes, F.-Chr./Scheffler, M./Schumacher, K./Wiegmann, K./Zell-Ziegler, C., Braungardt, Eichhammer, W./Elsland, R./Fleiter, T./Hartwig, J./Kockat, J./Pfluger, B./Schade, W./Schlomann, B./Sensfuß, F./Ziesing, H.-J. (2015): Klimaschutzszenario 2050 – 2. Endbericht, Dezember 2015.

Schlesinger, M./Kemmler, A./Kirchner, A./Koziel, S./Ley, A./Piégsa, A./Seefeldt, F./Straßburg, S./Weiner, K., Lindenberg, D./Knauf, A./Malischek, R./Nick, S./Panke, T./Paulus, S./Tode, C./Wagner, Lutz, C./Lehr, U./Ulrich, P. (2014): Entwicklung der Energiemärkte – Energieerferenzprognose. Basel, Köln, Osnabrück, Juni 2014.

Schill, W.-P. (2013): Residual Load, Renewable Surplus Generation and Storage – Requirements in Germany. Berlin.

Schmidt, O./Hawkes, A./Gambhir, A./Staffell, I. (2017): The future cost of electrical energy storage based on experience rates. In: nature energy, Volume 2, Article number 17110.

Shell Deutschland Oil GmbH (Hrsg.) (2017): Shell Wasserstoff-Studie – Energie der Zukunft?, Hamburg. Quelle: <http://www.shell.de/medien/shell-publikationen/shell-hydrogen-study.html> (Abruf am 30.07.2018).

Sterner, M./Thema, M./Eckert, F., Lenck, T./Götz, P. (2015b): Bedeutung und Notwendigkeit von Windgas für die Energiewende in Deutschland (Studie im Auftrag von Grennepeace Energie eG). Regensburg/Hamburg/Berlin, August 2015.

UBA – Umweltbundesamt (Hrsg.) (2013):
Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050.
Dessau, Oktober 2013.

Ueckert, F./Luderer, G., Hansen F. (2013):
Analyse des Klimaschutzpotentials der Nutzung
von erneuerbarem Wasserstoff und Methan – Ab-
schlussbericht (DVGW Forschung). Potsdam, Mai
2013.

**Umwelt BW – Ministerium für Umwelt, Klima
und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
(Hrsg.) (2017):** Photovoltaik und Batteriespei-
cher – Technologie, Integration, Wirtschaftlich-
keit, S. 8. Stuttgart, Januar 2017.

**VDE – Verband der Elektrotechnik, Elektronik
und Informationstechnik, ETG (2012):**
Energiespeicher für die Energiewende.
Speicherbedarf und Auswirkungen auf das
Übertragungsnetz für Szenarien bis 2050,
Frankfurt a. M., Juni 2012.

**VDE – Verband der Elektrotechnik, Elektronik
und Informationstechnik, ETG (2015):**
Batteriespeicher in der Nieder- und Mittel-
spannungsebene. Frankfurt a. M., Mai 2015.

**VDMA – Verband Deutscher Maschinen- und
Anlagenbau e. V. (2016):** Roadmap Batterie-
Produktionsmittel 2030 – Update 2016. Frankfurt
a. M.

**VGR – Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung
des Bundes (2014) :**Input-Output-Rechnung
(Revision 2014, Stand August 2017). Fachserie 18
Reihe 2. Wiesbaden.

AUTORINNEN UND AUTOREN

Christine Brandstätt, M.Sc. (Wirtschaftsingenieurin, Projektleitung)

Christine Brandstätt war von 2010 bis 2013 wissenschaftliche Mitarbeiterin beim Bremer Energie Institut und leitete, akquirierte und bearbeitete dort Forschungs- und Beratungsprojekte im Bereich der Energiewirtschaft und -regulierung. Seit 2013 setzt sie diese Tätigkeiten am Fraunhofer IFAM in Bremen fort. Ihr gegenwärtiges Forschungsgebiet sind Flexibilitätsoptionen zur Integration erneuerbarer Stromerzeugung durch Speicherung und die Kopplung des Stromsystems mit anderen Energiesektoren. Sie studierte in Birkenfeld, Madrid, Nantes und Stockholm Wirtschaftsingenieurwesen mit Schwerpunkt Erneuerbare Energien und promovierte gegenwärtig an der Jacobs University Bremen zur Anreizwirkung der Netzentgelte für die Integration Erneuerbarer Energien ins Verteilnetz.

Dr. Jürgen Gabriel (Volkswirt)

Dr. Jürgen Gabriel hat Wirtschafts- und Sozialwissenschaften studiert und auf dem Gebiet der „Prognose regionaler Wohnungsnachfrage“ promoviert. Von 1982 bis 1990 sammelte er erste Berufserfahrungen im Stadtplanungsamt der Heidelberger Stadtverwaltung und war von 1990 bis 2001 in einem großen kommunalen Energieversorgungsunternehmen (Stadtwerke Bremen AG und Nachfolgegesellschaften) tätig. In dieser Zeit war er u. a. verantwortlich für die strategische Unternehmensentwicklung, wobei er den durch die Liberalisierung ausgelösten Wechsel vom Versorgungsunternehmen zum Wettbewerbsunternehmen aktiv mitgestaltete. 2002 wechselte Dr. Gabriel zum Bremer Energie Institut und leitete seitdem zahlreiche Projekte auf dem Gebiet der liberalisierten Energiemärkte, über die Bedingungen des Netzbetriebs, zur Integration von Erneuerbaren Energien in das Versorgungssystem sowie über makro-ökonomische Effekte unterschiedlicher energiewirtschaftlicher oder energiepolitischer Entwicklungen. Seit 1. September 2013 ist Dr. Gabriel Mitarbeiter im Fraunhofer IFAM, Abteilung Energiesystemanalyse, mit denselben Arbeitsschwerpunkten.

Dr. rer. nat. Karin Jahn (Physikerin)

Dr. Karin Jahn widmet sich seit mehr als 30 Jahren den Themen „Erneuerbare Energien“ und „Effiziente Energieversorgung und -nutzung“. Von 1989 bis 1993 hat sie am Institut für Solarenergieforschung in Hameln/Emmerthal verschiedene Formen der passiven Solarenergienutzung an Gebäuden erforscht. Ab 1993 war sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Bremer Energie Institut tätig. Dort hatte sie die Projektleitung in zahlreichen Forschungsvorhaben zu den Themen Solarenergie und Energieeffizienz in Gebäuden inne und hat Energie- und Klimaschutzkonzepte für Kommunen und Regionen erstellt.

Die Schwerpunkte ihrer fachlichen Arbeit am Fraunhofer IFAM sind die Erarbeitung von Energie- und Klimaschutzkonzepten, der Einsatz erneuerbarer Energien in der Wärme- und Stromversorgung, das Thema energieeffiziente Gebäude und die Analyse der Wirtschaftlichkeit von Effizienzmaßnahmen. In jüngster Zeit hat sich Dr. Jahn darüber hinaus mit der Elektromobilität und deren Anforderungen an bzw. Auswirkungen auf die Versorgungsinfrastruktur befasst.

Fabian Peters, M.Sc. (Ingenieur)

Fabian Peters studierte Produktionstechnik an der Universität Bremen. Von 2009 bis 2010 war er während eines Studienaufenthalts an der Tokyo Metropolitan University und schloss im Jahr 2012 sein Studium in Japan mit dem Master of Science in Production Engineering ab. Seine Masterarbeit mit dem Thema „Herstellung und Charakterisierung von hochkapazitiven siliziumbasierten Anoden für Lithiumbatterien der nächsten Generation“ wurde mit dem DRIVE-E-Studienpreis 2012 ausgezeichnet. Von 2011 bis 2012 war er als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Rahmen des Projekts TUM Create in Singapur im Bereich Batterieauslegung und Herstellung tätig. Seit 2012 ist er Projektleiter am Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und angewandte Materialforschung IFAM in Oldenburg. Seine Arbeitsschwerpunkte liegen im Bereich Materialentwicklung für verbesserte Lithium-Ionen-Batterien, Fertigungskonzepte für Batteriezellen sowie Materialien und Fertigungskonzepte für zukünftige Festkörperbatterien.

Der Anteil erneuerbarer Energieträger an der Energiebereitstellung hat – insbesondere beim Strom – in den vergangenen Jahren deutlich zugenommen und wird auch weiterhin ansteigen. Der Einsatz von (neuen) Stromspeichern ist essentiell, wenn die Versorgungssicherheit mit den volatilen erneuerbaren Energien gewährleistet werden soll.

Bislang fehlt ein systematischer Vergleich der Investitionen und Beschäftigungseffekte der unterschiedlichen innovativen Speichertechnologien. Dies ist jedoch eine wichtige Grundlage für die Einschätzung, welche Chancen verschiedene Speicherstrategien für die inländische Industrie eröffnen können. Die vorliegende Studie befasst sich daher mit der Frage, welche Effekte verschiedene Speicherstrategien in der deutschen Industrie auslösen und welche Beschäftigungseffekte erwartet werden können.

WWW.BOECKLER.DE

ISBN 978-3-86593-317-1