ESIP-Studie

# Energiespeicher in Produktionssystemen
## Herausforderungen und Chancen

2019

Dipl.-Wi.-Ing. (FH) Fabian Zimmermann, MBE
Alexander Emde, M. Eng.
Raoul Laribi, M. Sc.
Dipl.-Wi.-Ing. Diana Wang
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer

Fraunhofer IPA

Universität Stuttgart
Institut für Energieeffizienz
in der Produktion EEP

Fraunhofer IPA

Universität Stuttgart
Institut für Energieeffizienz in der Produktion EEP

# ENERGIESPEICHER IN PRODUKTIONSSYSTEMEN

ESIP-STUDIE

# ENERGIESPEICHER IN PRODUKTIONSSYSTEMEN

## Herausforderungen und Chancen für industrielle Einsatzoptionen

Autoren:

**Fabian Zimmermann, Alexander Emde, Raoul Laribi, Diana Wang, Alexander Sauer**

**Dipl.-Ing. (FH) Fabian Zimmerman, MBE**
**Alexander Emde, M. Eng.**

**Raoul Laribi, M. Sc.**
**Dipl.-Wi.-Ing. Diana Wang**
**Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer**

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik
und Automatisierung IPA
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Institut für Energieeffizienz in der Produktion EEP
Universität Stuttgart
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

DOI-Nummer: https://doi.org/10.24406/ipa-n-552073

August 2019, Stuttgart

# Inhalt

**Abbildungsverzeichnis** ... 6

**Tabellenverzeichnis** ... 8

**Abkürzungsverzeichnis** ... 10

1 Einleitung ... 11
1.1 Studienziel und Methodik ... 11
1.2 Allgemeine Umfrageergebnisse ... 13

2 Einsatzoptionen für Energiespeicher ... 15
2.1 Einsatzoptionen zur Absicherung der Produktion ... 16
2.1.1 Sicherstellung der Versorgungssicherheit ... 16
2.1.2 Aufrechterhaltung der Versorgungsqualität ... 18
2.2 Einsatzoptionen zur Optimierung des Energiebezugs ... 18
2.2.1 Eigenverbrauchsoptimierung ... 19
2.2.2 Rekuperation ... 20
2.2.3 Handel an der Strombörse ... 21
2.2.4 Netzentgeltreduktion ... 22
2.3 Einsatzoptionen durch Systemdienstleistungen ... 27
2.3.1 Regelenergiebereitstellung ... 27
2.3.2 Abschaltbare Lasten ... 29
2.4 Regulatorische Rahmenbedingungen ... 31
2.4.1 Netzentgelte ... 32
2.4.2 EEG-Umlage ... 33
2.4.3 KWK-Umlage ... 34
2.4.4 Stromsteuer ... 35
2.4.5 Weitere Kostenbestandteile ... 35
2.5 Vergleich der Einsatzoptionen ... 35
2.6 Einsatzoptionen im Markt ... 38

3 Status quo Energiespeichertechnologien ... 42
3.1 Überblick über Kennzahlen von Stromspeichertechnologien ... 43
3.1.1 Schwungmassenspeicher ... 46
3.1.2 Kondensatoren ... 48
3.1.3 Blei-Säure-Batterien ... 50
3.1.4 Natrium-Hochtemperatur-Batterien ... 51
3.1.5 Lithium-Batterien ... 53

3.1.6 Redox-Flow-Batterien ..... 55
3.1.7 Vergleich der Stromspeichertechnologien ..... 57
3.2 Thermische Energiespeichertechnologien ..... 59
3.2.1 Sensible thermische Energiespeicher ..... 61
3.2.2 Latente Energiespeicher ..... 62
3.2.3 Thermochemische Energiespeicher ..... 65
3.2.4 Vergleich der thermischen Energiespeichertechnologien ..... 66
3.3 Energiespeichertechnologien im Markt ..... 69

4 Herausforderungen und Chancen für Energiespeicher ..... 76
4.1 Bedeutung von Energiespeichern in Unternehmen ..... 76
4.2 Potenzial einer Energiespeicherintegration in Unternehmen ..... 77
4.3 Herausforderungen für eine Energiespeicherintegration in Unternehmen ..... 78
4.4 Treiber und Chancen von Energiespeichern in Unternehmen ..... 81
4.5 Wirtschaftlichkeit von Energiespeichern ..... 82

5 Fazit ..... 86

Literatur ..... 88

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Methodisches Vorgehen der Studie ..... 12
Abbildung 2 Bisheriger Einsatz von Energiespeichern in Unternehmen ..... 13
Abbildung 3 Selbsteinschätzung bei der Energiespeicherintegration ..... 14
Abbildung 4 Struktur des Stromgroßhandels in Anlehnung an (Graeber, 2013, S. 17–23) ..... 21
Abbildung 5 Strompreisbestandteile Industriekunden in ct/kWh (Jahresverbrauch 160.000 bis 20 Mio. kWh) in Anlehnung an (BDEW, 2019, S. 25) ..... 31
Abbildung 6 Vergleich der Einsatzoptionen für Energiespeicher in Produktionssystemen ..... 37
Abbildung 7 Aktuelle Einsatzoptionen der bereits integrierten Energiespeicher ..... 38
Abbildung 8 Integrationspunkt einer Energiespeicherintegration nach Produktionsebenen ..... 39
Abbildung 9 Größenordnungen der Energiespeicher ..... 40
Abbildung 10 Physikalische Klassifikation von Energiespeichertechnologien in Anlehnung an (Bauer 2017, S. 36f.) ..... 42
Abbildung 11 Vergleich der betrachteten Stromspeichertechnologien hinsichtlich ihrer Kennzahlen ..... 57
Abbildung 12 Übersicht verschiedener thermischer Energiespeichertechnologien in Anlehnung an (Hauer, 2017, S. 582) ..... 59
Abbildung 13 Aktueller Fokus auf Technologien zur Speicherung thermischer Energie ..... 60
Abbildung 14 Zukünftiger Fokus auf Technologien zur Speicherung von thermischer Energie ..... 61
Abbildung 15 Wärmemenge in Abhängigkeit der Temperatur in Anlehnung an Sterner und Stadler (2017, S. 601) ..... 63
Abbildung 16 Schematische Darstellung eines latenten Energiespeichers in Anlehnung an (Hauer et al., 2013, S. 34) ..... 64
Abbildung 17 Interesse an aktuellen Energiespeichertechnologien ..... 69
Abbildung 18 Interesse an zukünftigen Energiespeichertechnologien ..... 70
Abbildung 19 Interesse an aktuellen elektrischen und elektrochemischen Energiespeichertechnologien ..... 71
Abbildung 20 Interesse an zukünftigen elektrischen und elektrochemischen Energiespeichertechnologien ..... 72
Abbildung 21 Interesse an hybriden Energiespeicherlösungen ..... 73
Abbildung 22 Personaleinsatz bei einer Energiespeicherintegration ..... 76
Abbildung 23 Gründe gegen eine Energiespeicherintegration ..... 77
Abbildung 24 Aktuelle Herausforderungen für Energiespeicher ..... 79

Abbildung 25 Erfassung von Energiedaten in Unternehmen ..... 80
Abbildung 26 Gründe für die Integration von Energiespeichern ..... 81
Abbildung 27 Wirtschaftliche Bewertungsmethoden für Energiespeicher ..... 82
Abbildung 28 Geplante Amortisationszeit von Energiespeichern ..... 83
Abbildung 29 Vergleich der geplanten mit der tatsächlichen Amortisationszeit (Nutzer) ..... 84

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Klassifikation von Energiespeichern nach Speicherdauer (AEE, 2012, S. 7) ..... 15
Tabelle 2 Einsatzoptionen für Energiespeicher in Produktionssystemen ..... 15
Tabelle 3 Anforderungsprofil für die Einsatzoption Sicherstellung der Versorgungssicherheit (Köhler et al. 2018, S. 33) ..... 17
Tabelle 4 Anforderungsprofil für die Einsatzoption Aufrechterhaltung der Versorgungsqualität (Agora, 2014, S. 99[a]; Böttcher und Nagel, 2018, S. 180[b]; IEA, 2014, S. 9[c]) ..... 18
Tabelle 5 Anforderungsprofil für die Einsatzoption Eigenverbrauchsoptimierung (Köhler et al., 2018, S. 35[a]; Böttcher und Nagel, 2018, S. 180[b]; Rothacher et al., 2018, S. 77[c]) ..... 19
Tabelle 6 Anforderungsprofil für die Einsatzoption Rekuperation (Riegel et al., 2017, S. 298[a]) ..... 20
Tabelle 7 Anforderungsprofil für die Einsatzoption Lastverschiebung durch Stromhandel (Andresen et al., 2017, S. 66[a]; Böttcher und Nagel, 2018, S. 180[b]; EPEX SPOT, 2019[c]; IEA, 2014, S. 9[d]; Kanngießer, 2013, S. 22[e]) ..... 22
Tabelle 8 Erheblichkeitsschwellen des Verlagerungspotenzials je nach Nutzungsebene (BNetzA, 2011a, S. 11) ..... 24
Tabelle 9 Anforderungsprofil für die Einsatzoption Reduzierung der Netzentgelte (Köhler et al., 2018, S. 38[a]; Bussar et al., 2013, S. 10[b]) ..... 26
Tabelle 10 Unterscheidungsmerkmale positiver und negativer Regelenergiebereitstellung (BNetzA, 2011b) ..... 27
Tabelle 11 Präqualifikationsanforderungen von PRL, SRL, MRL (Hölder, 2014; BNetzA, 2015a, S. 3–13; 50 Hertz et al., 2018) ..... 28
Tabelle 12 Anforderungsprofil für die Einsatzoption Regelenergiebereitstellung (Köhler et al., 2018, S. 41[a]; 50 Hertz et al., 2019b[b]; IEA, 2014, S. 9[c]) ..... 29
Tabelle 13 Voraussetzungen nach Verordnung für abschaltbare Lasten (BMJV, 2016) ..... 30
Tabelle 14 Anforderungsprofil für die Einsatzoption abschaltbare Lasten (50 Hertz et al., 2019a) ..... 30
Tabelle 15 Unterscheidung von Energiespeichern für netzentgeltverbundene Umlagen (Böttcher und Nagel, 2018, S. 296) ..... 32
Tabelle 16 Betrachtete Stromspeichertechnologien ..... 44
Tabelle 17 Technische und ökonomische Kennzahlen von Energiespeichertechnologien (Bauer, 2017, S. 39-40[a] und S.46[b]; Andresen et al., 2017, S. 14[c]) ..... 45

Tabelle 18 Technische und ökonomische Kennzahlen von Schwungmassenspeichern (Köhler et al., 2018, S. 30[a]; Rundel et al., 2013, S. 30[b]; Thema, 2017, S. 649[c]; Andresen et al., 2017, S. 81[d]; Fraunhofer ISI, 2015, S. 23[e]) ..... 47
Tabelle 19 Technische und ökonomische Kennzahlen von Kondensatoren (Köhler et al., 2018, S. 30[a], S.123[b]; Kurzweil und Dietlmeier, 2018, S. 31[c]; Andresen et al., 2017, S. 84[d]; Thema, 2017, S. 649[e], Fraunhofer ISI, 2015, S. 23[f]; Bauer, 2017, S. 46[g]) ..... 49
Tabelle 20 Technische und ökonomische Kennzahlen von Blei-Säure-Batterien (Köhler et al., 2018, S. 30[a]; Kurzweil und Dietlmeier, 2018, S. 19[b]; Riegel et al., 2017, S. 250[c]; Elsner und Sauer, 2015, S. 23[d]; Thema, 2017, S.649[e]) ..... 50
Tabelle 21 Technische und ökonomische Kennzahlen von Natrium-Hochtemperatur-Batterien (Köhler et al., 2018, S. 30[a]; Riegel et al., 2017, S. 312[b]; Thema, 2017, S. 649[c]; Elsner und Sauer, 2015, S. 36[d]) ..... 52
Tabelle 22 Technische und ökonomische Kennzahlen von Lithium-Batterien (Köhler et al., 2018, S. 30[a]; Riegel et al., 2017, S. 312[b]; Thema, 2017, S. 649[c]; Elsner und Sauer, 2015, S. 36[d]) ..... 54
Tabelle 23 Technische und ökonomische Kennzahlen von Redox-Flow-Batterien (Elsner und Sauer, 2015, S. 39[a]; Fraunhofer ISI, 2015, S. 23 [b]; Thema, 2017, S. 649[c]; Bauer, 2017, 46[d]) ..... 56
Tabelle 24 Technische und ökonomische Kennzahlen von sensiblen Energiespeichern in Form eines sensiblen Wasserspeichers (FVEE, 2010, S. 110[a]; Thema, 2017, S. 653[b]; Hauer, 2017, S. 588[c]) ..... 66
Tabelle 25 Technische und ökonomische Kennzahlen von latenten Energiespeichern (Hauer et al., 2013, S. 17[a]; Thema, 2017, S. 653[b]; FVEE, 2010, S. 110[c]) ..... 67
Tabelle 26 Technische und ökonomische Kennzahlen von thermochemischen Energiespeichern (Hauer et al., 2013, S. 17[a]; Thema, 2017, S. 653[b]; FVEE, 2010, S. 110[c]) ..... 67
Tabelle 27 Übersicht über Anwendungen von thermischen Energiespeichern und eingesetzte / zukünftig einsetzbare thermische Energiespeichertechnologien (Hewicker et al., 2013, S. 75) ..... 68
Tabelle 28 Eignung unterschiedlicher Speichertechnologien für betrachtete Einsatzoptionen ..... 74

# Abkürzungsverzeichnis

| | |
|---|---|
| AbLaV | Verordnung zu abschaltbaren Lasten |
| AP | Arbeitspreis |
| Bl-B | Blei-Säure-Batterie |
| EEG | Erneuerbare-Energien-Gesetz |
| EnWG | Energiewirtschaftsgesetz |
| EPEX | European Power Exchange |
| HLZF | Hochlastzeitfenster |
| KWK | Kraft-Wärme-Kopplung |
| KWKG | Kraft-Wärme-Kopplung-Gesetz |
| Li-B | Lithium-Batterie |
| LP | Leistungspreis |
| MRL | Minutenreserveleistung |
| Na-B | Natrium-Hochtemperatur-Batterie |
| OTC | Over the Counter |
| PRL | Primärregelleistung |
| PV | Photovoltaik |
| RF-B | Redox-Flow-Batterie |
| RLM | Registrierende Leistungsmessung |
| SLP | Standardlastprofil |
| SMS | Schwungmassenspeicher |
| SNL | Schnell abschaltbare Lasten |
| SOL | Sofort abschaltbare Lasten |
| SRL | Sekundärregelleistung |
| StromNEV | Stromnetzentgeltverordnung |
| StromNZV | Stromnetzzugangsverordnung |
| StromStG | Stromsteuergesetz |
| Supercap | Kondensator |
| USV | Unterbrechungsfreie Stromversorgung |

# 1 Einleitung

In vielen produzierenden Unternehmen sind bereits Energiespeicher integriert. Die Integration erfolgte vor allem in Zwischenkreisen von Maschinen (Fahlbusch, 2015, S. 339 ff.). Ebenso werden Energiespeicher als unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) für sensible Prozesse eingesetzt (Köhler et al., 2018, S. 16). Zusätzliche Einsatzoptionen werden durch die Integration von erneuerbaren Energien und die dadurch entstehende volatile Energieerzeugung zunehmend interessanter für Unternehmen. Zu diesen Einsatzoptionen zählen unter anderem die Verringerung des Lastbezugs aus dem Netz oder die Eigenverbrauchsoptimierung (Gobmaier, 2014, S. 5).

Den Einsatzoptionen steht die kontinuierliche Weiterentwicklung der Energiespeichertechnologien gegenüber (Fahlbusch, 2015, S. 339 ff.). Einer der Haupttreiber dieser Entwicklung ist die Elektromobilität. Durch die Weiterentwicklung können die hohen Investitionskosten reduziert werden, dies führt bei stationären Anwendungen zu geringeren Amortisationszeiten (Köhler et al., 2018, S. 17). Daher können bestimmte Energiespeicher in Kombination mit der zugehörigen Einsatzoption wirtschaftlich eingesetzt werden.

Vor diesem Hintergrund wurde diese Studie durchgeführt. Sie wurde durch das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg gefördert und soll mögliche Einsatzoptionen für Energiespeicher in Produktionssystemen identifizieren, den Status Quo von Energiespeichertechnologien sowie die aktuellen Herausforderungen und Chancen beschreiben.

## 1.1 Studienziel und Methodik

Das Ziel der Studie ist es, unterschiedliche Einsatzoptionen für stationäre Energiespeicher im industriellen Umfeld zu identifizieren. Zudem werden die derzeitigen Energiespeichertechnologien vorgestellt sowie die aktuellen Chancen und Herausforderungen beschrieben. Abbildung 1 zeigt das methodische Vorgehen der Studie.

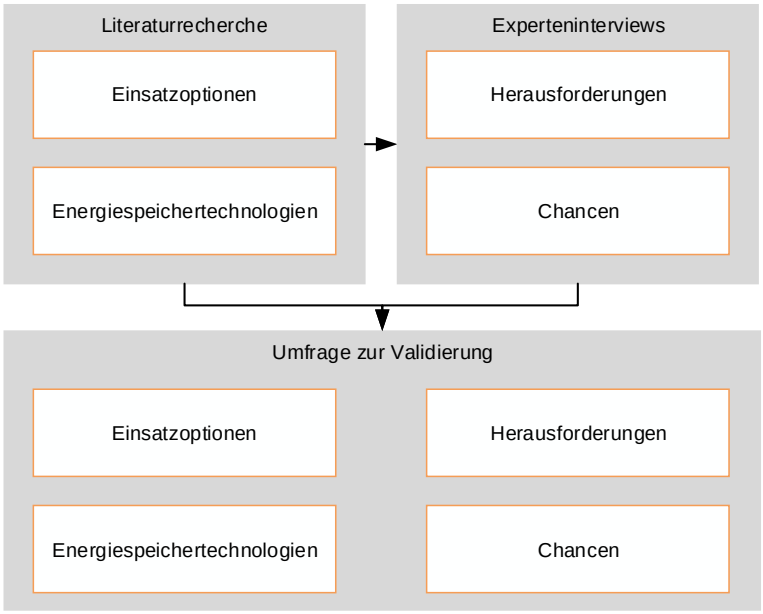


*Abbildung 1 Methodisches Vorgehen der Studie*

Durch eine Literaturrecherche wurden für die Grundlagenerarbeitung die Einsatzoptionen für Energiespeicher im industriellen Umfeld identifiziert und der Status Quo der Energiespeichertechnologien anhand von technischen und ökonomischen Kennzahlen ermittelt und beschrieben.

Um das Potenzial für Energiespeicher zu erfassen, wurden Experteninterviews und eine Online-Umfrage durchgeführt. Als Grundlage für Fragen dienten die Einsatzoptionen sowie die Energiespeichertechnologien als Ergebnis der Grundlagenerarbeitung. Anhand dessen wurde ein Gesprächsleitfaden für die Experteninterviews erstellt. Dieser gliedert sich in die Themen technische Integration, Energiespeichertechnologien, Wettbewerb, Herausforderungen, Motivation, Datenerfassung und Wirtschaftlichkeit. Die Experteninterviews mit einer Gesprächsdauer zwischen 30 und 60 Minuten dienten zudem zur Verifikation der Sinnhaftigkeit sowie Eignung der Fragen aus dem Leitfaden. Dabei ermöglichten die vielen offen gestellten Fragen den Experten, ein tiefergehendes Verständnis wiederzugeben. Bei der Auswahl der Fachexperten für die Interviews wurde darauf geachtet, dass diese die Bereiche Forschung, Anlagenbau, Systemintegration und Projektierung abdecken, um so eine möglichst breite Einschätzung über das Thema zu erzielen. In den Unternehmen der meisten ausgewählten Experten werden bereits Energiespeicher eingesetzt. Insgesamt wurden acht Experteninterviews durchgeführt.

Alle Fragen aus den Experteninterviews haben sich als relevant herausgestellt, sodass die Fragen im Wesentlichen in die Online-Umfrage übernommen und um einige vertiefende Fragen ergänzt wurden. Zur besseren Auswertbarkeit wurden in der Online-Umfrage vorwiegend geschlossene Fragen (meist mit Ergänzungsoption) gestellt. Die Bewerbung der Online-Umfrage erfolgte über den Verteiler des Fraunhofer IPA mit insgesamt 3.892 Interessenten zum Thema Energie. Zwischen dem 1. August und dem 18. Oktober 2018 nahmen 269 Personen teil, davon flossen 136 Datensätze in die Auswertung ein.

## 1.2 Allgemeine Umfrageergebnisse

Wie Abbildung 2 zeigt, nutzt ein gutes Drittel der Umfrageteilnehmer bereits Energiespeicher (nachfolgend Nutzer genannt), während die übrigen zwei Drittel noch keinen Energiespeicher im Unternehmen integriert haben. Diese unterteilen sich in Unternehmen, die Interesse an einer Energiespeicherintegration haben (nachfolgend Interessierte genannt) und Unternehmen, die kein Interesse haben. Als Argumente, die gegen eine Energiespeicherintegration sprechen, wurden entweder die fehlende Wirtschaftlichkeit oder die fehelende technische Umsetzbarkeit genannt. Die nicht interessierten Unternehmen wurden bei den weiteren Auswertungen nicht berücksichtigt. Die abgebildeten Auswertungen stellen jeweils die Anzahl der abgegebenen Antworten (n) dar, die von einer bestimmten Anzahl an Teilnehmern (m) abgegeben wurden. Neben der Auswertung für alle Umfrageteilnehmer wurden zusätzlich alle Fragen für die beiden Gruppen Nutzer und Interessierte ausgewertet, um Unterschiede zu identifizieren und daraus Handlungsempfehlungen abzuleiten.

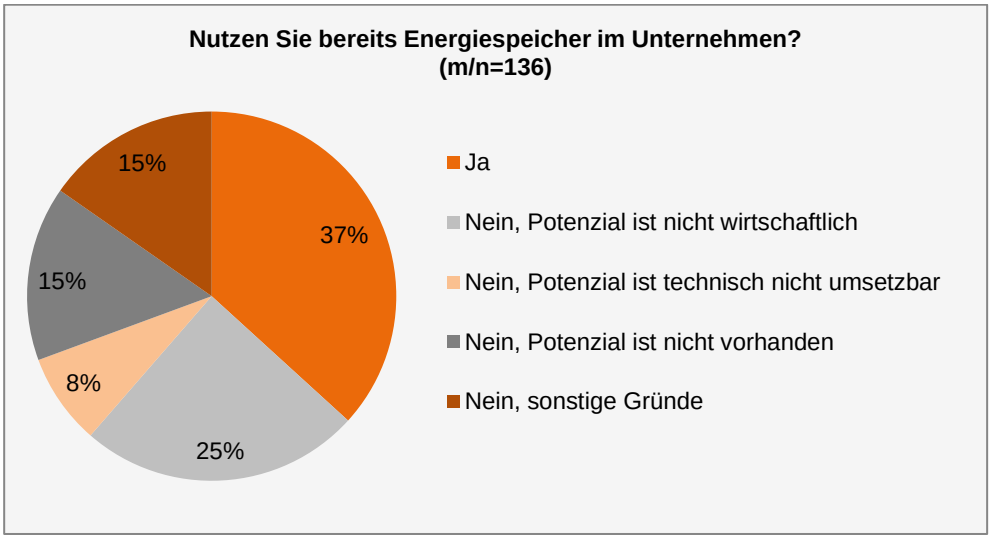


*Abbildung 2 Bisheriger Einsatz von Energiespeichern in Unternehmen*

Auf die Frage nach ihrer Selbsteinschätzung gaben die Unternehmen an Energiespeicherintegration im Vergleich zu ihren Wettbewerbern auf mindestens dem gleichen Niveau oder besser zu sein (siehe Abbildung 3).

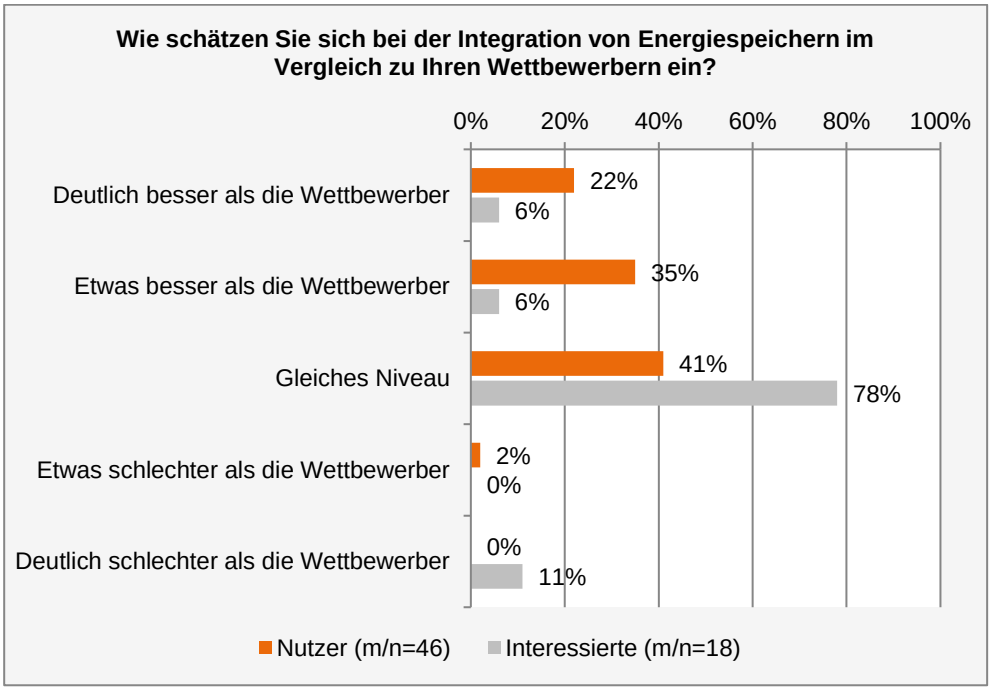


*Abbildung 3 Selbsteinschätzung bei der Energiespeicherintegration*

Jedoch schätzen sich über die Hälfte der Nutzer etwas oder sogar deutlich besser als die Wettbewerber ein. Im Gegensatz dazu sehen sich gute zwei Drittel der Interessierten auf gleichem Niveau. Nur 11 % der interessierten Umfrageteilnehmer schätzen sich sogar schlechter als der Wettbewerb ein.

# 2 Einsatzoptionen für Energiespeicher

Für Energiespeicher bieten Industrieunternehmen eine Vielzahl an Einsatzoptionen. Ein wichtiges Kriterium zur Einteilung der Einsatzoptionen ist die Dauer der Energiespeicherung, auch Speicherdauer genannt. Die Speicherdauer ist sowohl von der Energiespeichertechnologie als auch von der Einsatzoption abhängig. Tabelle 1 zeigt die Einteilung der Einsatzoptionen in Abhängigkeit der Speicherdauer nach (AEE, 2012, S. 7).

*Tabelle 1 Klassifikation von Energiespeichern nach Speicherdauer (AEE, 2012, S. 7)*

| **Bezeichnung** | **Speicherdauer** |
|---|---|
| Kurzfristige Speicher | Sekunden bis Minuten |
| Mittelfristige Speicher | Stunden bis Tage |
| Langfristige Speicher | Tage bis Monate |

In dieser Studie werden Einsatzoptionen mit einer kurz- bis mittelfristigen Speicherdauer betrachtet. Zudem liegt der Fokus auf Einsatzoptionen für elektrische Energie. Die kurz- bis mittelfristigen Einsatzoptionen lassen sich in Einsatzoptionen zur Absicherung der Produktion, Einsatzoptionen zur Optimierung des Energiebezugs und Einsatzoptionen zur Bereitstellung von Systemdienstleistungen gliedern (siehe Tabelle 2).

*Tabelle 2 Einsatzoptionen für Energiespeicher in Produktionssystemen*

| **Absicherung der Produktion** | **Optimierung des Energiebezugs** | **Bereitstellung von Systemdienstleistungen** |
|---|---|---|
| Versorgungssicherheit | Eigenverbrauchs-optimierung | Abschaltbare Lasten |
| Versorgungsqualität | Rekuperation von Bremsenergie | Regelenergiebereitstellung |
| | Handel an der Strombörse | |
| | Netzentgeltreduktion | |

Die Einsatzoptionen der drei Kategorien werden in den folgenden Unterkapiteln erläutert. Dabei werden die Funktion der Einsatzoption und der ökonomische Nutzen aus Unternehmenssicht erläutert sowie ein Anforderungsprofil an Energiespeicher aufgezeigt. Im Anforderungsprofil wird die Größenordnung (Leistung, Kapazität) der Energiespeicher für die jeweilige Einsatzoption beschrieben. Zudem werden die erforderliche Reaktionszeit sowie die Ausspeicherdauer angegeben, falls diese für die Einsatzoption relevant sind. Zusätzlich werden die benötigten Vollzyklen pro Jahr angegeben, da diese für eine wirtschaftliche Bewertung erforderlich sind.

## 2.1 Einsatzoptionen zur Absicherung der Produktion

Zu den Einsatzoptionen zur Absicherung der Produktion zählen die Versorgungssicherheit sowie die Aufrechterhaltung der Versorgungsqualität. Für diese Einsatzoptionen sind Energiespeicher am Markt verfügbar und werden bereits eingesetzt (Köhler et al., 2018, S. 13). Der übergeordnete Nutzen der Einsatzoptionen ist die Vermeidung von Produktionsausschuss im Falle von Netzschwankungen oder -störungen und die daraus resultierenden Qualitätsabweichungen des Produkts.

### 2.1.1 Sicherstellung der Versorgungssicherheit

Die Hauptfunktion bei der Einsatzoption „Sicherstellung der Versorgungssicherheit“ ist die unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV). Die USV sorgt für die Sicherstellung der Stromversorgung für energiesensible Einrichtungen (BDEW, 2016, S. 11). Bei Netzeinbrüchen von wenigen Sekunden überbrückt die USV die Energieversorgung, um Produktionsausfälle zu vermeiden (Herbener, 2011, S. 3).

Dadurch, dass diese Einsatzoption sich durch die Vermeidung von Produktionsausschuss amortisiert, ist diese aktuell eine der wirtschaftlichsten Einsatzoptionen für Energiespeicher in der Industrie (Herbener, 2011, S. 3). Tabelle 3 fasst die Anforderungen für die Einsatzoption „Sicherstellung der Versorgungssicherheit“ bezogen auf die USV zusammen.

*Tabelle 3 Anforderungsprofil für die Einsatzoption Sicherstellung der Versorgungssicherheit (Köhler et al. 2018, S. 33)*

| Kennzahl | Anforderung |
|---|---|
| **Leistung** | Sehr hoch (bis zu mehrere MW) |
| **Kapazität** | Gering (ab wenigen Wh) |
| **Reaktionszeit** | Einige Millisekunden |
| **Ausspeicherdauer** | Einige Sekunden bis 30 Minuten |
| **Zyklen pro Jahr** | Unregelmäßiger Einsatz |
| **Besonderheit** | Geringe Selbstentladerate erforderlich |

Für einen Energiespeicher als USV-System ist eine hohe Leistung im Vergleich zur Kapazität erforderlich sowie wie eine schnelle Reaktionszeit von einigen Millisekunden. Die Ausspeicherdauer liegt üblicherweise zwischen einigen Sekunden bis zu 30 Minuten. Da die Energiespeicher bei der Einsatzoption USV unregelmäßig zum Einsatz kommen, ist ein guter Wirkungsgrad bei langen Standzeiten (Selbstentladerate) eine zusätzliche Anforderung an den Energiespeicher. (Köhler et al., 2018, S. 33)

Batteriesysteme als USV-Systeme sind seit Jahrzehnten im Markt etabliert (Agora, 2014, S. 108). Die Energiespeicher können eine Größenordnung ab einem kW Leistung über eine Dauer von bis zu zwei Stunden aufweisen (Gobmaier, 2014, S.3).

Falls es doch zu einem Zusammenbruch des Netzes kommen sollte, können die Energiespeicher zudem zur Versorgungswiederaufnahme genutzt werden. Die Versorgungswiederaufnahme ist die Fähigkeit nach einem Versorgungsausfall ohne Energie aus dem öffentlichen Netz wieder hoch zu fahren, um so den Wiederaufbau der Energieversorgung zu starten. Die Anlagen, die im Fall eines Netzausfalls in der Lage sind, ohne Energie aus dem öffentlichen Netz wieder anzufahren, werden „schwarzstartfähig“ genannt. (BDEW, 2016, S. 11)

### 2.1.2 Aufrechterhaltung der Versorgungsqualität

Neben der Versorgungssicherheit gibt es auch Einsatzoptionen zur Aufrechterhaltung der Versorgungsqualität. Dazu zählen die Spannungshaltung und die Blindleistungskompensation. Stromverbraucher können negative Netzrückwirkungen verursachen. Dazu zählen Oberschwingungen, Flicker und Asymmetrien (VDE, 2013, S. 10). Um Versorgungsqualität zu gewährleisten, können diese Netzrückwirkungen mit einem Energiespeicher ausgeglichen werden (Agora, 2014, S. 99). Blindleistung kann durch Kompensationsanlagen gedeckt werden (ZVEI, 2013, S. 10). In Tabelle 4 sind die Anforderungen an einen Energiespeicher für diese Einsatzoptionen aufgelistet.

*Tabelle 4 Anforderungsprofil für die Einsatzoption Aufrechterhaltung der Versorgungsqualität (Agora, 2014, S. 99[a]; Böttcher und Nagel, 2018, S. 180[b]; IEA, 2014, S. 9[c])*

| Kennzahl | Anforderung |
|---|---|
| **Leistung** | k. A. |
| **Kapazität** | Geringe Kapazitäten[a] |
| **Reaktionszeit** | Schnelle Reaktionszeiten[a] |
| **Ausspeicherdauer** | Sekunden bis Minuten[b] |
| **Zyklen pro Jahr** | 10 bis 100 pro Tag[c] |
| **Besonderheit** | Hohe Wirkungsgrade[a] |

## 2.2 Einsatzoptionen zur Optimierung des Energiebezugs

Zu den Einsatzoptionen zur Optimierung des Energiebezugs gehören die Eigenverbrauchsoptimierung, die Rekuperation, die Reduktion der Netzentgelte und die Lastverschiebung durch Stromhandel. Das Ziel ist das Reduzieren von Energiekosten entweder durch eine Reduktion des Energieverbrauchs (Energieeffizienzsteigerung) oder die Anpassung des Leistungsbezugs, um Kosten zu verringern.

### 2.2.1 Eigenverbrauchsoptimierung

Industrieunternehmen entwickeln sich von reinen Stromverbrauchern (Consumer) zu sogenannten „Prosumern“. Prosumer sind Netzteilnehmer, die den eigenerzeugten Strom selbst verbrauchen oder in das Netz zurückspeisen sowie, bei nicht ausreichender Eigenenergieerzeugung, Strom aus dem Netz beziehen (BNetzA, 2019c). Für Industrieunternehmen eignen sich für die Eigenenergieerzeugung aus erneuerbaren Energien vor allem Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) (DIHK und VEA, 2014, S. 6).

Laut Köhler et al. (2018, S. 33–34) sind durch Investitionen in Eigenerzeugungsanlagen Einsparungen von bis zu 10 ct/kWh erreichbar. PV-Anlagen zur Eigenenergieerzeugung kosten zwischen 870 und 1.500 € pro kW Nennleistung der PV-Anlage (Rothacher et al., 2018, S. 119). Die Erzeugungskosten für PV-Strom liegen insgesamt unterhalb von 6 ct/kWh (Bolay, 2015, S. 20). Die Eigenverbrauchsquote von PV-Anlagen für Industrieunternehmen beläuft sich auf 20 bis 30 %, kann allerdings durch einen Energiespeicher auf 60 bis 75 % gesteigert werden (Köhler et al., 2018, S. 33–34). Die Gestehungskosten von eigenerzeugtem PV-Strom inklusive Energiespeicher bei einer Neuanlage liegen bei 30 ct/kWh (Köhler et al., 2018, S. 34). Tabelle 5 fasst die Anforderungen für die Einsatzoption Eigenverbrauchsoptimierung für einen Energiespeicher zusammen.

*Tabelle 5 Anforderungsprofil für die Einsatzoption Eigenverbrauchsoptimierung (Köhler et al., 2018, S. 35[a]; Böttcher und Nagel, 2018, S. 180[b]; Rothacher et al., 2018, S. 77[c])*

| Kennzahl | Anforderung |
|---|---|
| **Leistung** | Ab wenigen kW für Privathaushalte[a] |
| **Kapazität** | Mehrere kWh[a] |
| **Reaktionszeit** | Nicht relevant[a] |
| **Ausspeicherdauer** | Minuten bis wenige Tage[b] |
| **Zyklen pro Jahr** | 250 (in Deutschland)[c] |
| **Besonderheit** | Geringe Selbstentladerate für Dauer von 0,5 Tagen[a] |

Einsatzoptionen für Energiespeicher

Die Leistung und Kapazität des Energiespeichers sind ab geringen Größen flexibel und orientieren sich an der Größe der PV-Anlage. Grundsätzlich ist bei dieser Einsatzoption die Kapazität entscheidend, da Energie über einen längeren Zeitraum zwischengespeichert werden soll. Der Zeitraum der Energiespeicherung ist dabei abhängig von dem jeweiligen Unternehmen, da das zugehörige Lastprofil über den potenziellen Eigenverbrauch entscheidet (SMA, 2010). Das Lastprofil eines Unternehmens wird bspw. durch das Schichtsystem beeinflusst.
Die erzeugte Energie und damit auch die Zyklen des Energiespeichers sind zudem abhängig von der Sonneneinstrahlung, Region, Dachausrichtung und Dachneigung. In Deutschland wird ein Energiespeicher für Eigenverbrauchsoptimierung im Durchschnitt mit 250 Zyklen pro Jahr belastet (Rothacher et al., 2018, S. 77). Bei Strompreisen von 15 bis 20 ct/kWh und wegfallender EEG-Vergütung ist durch einen Energiespeicher ein Ertrag von 37 bis 50 €/kWh pro Jahr möglich (Rothacher et al., 2018, S. 77). Ein Energiespeicher für die industrielle Eigenverbrauchsoptimierung kann bis zu 2 MW Leistung über einen Zeitraum von bis zu fünf Stunden liefern (Köhler et al., 2018, S. 31).

### 2.2.2 Rekuperation

Rekuperation bezeichnet die Nutzung von Bremsenergie (Stadler, 2017, S. 217). Bei Anlagen, die sowohl einen Beschleunigungs- als auch einen Bremsvorgang haben, lässt sich durch die Rekuperation elektrischer Energie die Energieeffizienz erhöhen (Schaab et al., 2018, S. 325). Die frei werdende Energie bei der Verzögerung wird im Energiespeicher zwischengespeichert und bei dem darauffolgenden Beschleunigungsvorgang genutzt (Stadler, 2017, S. 217). Tabelle 6 zeigt die Anforderungen an einen Energiespeicher für die Einsatzoption Rekuperation.

*Tabelle 6 Anforderungsprofil für die Einsatzoption Rekuperation (Riegel et al., 2017, S. 298[a])*

| Kennzahl | Anforderung |
|---|---|
| **Leistung** | k. A. |
| **Kapazität** | k. A. |
| **Reaktionszeit** | Kurzfristig[a] |
| **Ausspeicherdauer** | Nicht relevant |
| **Zyklen pro Jahr** | k. A. |
| **Besonderheit** | Im Anwendungsfall ist ein Bremsvorgang erforderlich. |

### 2.2.3 Handel an der Strombörse

Durch die Teilnahme an Strommärkten können über Energiespeicher Preisschwankungen ausgenutzt werden. Dabei wird Energie zu niedrigen Preisen gekauft und gespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt bei höheren Preisen wieder ausgespeichert und verkauft (Kanngießer, 2013, S. 21). Einen Überblick über die dafür genutzte Struktur des Stromgroßhandels zeigt Abbildung 4.

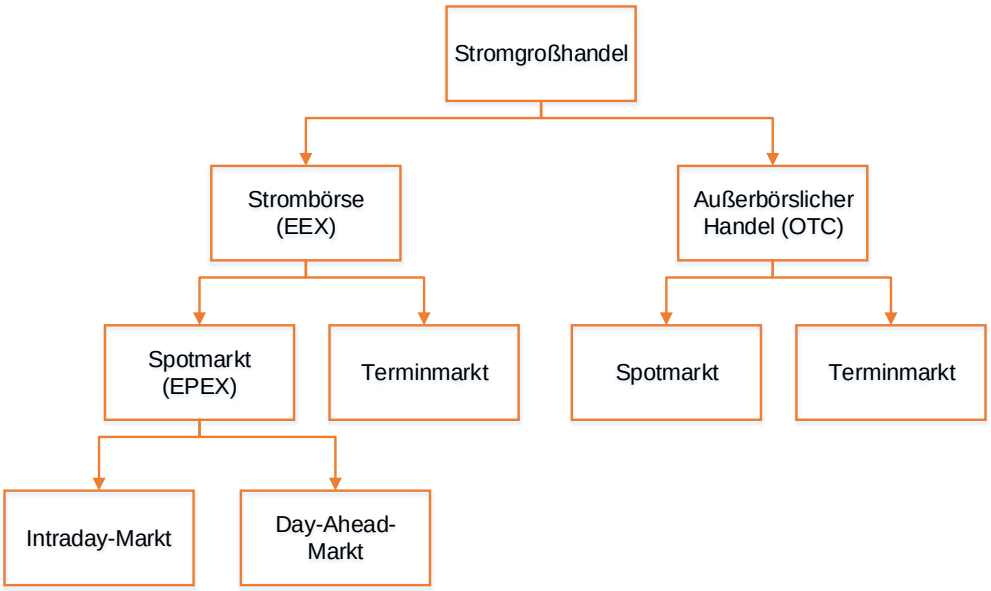


*Abbildung 4 Struktur des Stromgroßhandels in Anlehnung an (Graeber, 2013, S. 17–23)*

Als zentraler Handelsplatz für Stromprodukte dient der Spotmarkt der European Power Exchange (EPEX), auf dem Stunden- und Blockkontrakte mit physischer Erfüllung für den Folgetag gehandelt werden (Genoese, 2013, S. 16). Der Intraday-Markt ist ein Teil des Spotmarkts, auf dem Marktteilnehmer bis zu fünf Minuten vor Lieferung Stromkontrakte für einzelne Stunden des Tages handeln können (EPEX SPOT, 2019). Interessant für den Einsatz von Energiespeichern sind der Intraday-Spotmarkt der Strombörse und der außerbörsliche (OTC) Handel (Sterner et al., 2015, S. 22). Neben dem Intraday-Markt als Teil des Spotmarktes gibt es als zusätzlichen Markt den Day-Ahead-Markt, an dem stündliche Kontrakte für den Folgetag gehandelt werden (Kanngießer, 2013, S. 21). Tabelle 7 zeigt die Anforderungen an einen Energiespeicher für diese Einsatzoption.

*Tabelle 7 Anforderungsprofil für die Einsatzoption Lastverschiebung durch Stromhandel (Andresen et al., 2017, S. 66[a]; Böttcher und Nagel, 2018, S. 180[b]; EPEX SPOT, 2019[c]; IEA, 2014, S. 9[d]; Kanngießer, 2013, S. 22[e])*

| Kennzahl | Anforderung |
|---|---|
| **Leistung** | Mind. 0,1 MW[a] |
| **Kapazität** | Mind. 25 kWh[1] |
| **Reaktionszeit** | 5 bis 30 Minuten[c] |
| **Ausspeicherdauer** | 15 Min. bis mehrere Stunden[b] |
| **Zyklen pro Jahr** | 0,25 bis 1 Zyklus pro Tag[d] |
| **Besonderheit** | Verhältnis Kapazität und Leistung ist limitierender Faktor[e] |

### 2.2.4 Netzentgeltreduktion

Ein großes Potenzial für den Einsatz von Energiespeichern bietet die Reduktion der Netzentgelte. Zukünftig wird sich dieses Potenzial kontinuierlich erhöhen, da die durchschnittlichen Netzentgelte für die Industrie in Deutschland von 2011 bis 2018 um rund 4 %[2] - 9 %[3] pro Jahr gestiegen sind (BNetzA, 2019b, S. 154). Das Netzentgelt ist eine Gebühr, die jeder Netznutzer, der Strom durch das Versorgungsnetz bezieht, an den Netzbetreiber zahlen muss (BNetzA, 2018). Die gesetzlichen Bestimmungen für das Netzentgelt sind in § 20 des Energiewirtschaftsgesetzes und der Stromnetzentgeltverordnung (StromNEV) geregelt (BMJV, 2005; Deutscher Bundestag, 2005a). Das Netzentgelt setzt sich aus einem Arbeitspreis (AP) in Euro pro kWh und einem Leistungspreis (LP) in Euro pro kW zusammen (Amprion GmbH, 2019). Nachfolgende Formel zeigt die Berechnung des Netzentgelts:

$$Netzentgelt = LP \cdot Jahreshöchstleistung + AP \cdot Jahresarbeit$$

Entscheidend für die Festsetzung der Netzentgelte sind die Lastprofile der Verbraucher. Die Lastprofile werden anhand des Energieverbrauchs pro Jahr (MWh/a) unterteilt. Die Grenze liegt bei 100 MWh pro Jahr nach § 12 der

[1] 0,1 MW * 0,25 h= 25 kWh
[2] Gewerbekunden, Jahresverbrauch 50 MWh
[3] Industriekunden, Jahresverbrauch 24 GWh

Stromnetzzugangsverordnung (StromNZV) (Deutscher Bundestag, 2005b). Für Verbraucher über 100 MWh pro Jahr ist eine registrierende Leistungsmessung (RLM) erforderlich, bei welcher das individuelle Lastprofil ermittelt wird. Für alle Verbraucher unter 100 MWh pro Jahr wird keine Messung durchgeführt und es gelten die Standardlastprofile (SLP) des Verbands der Elektrizitätswirtschaft (VDEW) (VDEW, 1999, 26ff.).

Zur Reduzierung der Netzentgelte gibt es laut Rothacher et al. (2018, S. 100–106) vier unterschiedliche Möglichkeiten, die auch miteinander kombiniert angewandt werden können:

- Reduzierung der Maximalleistung
- Optimierung der Benutzungsstunden
- Atypische Netznutzung
- Stromintensiver Letztverbrauch

Im Folgenden werden die vier Möglichkeiten zur Reduzierung der Netzentgelte beschrieben.

**Reduzierung der Maximalleistung**

Die Reduzierung der Maximalleistung ist auch bekannt unter dem Namen Peak Shaving. Durch Reduktion von Lastspitzen im Lastprofil kann der Leistungspreis gesenkt werden. Hierzu werden im Lastprofil Lastspitzen identifiziert und anhand dessen der Energiespeicher dimensioniert. Entscheidend ist es, zu identifizieren, wie viel Leistung durch den Energiespeicher reduziert werden soll. Dies wird meistens durch eine Optimierung erreicht. Voraussetzung für die Machbarkeit der Reduzierung der Maximalleistung durch einen Energiespeicher ist die Prognostizierbarkeit der Lastprofile des Nutzers für künftige Jahre (Rothacher et al., 2018, S. 100).

**Optimierung der Benutzungsstunden**

Die Benutzungsstunden stellen eine wichtige Kennzahl für die Ermittlung der Netzentgelte dar. Es gilt, je höher die Kennzahl, desto gleichmäßiger wird der Strom verbraucht (Rothacher et al., 2018, S. 100). Die Berechnung erfolgt durch:

$$Benutzungsstunden\ [h] = \frac{Stromverbrauch\ [kWh]}{Maximalleistung\ [kW]}$$

Insgesamt ergeben sich maximale Benutzungsstunden in Höhe von 8.760 Stunden für ein Jahr. Es gibt eine Differenzierung der Netzentgelte über oder unter 2.500 Benutzungsstunden (BNetzA, 2015b, S. 14). Durch einen Energiespeicher kann die Maximalleistung reduziert werden, wodurch eine höhere Benutzungsdauer erreicht wird. Eine hohe Benutzungsdauer berechtigt den Netznutzer zur Beantragung reduzierter Arbeitspreise beim Netzbetreiber, wodurch das Netzentgelt verringert werden kann (Rothacher et al., 2018, S. 100).

**Atypische Netznutzung**

Unter der atypischen Netznutzung ist zu verstehen, dass wenig Strom bezogen wird, wenn alle anderen Stromverbraucher viel Strom aus dem Netz benötigen (Bolay, 2015, S. 2). Dieser Zeitbereich wird Hochlastzeitfenster (HLZF) genannt. Alle Netzbetreiber veröffentlichen jährlich die Hochlastzeitfenster. Ein Energiespeicher bietet die Möglichkeit, die Lasten aus den Hochlastzeitfenstern herauszuschieben (Rothacher et al., 2018, S. 102).
Zur Prüfung der Voraussetzungen eines Verbrauches werden zwei Lastspitzen herangezogen (Rothacher et al., 2018, S. 1002):

- Die absolute Jahreshöchstlast
- Die höchste Last im entsprechenden Hochlastzeitfenster

Die Berechnung des Lastverlagerungspotenzials ist wie folgt:

$$Lastverlagerungspotenzial = Jahreshöchstlast - Höchstlast\ im\ HLZF$$

Die Differenz der beiden Werte bestimmt das Lastverlagerungspotenzial, wobei derzeit ein Lastverlagerungspotenzial von mindestens 100 kW sowie das Erreichen bestimmter Grenzwerte (Erheblichkeitsschwelle, je nach Netzebene) beim Verhältnis dieses Verlagerungspotenzials zur jeweiligen absoluten Jahreshöchstlast erforderlich ist (Rothacher et al., 2018, S. 102). Für die Berechnung der Erheblichkeitsschwelle gilt:

$$Erheblichkeitsschwelle = \frac{Lastverlagerungspotenzial}{Jahreshöchstlast}$$

Tabelle 8 zeigt die Erheblichkeitsschwellen je nach Nutzungsebene.

*Tabelle 8 Erheblichkeitsschwellen des Verlagerungspotenzials je nach Nutzungsebene (BNetzA, 2011a, S. 11)*

| Netz-/Umspannebene | Erheblichkeitsschwelle |
|---|---|

| | |
|---|---|
| **Höchstspannung** | 5 % |
| **Höchst-/Hochspannung** | 10 % |
| **Hochspannung** | 10 % |
| **Hoch-/Mittelspannung** | 20 % |
| **Mittelspannung** | 20 % |
| **Mittel-/Niederspannung** | 30 % |
| **Niederspannung** | 30 % |

Falls diese Voraussetzungen erfüllt sind, ist für die Berechnung des Leistungsentgelts nicht die absolute Jahreshöchstlast entscheidend, sondern der geringere Leistungswert innerhalb des Hochlastzeitfensters (BNetzA, 2011a, S. 10). Da das individuelle Entgelt nach §19 Abs. 2 S. 1 StromNEV maximal bis auf 20 % des allgemeinen Entgelts reduziert werden kann, ist eine Kostenreduktion um maximal 80 % möglich (Deutscher Bundestag, 2005a).

Für die Berechnung des individuellen Netzentgeltes gilt folgende Formel:

$$Netzentgelt = LP \cdot höchste\ Leistung\ in\ Hochlastzeitfenstern + AP \cdot Jahresarbeit$$

Verbraucher unter 2.500 Benutzungsstunden können für die Berechnung die allgemein gültigen Leistungs- und Arbeitspreise (der jeweiligen Netzebene) oberhalb von 2.500 Benutzungsstunden verwenden. Die meist günstigeren Arbeitspreise machen diese Option attraktiv. Jedoch gilt auch bei dieser Wahloption die Begrenzung auf maximal 20 % des allgemeinen Netzentgeltes (über 2.500 Benutzungsstunden). (BNetzA, 2011a, S. 10)

**Stromintensiver Letztverbrauch**

Die Möglichkeit, durch stromintensiven Letztverbrauch das Netzentgelt zu reduzieren, besteht nach § 19 StromNEV für diejenigen Stromabnehmer, die mehr als 10 GWh pro Jahr an einer Stelle entnehmen und mindestens 7.000 Benutzungsstunden aufweisen (Deutscher Bundestag, 2005a). Diese Unternehmen können ein individuelles Netzentgelt beantragen, welches bis zu 90 % geringer ausfallen kann als das ursprüngliche Netzentgelt (Rothacher et al., 2018, S. 106).

Für alle vier Möglichkeiten, das Netzentgelt zu reduzieren gelten die in Tabelle 9 dargestellten Anforderungen.

*Tabelle 9 Anforderungsprofil für die Einsatzoption Reduzierung der Netzentgelte (Köhler et al., 2018, S. 38[a]; Bussar et al., 2013, S. 10[b])*

| Kennzahl | Anforderung |
|---|---|
| **Leistung** | bis zu 1 MW[a] |
| **Kapazität** | bis zu mehreren 100 kWh[a] |
| **Reaktionszeit** | Sekunden[a] |
| **Ausspeicherdauer** | Sekunden (auf Maschinenebene) bis Stunden (Systemebene)[a] |
| **Zyklen pro Jahr** | 1 bis 2 Zyklen pro Tag[b] |
| **Besonderheit** | Hohe Zyklenfestigkeit, da Energiespeicher häufig be- und entladen werden[a] |

Es ist eine Ausspeicherdauer von Sekunden auf Maschinenebene bis Stunden auf Systemebene erforderlich (Köhler et al., 2018, S. 38). Die Zyklen pro Jahr sind vom individuellen Lastprofil abhängig, jedoch geht Bussar et al. (2013, S. 10) durchschnittlich von ein bis zwei Vollzyklen pro Tag aus. Die Energiespeicher müssen zudem eine hohe Zyklenfestigkeit aufweisen, da diese, besonders auf Maschinenebene, häufig be- und entladen werden (Köhler et al., 2018, S. 38). Die Energiespeicher für eine Reduzierung der Netzentgelte liegen bei einer Größenordnung von einem MW Leistung über einen Zeitraum von bis zu einer Stunde (Fraunhofer ISI, 2015, S. 7).

## 2.3 Einsatzoptionen durch Systemdienstleistungen

Systemdienstleistung bedeutet, den Energiespeicher netzdienlich einzusetzen und damit das übergeordnete Energiesystem zu stabilisieren. Die Bereitstellung der Kapazitäten wird von einem Übertragungsnetzbetreiber vergütet. Zu den Systemdienstleistungen zählt die Regelenergiebereitstellung, aufgeteilt in Primärregelleistung (PRL), Sekundärregelleistung (SRL) und Minutenregelleistung (MRL) sowie die abschaltbaren Lasten. Eine weitere Einsatzoption für Energiespeicher wäre die Bereitstellung der Momentanreserve, jedoch gibt es gegenwärtig für diese Einsatzoption keine Vergütung (BDEW, 2016, S. 8).

### 2.3.1 Regelenergiebereitstellung

Eine der Möglichkeiten von Systemdienstleistungen ist die Frequenzhaltung, eine „für die Funktionstüchtigkeit des Systems unbedingt erforderliche Leistung“ (Berndt et al. 2007). Die damit verbundene Aufgabe, für die Übertragungsnetzbetreiber genügend Regelenergie für den Frequenzausgleich zu beschaffen, bietet die Möglichkeit für Unternehmen, Energiespeicher für die Bereitstellung von Regelenergie einzusetzen. Um das Leistungsgleichgewicht innerhalb der Regelzonen in jedem Moment aufrechterhalten zu können, organisieren die Übertragungsnetzbetreiber über den Regelenergiemarkt den Ausgleich von Frequenzschwankungen im Stromnetz. Unterteilt wird der Bedarf an Regelenergie in eine positive und eine negative Komponente sowie in drei verschiedene Bereitstellungsqualitäten (PRL, SRL, MRL). Tabelle 10 zeigt den Unterschied zwischen positiver und negativer Regelenergie.

*Tabelle 10 Unterscheidungsmerkmale positiver und negativer Regelenergiebereitstellung (BNetzA, 2011b)*

| **Unterscheidungs-merkmale** | **Positive Regelenergie** | **Negative Regelenergie** |
|---|---|---|
| **Verhältnis Verbrauch zu Erzeugung** | Verbrauch > Erzeugung (Unterspeisung) | Verbrauch < Erzeugung (Überspeisung) |
| **Verbraucher** | Last absenken | Last erhöhen |
| **Energiespeicher** | entladen | beladen |

Neben der Unterscheidung zwischen positiver und negativer Regelenergie werden zusätzlich drei zeitlich aufeinander aufbauende Produkte angeboten; PRL, SRL und MRL. Die PRL wird für den kurzfristigen Ausgleich von Last und Erzeugung genutzt, um die Frequenz im Stromnetz stabil zu halten. Im PRL-Markt werden zunehmend Batteriespeicher eingesetzt. Die SRL dient dem Ausgleich zwischen Last und Erzeugung in der Regelzone sowie der Rückführung der Frequenz in das Band zwischen plus und minus 20 mHz. Die MRL wir für länger andauernde Ungleichgewichte zwischen Last und Erzeugung genutzt. (BDEW, 2016, S. 8)

Für die drei Arten der Regelenergiebereitstellung gibt es unterschiedliche Voraussetzungen für die Teilnehmer. Diese Voraussetzungen werden auch Präqualifikationsanforderungen genannt. Tabelle 11 listet die Präqualifikations-anforderungen für PRL, SRL und MRL auf.

*Tabelle 11 Präqualifikationsanforderungen von PRL, SRL, MRL (Hölder, 2014; BNetzA, 2015a, S. 3–13; 50 Hertz et al., 2018)*

| **Anforderungen** | **PRL** | **SRL** | **MRL** |
|---|---|---|---|
| **Mindestgebot** | 1 MW | 5 MW (Absenkung auf 1 MW möglich) | 5 MW (Absenkung auf 1 MW möglich) |
| **Inkrement** | 1 MW | 1 MW | 1 MW |
| **Ausschreibungs-zyklus** | wöchentlich/ kalendertäglich (ab 01.07.2019) | kalendertäglich | kalendertäglich |
| **Vergütung** | Leistung | Leistung und Arbeit | Leistung und Arbeit |
| **Zeitscheiben** | 1 h | 6 à 4 h | 6 à 4 h |
| **Reaktionszeit** | ≤ 30 s | ≤ 5 Min. | ≤ 15 Min. |
| **Abruf** | automatisch, dezentral | automatisch, dezentral | manuell |

Die Vergütung erfolgt durch einen Leistungspreis in Euro pro MW für die Vorhaltung der Leistung und einen zusätzlichen Arbeitspreis in Euro pro MWh bei tatsächlichem Abruf. Die zusätzliche Vergütung des tatsächlichen Abrufs gilt jedoch nur für SRL und MRL. (Consentec, 2014, S. 22)

Insgesamt ergeben sich für die Regelenergiebereitstellung die Anforderungen aus Tabelle 12 für einen Energiespeicher.

*Tabelle 12 Anforderungsprofil für die Einsatzoption Regelenergiebereitstellung (Köhler et al., 2018, S. 41[a]; 50 Hertz et al., 2019b[b]; IEA, 2014, S. 9[c])*

| Kennzahl | Anforderung |
|---|---|
| **Leistung** | 1 bis 5 MW[a] |
| **Kapazität** | bis zu mehrere MWh[a] |
| **Reaktionszeit** | Sekunden bis 15 Minuten[b] |
| **Ausspeicherdauer** | Sekunden bis wenige Stunden[b] |
| **Zyklen pro Jahr** | 0 bis mehrmals täglich[c] |

Die Größenordnung für Energiespeicher zur Bereitstellung von Regelenergie liegen von einem bis fünf MW Leistung über einen Zeitraum von bis zu einer Stunde (Köhler et al., 2018, S. 31). Für die meisten industriellen Verbraucher ist die Teilnahme am PRL-Markt aufgrund der Anforderungen nur schwer möglich, jedoch bieten SRL- und MRL-Markt wirtschaftliche Absatzmärkte (DCTI, 2014, S. 12f.).

### 2.3.2 Abschaltbare Lasten

Die abschaltbaren Lasten sind eine mögliche Reaktion des Übertragungsnetzbetreibers auf Erzeugungsdefizite und Netzengpässe. Dabei werden Stromverbraucher (Lasten) durch den Übertragungsnetzbetreiber gesteuert bzw. abgeschaltet. Die Rahmenbedingungen sind in der Verordnung für abschaltbare Lasten geregelt (AbLaV). (BNetzA, 2019a)

Die abschaltbaren Lasten sind eine gute Ergänzung zum Regelenergie- und Spotmarkt für Energiespeicher (Rothacher et al., 2018, S. 94). Tabelle 13 zeigt die zwei Möglichkeiten für abschaltbare Lasten sowie deren Voraussetzungen.

*Tabelle 13 Voraussetzungen nach Verordnung für abschaltbare Lasten (BMJV, 2016)*

| Voraussetzungen | Schnell abschaltbare Lasten (SNL) | Sofort abschaltbare Lasten (SOL) |
|---|---|---|
| **Reaktionszeit** | < 15 Min. | < 200 ms |
| **Mind. Leistung** | 5 MW | |
| **Max. Vergütung** | Leistungspreis: 500 €/MW und pro Woche<br>Arbeitspreis: 400 €/MWh | |

Bei den abschaltbaren Lasten wird unterschieden zwischen schnell abschaltbaren Lasten (SNL), die eine Reaktionszeit von 15 Minuten haben, und den sofort abschaltbaren Lasten (SOL), welche eine Reaktionszeit von nur 200 Millisekunden erfordern. Die Anforderungen, die sich daraus für einen Energiespeicher ergeben, zeigt Tabelle 14.

*Tabelle 14 Anforderungsprofil für die Einsatzoption abschaltbare Lasten (50 Hertz et al., 2019a)*

| Kennzahl | Anforderung |
|---|---|
| **Leistung** | 5 bis 200 MW |
| **Kapazität** | 1,25 bis 50 MWh |
| **Reaktionszeit** | < 350 ms bis < 15 Min. |
| **Ausspeicherdauer** | 15 Min. (bis zu 32 Viertelstunden) |
| **Zyklen pro Jahr** | Max. 1 Mal pro Woche |
| **Leistung** | 5 bis 200 MW |

Die Kapazität ergibt sich aus dem Produkt von 5 MW Leistung und 15 Minuten Abrufdauer bei bis zu maximal 32 möglichen Viertelstunden. Ebenso berechnet sich die Ausspeicherdauer von bis zu acht Stunden aus dem Produkt von 32 Viertelstunden und der 15-minütigen Abrufdauer. Um die Mindestgröße von 5 MW zu erreichen, dürfen nach § 6 der AbLaV Konsortien gebildet werden (BMJV, 2016).

## 2.4 Regulatorische Rahmenbedingungen

In Bezug auf die Wirtschaftlichkeit eines Energiespeichers können die regulatorischen Rahmenbedingungen und die damit verbundenen Steuern und Abgaben der ein- bzw. ausgespeicherten Energie ein wichtiger Faktor sein. Deshalb werden in diesem Kapitel einige regulatorische Rahmenbedingungen und deren monetäre Belastung für einen Energiespeicher erläutert.

Energiespeicher sind bisher als Letztverbraucher eingestuft. Dementsprechend fallen alle „Stromnebenkosten“ wie z.B. Netznutzungsentgelte, EEG-Umlage und Stromsteuer bei der Einspeicherung an. Bei zeitverzögerter Abgabe des eingespeicherten Stroms an einen Letztverbraucher können die Kosten anschließend erneut anfallen. Für den Stromspeicher liegt daher eine „Doppelbesteuerung“ vor. Da diese doppelte Belastung extreme Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit der Stromspeichersysteme hätte, wurden mehrere Ausnahmetatbestände geschaffen, um faire Bedingungen zu gewährleisten. (Thomas, 2017, S. 13). Abbildung 5 zeigt die aktuellen Strompreisbestandteile für Industriekunden.

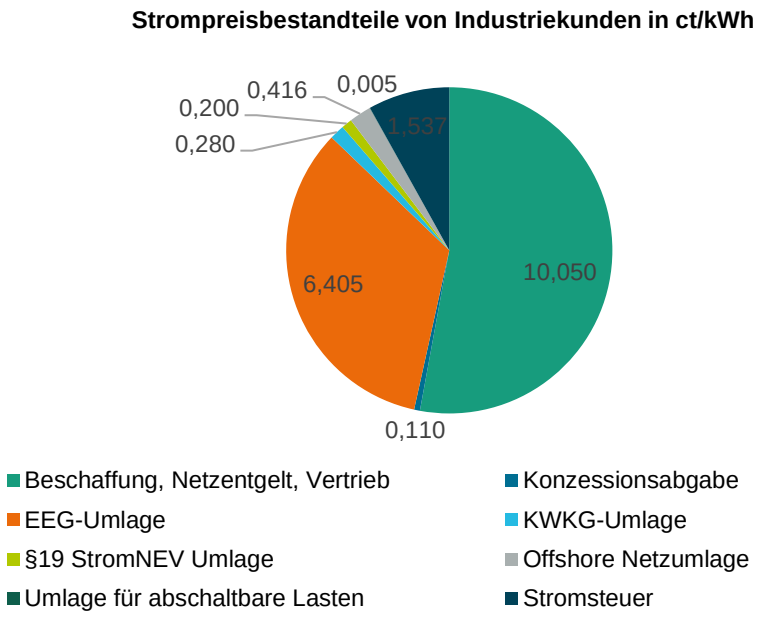


*Abbildung 5 Strompreisbestandteile Industriekunden in ct/kWh (Jahresverbrauch 160.000 bis 20 Mio. kWh) in Anlehnung an (BDEW, 2019, S. 25)*

### 2.4.1 Netzentgelte

Zunächst muss, wie in Tabelle 15 dargestellt, unterschieden werden zwischen netzverbundenen Energiespeichern und Energiespeichern im Inselbetrieb (Böttcher und Nagel, 2018, S. 296)

*Tabelle 15 Unterscheidung von Energiespeichern für netzentgeltverbundene Umlagen (Böttcher und Nagel, 2018, S. 296)*

| Netzverbundene Energiespeicher | Nicht-netzverbundene Energiespeicher |
|---|---|
| Energiespeicher an der Erzeugungsanlage | Energiespeicher im Inselbetrieb |
| Energiespeicher im Netz | |
| Energiespeicher beim Letztverbraucher | |

Nach § 17 Abs. 1 EnWG müssen Energiespeicher zur Speicherung elektrischer Energie im Energieversorgungsnetz an das Netz angeschlossen werden, ebenso wie Letztverbraucher und Erzeugungsanlagen (BMJV, 2005). Von diesen Unterscheidungen sind zudem die Umlagen nach § 9 Abs. 7 KWKG, § 19 Abs. 2 S. 15 StromNEV, die Offshore-Umlage nach § 17 EnWG und die Umlage nach § 18 AbLaV sowie die Konzessionsabgabe betroffen (Böttcher und Nagel, 2018, S. 303). Für stationäre Energiespeicher im industriellen Umfeld sind drei der vier Arten zu berücksichtigen. Die Energiespeicher an der Erzeugungsanlage entfallen, da hierunter große Wind- oder Photovoltaik-Parks auf Netzebene zu verstehen sind. Erzeugungsanlagen bei einem Unternehmen mit Energiespeicher fallen unter die Energiespeicher beim Letztverbraucher. Im Folgenden werden die regulatorischen Rahmenbedingungen drei zu berücksichtigenden Arten vorgestellt.

**Energiespeicher im Netz**

Energiespeicher im (öffentlichen) Netz werden grundsätzlich identisch behandelt wie Letztverbraucher, was dazu führt, dass die Energiespeicherung netzentgeltpflichtig ist, sobald der Strom über das öffentliche Netz bezogen wird (Böttcher und Nagel, 2018, 298,). Mit § 118 Abs. 6 des EnWG gibt es eine Neuregelung, wodurch Energiespeicher, die ab 01.01.2009 neu errichtet wurden oder in der Zeit zwischen 04.08.2011 bis einschließlich 03.08.2026 in Betrieb gehen, vom Netzentgelt für eine Dauer von 20 Jahren befreit sind, wenn sie ihren einzuspeisenden Strom über das öffentliche Netz beziehen (BMJV, 2005).

Zusätzlich entfällt für Energiespeicher, die ihre ausgespeicherte Energie vollständig in das öffentliche Netz zurückspeisen, durch § 19 Abs. 4 StromNEV das Arbeitsentgelt und das Leistungsentgelt fällt nur für die Energiespeicherverluste an (Deutscher Bundestag, 2005a). Die Befreiung wirkt laut § 118 Abs. 6 S. 3 EnWG allerdings nur dann, wenn die zur Speicherung benötigte Energie aus einem Transport- oder Verteilnetz entnommen wurde und die zeitlich verzögerte Ausspeicherung in dasselbe Netz erfolgt (BMJV, 2005). Durch diese Voraussetzung ist eine Netzentgeltbefreiung für Elektroautos ausgeschlossen.

**Energiespeicher beim Letztverbraucher**

Solange ein Energiespeicher beim Letztverbraucher das öffentliche Netz nicht nutzt, weil dieser bspw. durch eine beim Letztverbraucher stehende Erzeugungsanlage gespeist wird und die ausgespeiste Energie vom Letztverbraucher genutzt wird, ist kein Netzentgelt zu zahlen (Böttcher und Nagel, 2018, S. 302). Sobald der Energiespeicher mittels Energie aus dem öffentlichen Netz geladen wird, einschließlich der Energiespeicherverluste, ist dieser ein netzentgeltpflichtiger Letztverbraucher (BGH, 2009). Bei der Ausspeicherung ohne Nutzung des öffentlichen Netzes muss kein weiteres Netzentgelt gezahlt werden (Böttcher und Nagel, 2018, S. 302).

**Energiespeicher im Inselbetrieb**

Für Energiespeicher, die in einem Inselnetz (Unternehmen) integriert sind und nicht Energie aus dem öffentlichen Netz beziehen oder zurückspeisen, entfällt kein Netzentgelt. Diese Energiespeicher werden meisten zur Spitzenlastreduktion in dem Inselnetz genutzt (Böttcher und Nagel, 2018, S. 303).

### 2.4.2 EEG-Umlage

Im Jahr 2019 lag die EEG-Umlage für Industriekunden bei 6,405 ct/kWh (BDEW, 2019, S. 25). Für die Wirtschaftlichkeit eines Energiespeichers ist die EEG-Umlage ein wichtiger Faktor (Böttcher und Nagel, 2018, S. 305). Für die Regelungen der EEG-Umlage für Energiespeicher gilt die Unterscheidung nach Tabelle 15 aus Kapitel 2.4.1.

Einsatzoptionen für Energiespeicher

Das EEG 2017 sieht in diesem Zusammenhang eine Befreiung für Energiespeicher vor. Wird der Energiespeicher ausschließlich dafür genutzt, Strom aus dem Netz einzuspeichern und zeitversetzt wieder in das Netz abzugeben, ist die einzuspeichernde Strommenge nach § 61 l Abs.1 S. 1 EEG von der Umlage befreit, solange sie für die ausgespeicherte Strommenge entrichtet wird. Nach dieser Regelung fällt für entstehende Energiespeicherverluste keine EEG-Umlage an (Deutscher Bundestag, 2017).

Wird der Energiespeicher gemischt genutzt, also bspw. zusätzlich zur Erhöhung des Eigenverbrauchs eingesetzt, kann die Befreiung von der Umlage für maximal 500 im Stromspeicher verbrauchte Kilowattstunden je Kilowattstunde installierter Speicherkapazität pro Kalenderjahr in Anspruch genommen werden (§ 61 l Abs. 1a S. 3 EEG). Um eine Zuordnung von ein- und ausgespeicherten Strommengen zu ermöglichen, ist die Befreiung von der Umlage an die Voraussetzung geknüpft, dass sämtliche Strommengen durch geeichte Messeinrichtungen erfasst werden müssen (§ 61 l Abs. 1a Nr. 1a EEG). Um den Anspruch auf Befreiung zu erhalten, müssen die Betreiber der Energiespeicher ihre Nachweispflichten erfüllen. Darunter fallen nach § 61 l Abs. 1b EEG die Meldung der umlagepflichtigen Energiemengen sowie der Füllstand des Energiespeichers zu Beginn und zum Ende der Saldierungsperioden. Bei Nichteinhaltung dieser Anforderungen und Pflichten erlischt der Anspruch auf Befreiung und es bleibt bei der bisherigen Doppelbesteuerung.

Für den Einsatz von Energiespeichern zur Erhöhung des Eigenverbrauchs aus regenerativen Erzeugungsanlagen oder hocheffizienter KWK-Anlagen gilt es zu beachten, ob die Voraussetzungen für eine Reduktion bzw. Befreiung von der EEG-Umlage erfüllt werden. Besitzt die Erzeugungsanlage eine Leistung unter 10 kW und werden maximal 10 MWh Strom pro Jahr selbst verbraucht, muss nach § 61a Nr. 4 EEG keine EEG-Umlage entrichtet werden. Bei größerem Eigenverbrauch aus rein regenerativen Anlagen fällt die reduzierte EEG-Umlage von 40 % des vollen Werts an (§ 61b EEG) (Deutscher Bundestag, 2017).

### 2.4.3 KWK-Umlage

Die Befreiung von der KWK-Umlage erfolgt analog zum Vorgehen der EEG-Umlage. Dementsprechend orientieren sich die Bestimmungen ebenfalls an § 61 l EEG 2017.

### 2.4.4 Stromsteuer

Die Stromsteuer entsteht nach § 5 Abs.1 S. 1 StromStG grundsätzlich durch die Entnahme von Strom aus dem Versorgungsnetz durch einen Letztverbraucher (BMJV, 1999). Aus der am 27.08.2017 in Kraft getretenen Novellierung des StromStG geht hervor, dass stationäre Energiespeicher unter bestimmten Umständen von der Stromsteuer befreit werden können (BMF, 2017). In § 5 Abs. 4 StromStG wird die Möglichkeit aufgezeigt, stationäre Energiespeicher als Teil des Versorgungsnetzes zu behandeln. Voraussetzung dafür ist, dass der Energiespeicher den aufgenommenen Strom zeitlich versetzt wieder an das Netz abgibt.

Da durch die zeitversetzte Rückspeisung des Stroms kein Letztverbrauch entsteht, fällt auch keine Stromsteuer an. In diesem Fall kann das zuständige Hauptzollamt den Energiespeicher als Teil des Versorgungsnetzes zulassen. (BMJV, 1999)

### 2.4.5 Weitere Kostenbestandteile

Ob sich die dargestellten Ausnahmeregelungen auch auf weitere Kostenbestandteile (Offshore-Umlage, §19 StromNEV-Umlage, AbLaV-Umlage, Konzessionsabgaben) (siehe Abbildung 5) übertragen lassen, ist umstritten, da es diesbezüglich bisher keine einheitlichen Regelungen gibt (Thomas, 2017, S. 25).

## 2.5 Vergleich der Einsatzoptionen

In den vorherigen Kapiteln wurden die möglichen Einsatzoptionen für Energiespeicher in Produktionssystemen beschrieben. Dabei hat sich herausgestellt, dass jede Einsatzoption unterschiedliche Anforderungen an einen Energiespeicher hat, beschrieben durch die Anforderungsprofile. Abbildung 6 stellt die Anforderungen in Form eines morphologischen Kastens gegenüber.

Die Einsatzoptionen zur Absicherung der Produktion (Sicherstellung der Versorgungssicherheit, Aufrechterhaltung der Versorgungskapazität) fordern von den Energiespeichern eine hohe Leistung (mehrere MW) und eine sehr kurze Reaktionszeit (Millisekunden).

Einen Unterschied gibt es bei den erforderlichen Zyklen pro Jahr. Während die Einsatzoption zur Sicherstellung der Versorgungssicherheit (bspw. USV) aufgrund des sehr stabilen Netzes in Deutschland nur wenige Vollzyklen pro Jahr (vereinzelte Einsätze pro Woche) benötigt, können für die Einsatzoption zur Aufrechterhaltung der Versorgungskapazität (bspw. Spannungshaltung) mehrere Einsätze täglich erforderlich sein, um Spannungsschwankungen auszugleichen.
Zudem sind geringe Kapazitäten ausreichend, da nur kurze Zeiträume zu überbrücken sind (Ausspeicherdauer).

Bei den Einsatzoptionen zur Optimierung des Energiebezugs (Eigenverbrauchs-optimierung, Rekuperation, Handel an der Strombörse, Netzentgeltreduktion) ergeben sich andere Anforderungen an einen Energiespeicher. Die Reaktionszeit spielt bei diesen Einsatzoptionen ebenso wie die Leistung eine untergeordnete Rolle. Wichtig ist hier eine mittlere Ausspeicherdauer (mehrere Minuten bis zu einigen Stunden) sowie ein fast ausgeglichenes Verhältnis von Leistung zu Kapazität. Eine lange Ausspeicherdauer (mehrere Stunden bis Tage) ist jedoch nur bei der Einsatzoption Eigenverbrauchsoptimierung erforderlich, falls, wie bei Privathaushalten, die Energie nachts oder über das Wochenende gespeichert wird, um sie am nächsten Tag oder darauffolgenden Montag nutzen zu können.

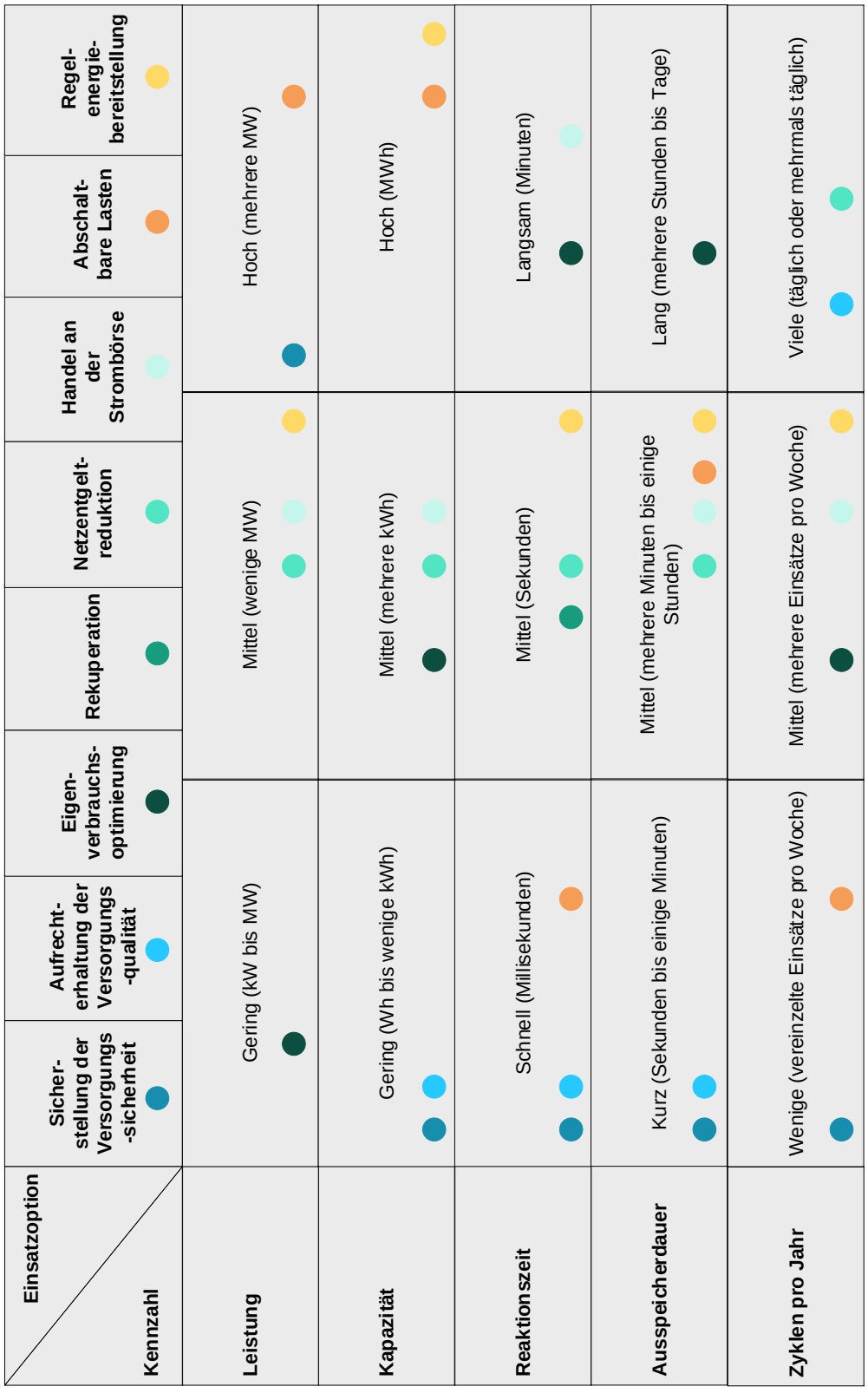


*Abbildung 6 Vergleich der Einsatzoptionen für Energiespeicher in Produktionssystemen*

Für die Einsatzoptionen durch Systemdienstleistungen (Regelenergiebereitstellung, abschaltbare Lasten) werden sehr große Energiespeicher mit hoher Leistung und Kapazität benötigt. Für die abschaltbaren Lasten ist zusätzlich eine geringe Reaktionszeit (Millisekunden) erforderlich.

Zusammenfassend lässt sich für die Einsatzoptionen festhalten, dass für Einsatzoptionen zur Absicherung eher kleine, schnell reagierende Leistungsspeicher eingesetzt werden können. Für die Einsatzoptionen zur Optimierung des Energiebezugs und durch Systemdienstleistungen sind meistens größere Energiespeicher erforderlich.

## 2.6 Einsatzoptionen im Markt

Wie in den vorherigen Kapiteln beschrieben, gehören die Einsatzoptionen zur Absicherung der Produktion zum aktuellen Stand der Technik (siehe Kapitel 2.1). Diese Einschätzung teilen auch die Experten in den Interviews. Die aktuell am häufigsten genutzte Einsatzoption ist laut Experten die USV, immer relevanter werden jedoch die Eigenverbrauchsoptimierung und die Netzentgeltreduktion. Abbildung 7 zeigt die Einsatzoptionen, für welche die Nutzer der Umfrage den Energiespeicher nutzen (n = Anzahl der Antworten, m = Anzahl der Teilnehmer).

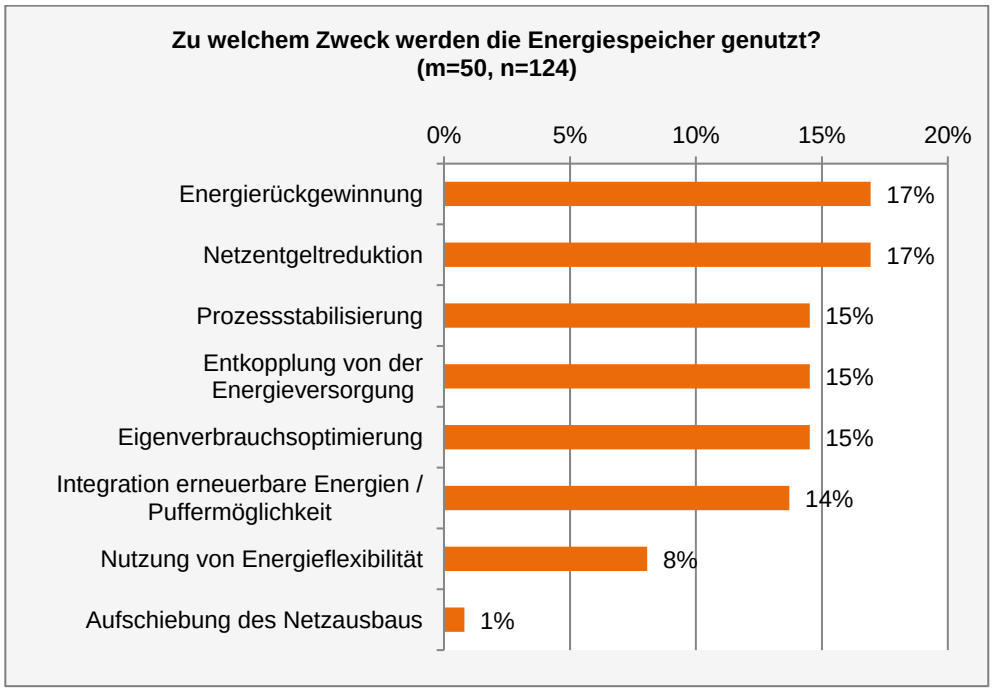


*Abbildung 7 Aktuelle Einsatzoptionen der bereits integrierten Energiespeicher*

Dabei ist zu erkennen, dass die Umfrageteilnehmer, ähnlich der Expertenaussagen, die Einsatzoptionen zur Optimierung des Energiebezugs (Energierückgewinnung, Netzentgeltreduktion und Eigenverbrauchsoptimierung) an erster Stelle sehen (49 %). An zweiter Stelle steht die Absicherung der Produktion 30 % (Prozessstabilisierung und Entkopplung von der Energieversorgung). Die Einsatzoptionen, die netzdienlich sind, spielen eher eine untergeordnete Rolle oder stellen ein Nebeneffekt aus anderen Einsatzoptionen dar. Dies zeigt deutlich, dass die Einsatzoptionen zur Effizienz- und Flexibilitätssteigerung für Unternehmen zunehmend interessanter werden.

Je nach Einsatzoption spielt auch der physische Integrationspunkt für den Energiespeicher eine Rolle, d.h. auf welcher Produktionsebene die Integration eines Energiespeichers stattfand bzw. stattfinden würde. Bei der Frage nach dem Integrationspunkt anhand der Produktionsebenen ergibt sich aus den Experteninterviews kein klares Bild, da dies zu stark von der jeweiligen Einsatzoption und Unternehmensgröße abhängt. Die Ergebnisse der Umfrageteilnehmer zeigen ein zweigeteiltes Bild zwischen Nutzern und Interessierten (siehe Abbildung 8).

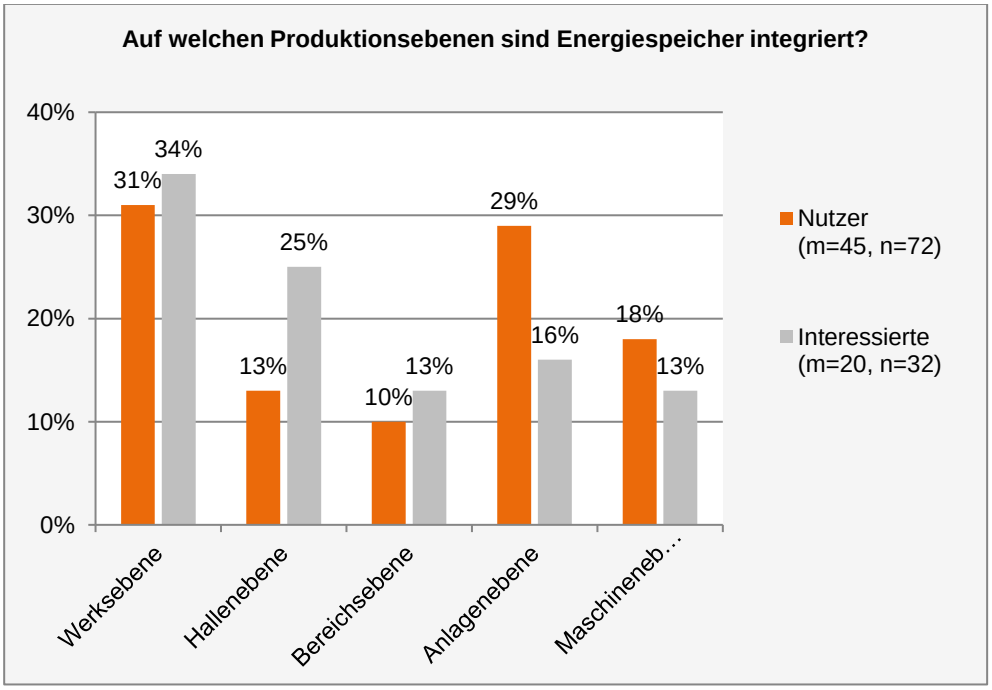


*Abbildung 8 Integrationspunkt einer Energiespeicherintegration nach Produktionsebenen*

Die Befragten, die bereits einen Energiespeicher nutzen, tun dies zu 44 % in zentralen großen Energiespeichern auf Werks- oder Hallenebene oder zu 47 % in kleinen dezentralen Energiespeichern auf Maschinen- und Anlageneben. Dieses Ergebnis spiegelt auch die Fragestellung wider, inwiefern ein großer zentraler Energiespeicher oder mehrere dezentrale kleine Energiespeicher für eine Energiespeicherintegration in Frage kommen. Demgegenüber würden 59 % der Interessierten bevorzugen, einen Energiespeicher auf Werks- oder Hallenebene zu integrieren. Eine Energiespeicherintegration auf den unteren Produktionsebenen wird von den Interessierten nicht so stark befürwortet wie von den Nutzern. Der Grund für die Tendenz hin zu einem großen zentralen Energiespeicher kann im geringeren technischen Integrationsaufwand liegen, da der Fertigungsprozess, die eigentliche Kernkompetenz des Unternehmens, von einem zentralen großen Energiespeicher nicht betroffen ist. Ein weiterer Vorteil von zentralen Energiespeichern ist, die Möglichkeit, das Werk oder die Halle energetisch vollständig vom Netz zu entkoppeln. Jedoch muss als Gegenargument festgehalten werden, dass die großen zentralen Energiespeicher sehr teuer in der Anschaffung sind, da dies meist individuelle Lösungen sind.

Abhängig vom physischen Integrationspunkt sind die Größen des Energiespeichers hinsichtlich Leistung und Kapazität. Abbildung 9 zeigt, welche Größenordnungen für Energiespeicheranwendungen für die befragten Nutzer und Interessierten in Frage kommen.

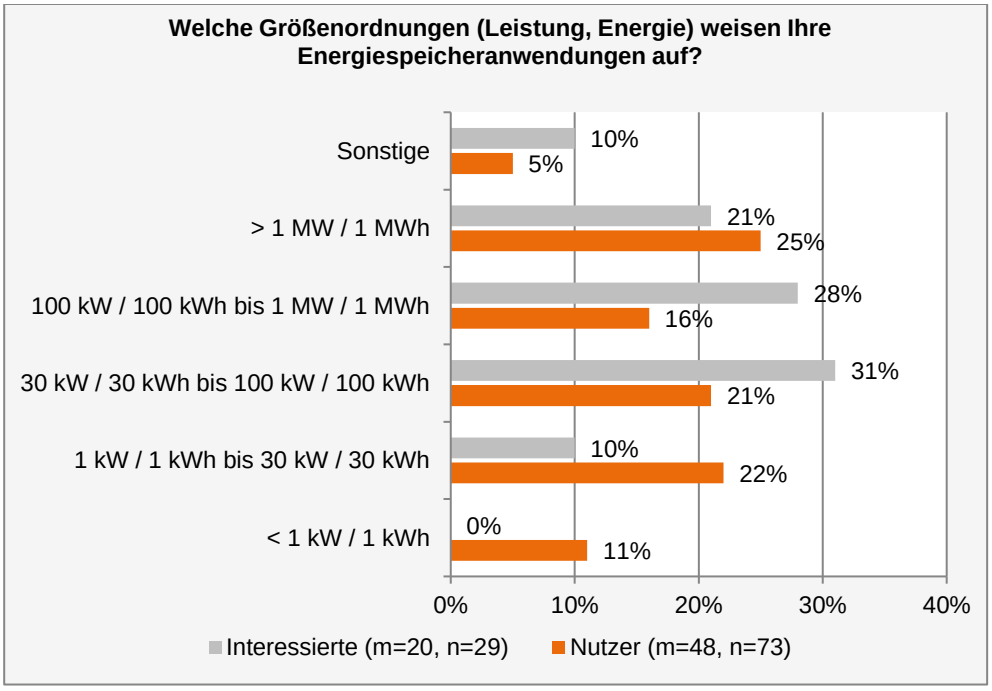


*Abbildung 9 Größenordnungen der Energiespeicher*

Auch in dieser Auswertung ist ersichtlich, dass im Vergleich zwischen Nutzern und Interessierten die Nutzer sowohl kleine als auch große Energiespeicher einsetzen. Die Experten kamen zu einem sehr ähnlichen Ergebnis. Durch die Einsatzoption der USV wurden bisher vor allem Energiespeicher mit kleiner Kapazität integriert, jedoch werden laut Experten auch bereits Energiespeicher in der Leistungsklasse zwischen 30 und 150 kW eingesetzt. Die Interessierten tendieren zum Großteil zu größeren Energiespeichern (80 %). Dabei spielen besonders Energiespeicher mit einer Leistung von 30 kW bis über 1 MW und einer Kapazität von 30 kWh bis zu 1 MWh eine Rolle.

Die Größenordnung und der physische Integrationspunkt sind sehr stark von der jeweiligen Einsatzoption abhängig. Jedoch zeigen die Antworten bei den Interessierten den Trend zu einem größeren zentralen Energiespeicher. Die Einsatzoptionen zur Optimierung des energetischen Bezugs wie die Netzentgeltreduktion oder Eigenverbrauchsoptimierung, werden für Unternehmen zunehmend interessanter. Der Vorteil dieser großen zentralen Energiespeicher liegt in der Möglichkeit, sie multifunktional einsetzen zu können (Kanngießer, 2013, S. 59). Dies kann zu einer besseren Wirtschaftlichkeit führen.

**Kernaussagen Kapitel 2:**

1. Die Einsatzoptionen für Energiespeicher in Produktionssystemen können nach dem ökonomischen Nutzen in die Kategorien „Absicherung der Produktion“, „Optimierung des Energiebezugs“ und „Bereitstellung von Systemdienstleistungen“ eingeteilt werden.
2. Die aktuellen regulatorischen Rahmenbedingungen sorgen dafür, dass die gespeicherte Energie doppelt (einspeichern und ausspeichern) mit Steuern und Abgaben belastet wird. Jedoch gibt es mittlerweile Befreiungen bzw. Sondergenehmigungen unter bestimmten Voraussetzungen.
3. Bisher wurden Energiespeicher hauptsächlich zur Absicherung der Produktion genutzt, Einsatzoptionen zur Optimierung des Energiebezugs gewinnen aber zunehmend an Bedeutung.
4. Während Energiespeicher aktuell in verschiedenen Größen auf unterschiedlichen Produktionsebenen eingesetzt werden, gibt es ein Interesse an großen, zentralen Energiespeichern mit multifunktionaler Nutzung.

# 3
# Status quo Energiespeichertechnologien

Zur Energiespeicherung gibt es viele unterschiedliche Möglichkeiten und Technologien. Der Begriff „Energiespeicher“ wird nach Bauer (2017, S. 26) wie folgt definiert:

„Ein Energiespeicher ist eine energietechnische Anlage zur Speicherung von Energie in Form von innerer, potentieller oder kinetischer Energie. Ein Energiespeicher umfasst die drei Prozesse Einspeichern (Laden), Speichern (Halten) und Ausspeichern (Entladen) in einem Zyklus. Diese werden physikalisch in Form von Energiewandlern (Ein- und Ausspeichern), einer Speichereinheit (Halten) und Hilfsaggregaten realisiert, weshalb die gesamte Anlage auch als Energiespeichersystem bezeichnet wird.“

Aufgrund der hohen Anzahl von unterschiedlichen Energiespeichertechnologien, gibt es neben dieser Definition eine Vielzahl von Unterscheidungsmerkmalen, um die Energiespeichertechnologien zu klassifizieren und voneinander abzugrenzen. Ein Unterscheidungsmerkmal ist die Form der gespeicherten Energie (physikalische Klassifikation). Abbildung 10 zeigt die Klassifikation nach der Form der gespeicherten Energie.

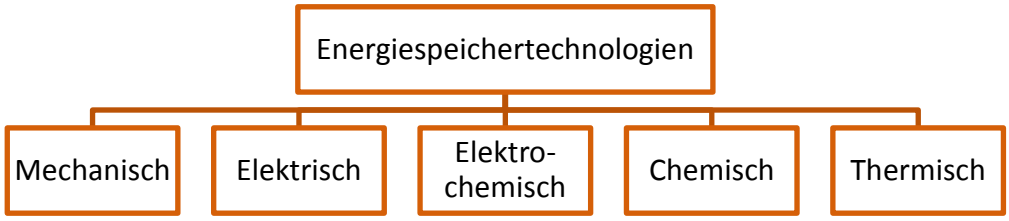


*Abbildung 10 Physikalische Klassifikation von Energiespeichertechnologien in Anlehnung an (Bauer 2017, S. 36f.)*

Bei mechanischen Energiespeichern wird die Energie in Form von kinetischer Energie gespeichert. Ein Beispiel hierfür sind Schwungmassenspeicher. Die elektrischen Energiespeicher, wie beispielsweise Kondensatoren, speichern ihre Energie in einem elektrostatischen Feld. In der Kategorie der elektrochemischen Energiespeicher gibt es viele unterschiedliche Energiespeichertechnologien, wie zum Beispiel Lithium-Batterien. Hier wird die Energie in chemischen Verbindungen der Elektroden der Batterie gespeichert. Die chemischen Energiespeicher sind wie die thermischen Energiespeicher hauptsächlich für mittel- bis langfristige Energiespeicherungen geeignet. (Bauer, 2017, S. 36)

Die Energie wird in einer chemischen Verbindung gespeichert. Hierzu zählt beispielsweise die Energiespeicherung durch Power-to-Gas-Verfahren. Bei thermischen Energiespeichern wird die Energie in Form von Wärme oder Kälte gespeichert. Dabei wird unterschieden zwischen sensiblen, latenten und thermochemischen Energiespeichern. (Bauer, 2017, S. 36)

Wie bereits in Kapitel 2 erwähnt, werden in dieser Studie die chemischen Energiespeichertechnologien nicht betrachtet, da das Ziel der Studie der Einsatz von Energiespeichern für eine kurz- bis mittelfristige Energiespeicherung ist und chemische Energiespeicher für eine langfristige Energiespeicherung in Frage kommen.

In den folgenden Unterkapiteln werden unterschiedliche Energiespeicher-technologien vorgestellt und anhand von technischen und ökonomischen Kennzahlen beschrieben. Für die Energiespeichertechnologien werden die unterschiedlichen technischen Integrationsmöglichkeiten vorgestellt. Dabei können die mechanischen, elektrischen und elektrochemischen Energiespeichertechnologien zu Stromspeicher-technologien zusammengefasst werden. Die Stromspeichertechnologien werden laut Zapf (2017, S. 96) wie folgt definiert:

„Stromspeicher kennzeichnen diejenigen Energiespeicher, die durch Stromfluss elektrische Energie, ggf. über einen Energiewandler und ggf. in eine andere Energieform, laden und zeitversetzt wieder elektrische Energie abgeben können."

Auch die thermischen Energiespeichertechnologien werden erläutert. Die Stromspeichertechnologien sowie thermischen Energiespeichertechnologien werden anhand der Kennzahlen sowie der Umfrageergebnisse beschrieben und verglichen.

## 3.1 Überblick über Kennzahlen von Stromspeichertechnologien

In diesem Kapitel werden die relevanten Stromspeichertechnologien vorgestellt, die für eine kurz- bis mittelfristige Energiespeicherung für industrielle Einsatzoptionen in Frage kommen. Stromspeichertechnologien für eine langfristige Speicherung, wie beispielsweise Power-to-X-Verfahren, wurden nicht berücksichtigt. Ebenfalls nicht berücksichtigt wurden Nickel-Batterien. Diese sind zwar prinzipiell für stationäre Anwendungen geeignet, aber laut Andresen et al. (2017, S. 39) wird dieser Technologie keine große Bedeutung zugemessen.

Tabelle 16 zeigt die betrachteten Stromspeichertechnologien, die in diesem Kapitel vorgestellt werden, unterteilt nach ihren physikalischen Eigenschaften der Energiespeicherung.

*Tabelle 16 Betrachtete Stromspeichertechnologien*

| **Mechanisch** | **Elektrisch** | **Elektrochemisch** |
|---|---|---|
| Schwungmassenspeicher | Kondensatoren | Blei-Säure-Batterien |
| | | Natrium-Batterien |
| | | Lithium-Batterien |
| | | Redox-Flow-Batterien |

Je nach Einsatzoption des Energiespeichers kann unterschieden werden zwischen einem „Energiespeicher“ und einem „Leistungsspeicher“. Diese Unterscheidung ist hilfreich bei der Auswahl der passenden Energiespeichertechnologie. Die Energiespeicherung dient der zeitlichen Entkopplung von Stromerzeugung und des Stromverbrauchs in Kurz- und Mittelzeitintervallen. Bei der Leistungsspeicherung steht die abrufbare Leistung des Energiespeichers für kurze Zeiträume im Fokus, was dazu führt, dass die Lade- und Entladedauer des Energiespeichers eine wichtige Kenngröße bei der Auswahl der geeigneten Energiespeichertechnologie darstellt. (Fuchs et al., 2012, S. 23)

Um die unterschiedlichen Energiespeicher miteinander vergleichen zu können, werden diese anhand von Kennzahlen beschrieben. Neben den technischen Kennzahlen sind für die Bewertung von Energiespeichern auch ökonomische Kennzahlen erforderlich. Tabelle 17 zeigt die technischen und ökonomischen Kennzahlen inklusive deren Definition zur Beschreibung von Energiespeichertechnologien.

*Tabelle 17 Technische und ökonomische Kennzahlen von Energiespeichertechnologien (Bauer, 2017, S. 39-40[a] und S.46[b]; Andresen et al., 2017, S. 14[c])*

**Technische Kennzahlen**

| Kennzahl | Einheit | Definition |
|---|---|---|
| **Leistung** | $[W]$ | Leistung als Energie pro Zeit[a] |
| **Leistungsdichte** | $\left[\frac{W}{Kg}\right], \left[\frac{W}{m^3}\right]$ | Nutzbare Leistung pro Masse bzw. Volumen[a] |
| **Kapazität** | $[Wh]$ | Nutzbarer Energieinhalt des Energiespeichers[a] |
| **Energiedichte** | $\left[\frac{Wh}{Kg}\right], \left[\frac{Wh}{m^3}\right]$ | Nutzbare Energiemenge pro Masse bzw. Volumen[a] |
| **Ausspeicherdauer** | $[s]$ | Dauer des Ausspeichervorgangs (Entladevorgangs); auch E/P-Verhältnis (E/P-Ratio) genannt[a] |
| **Wirkungsgrad** | $[\%]$ | Effizienz eines Energiewandlungs- oder Speicherprozesses[a] |
| **Selbstentladung** | $\left[\frac{\%}{Tag}\right]$ | Anteil, der während einer Zeitspanne durch Selbstentladung verlorenen gespeicherten Energie[a] |
| **Kalendarische Lebensdauer** | $[a]$ | Technische Lebensdauer eines Energiespeichers samt Peripherie nach Jahren[a] |
| **Zyklische Lebensdauer** | $[Anzahl]$ | Maximale Anzahl von Zyklen eines Energiespeichers[a] |
| **Reaktionszeit** | $[s]$ | Dauer des Übergangs aus dem Stillstand in einen Betriebszustand, aus dem unmittelbar die Ein- oder Ausspeicherung erfolgen kann[c] |

| Ökonomische Kennzahlen | | |
|---|---|---|
| **Leistungsspezifische Investitionskosten** | $\left[\frac{€}{kW}\right]$ | Einmalige Kosten, für Bau und Inbetriebnahme des Energiepeichers, bezogen auf die installierte Leistung[b] |
| **Energiespezifische Investitionskosten** | $\left[\frac{€}{kWh}\right]$ | Einmalige Kosten für Bau und Inbetriebnahme des Energiespeichers, bezogen auf die installierte Speicherkapazität[b] |
| **Betriebskosten** | $\left[\frac{€}{kWh}\right]$ | Kosten, die beim Betrieb des Speichers entstehen. Diese können nach fixen und variablen Betriebskosten differenziert werden: Fix: Kosten, die zum Betrieb des Energiespeichers anfallen, unabhängig von dessen Auslastung<br>Variabel: Kosten, die nur für den Energieumsatz in einem Energiespeicher anfallen[b] |

In den folgenden Unterkapiteln werden die einzelnen Stromspeichertechnologien vorgestellt, anhand der Kennzahlen beschrieben, die möglichen Einsatzoptionen aufgezeigt sowie Vor- und Nachteile erläutert.

### 3.1.1 Schwungmassenspeicher

Der Schwungmassenspeicher (SMS) zählt zu den mechanischen Energiespeichertechnologien und speichert die elektrische Energie durch eine rotierende Masse in kinetischer Energie (Andresen et al., 2017, S. 26). Die rotierende Masse kann dabei 5.000 bis 100.000 Umdrehungen pro Minute erreichen (Kurzweil und Dietlmeier, 2018, S. 10). Das Schwungrad ist in einem Vakuum oder einer Gasumgebung gelagert, um die Luftreibungsverluste zu minimieren (Bauer et al., 2017, S. 553). Tabelle 18 zeigt die technischen und ökonomischen Kennzahlen von Schwungmassenspeichern.

*Tabelle 18 Technische und ökonomische Kennzahlen von Schwungmassenspeichern (Köhler et al., 2018, S. 30[a]; Rundel et al., 2013, S. 30[b]; Thema, 2017, S. 649[c]; Andresen et al., 2017, S. 81[d]; Fraunhofer ISI, 2015, S. 23[e])*

| **Technische Kennzahlen** | **Schwungmassenspeicher** |
|---|---|
| Leistung | 1 bis 10.000 kW[a] |
| Leistungsdichte | 10 kW pro kg[b] |
| Kapazität | bis zu 5.000 kWh (skalierbar)[a] |
| Energiedichte | 5 bis 90 Wh pro kg[c] |
| Ausspeicherdauer | 5 s bis 35 Min[d] |
| Wirkungsgrad | 83 bis 93 %[c] |
| Selbstentladungsrate | 72 bis 100 % pro Tag[c] |
| Kalendarische Lebensdauer | 15 bis 20 Jahre[e] |
| Zyklische Lebensdauer | Über 1 Mio.[c] |
| Reaktionszeit | Millisekunden[b] |
| **Ökonomische Kennzahlen** | |
| Leistungsspezifische Investitionskosten | 125 bis 275 € pro kW[c] |
| Energiespezifische Investitionskosten | 650 bis 2.625 € pro kWh[c] |
| Betriebskosten | Fix: 1 € pro kWh[c] |

Die technischen Kennzahlen von Schwungmassenspeichern sind vergleichbar mit den Kennzahlen von Kondensatoren (siehe Kapitel 3.1.2). Schwungmassenspeicher haben eine hohe Leistungsdichte, geringe Energiedichte und eine hohe Selbstentladung von bis zu 100 % pro Tag (Thema, 2017, S. 649). Ebenso ist die zyklische Lebensdauer von mehr als einer Millionen Zyklen sehr hoch. Ein Kilowatt Leistung kostet bis zu 275 €, während eine Kilowattstunde bis zu 2.625 € kostet (Thema, 2017, S. 649). Die Darstellung der Kosten verstärkt noch einmal die Aussage, dass Schwungmassenspeicher auch betriebswirtschaftlich für Einsatzoptionen sinnvoll sind, bei denen eine hohe Leistung über einen kurzen Zeitraum gefordert wird.

Die Nachteile von Schwungmassenspeichern sind die hohen energiespezifischen Kosten, die hohe Selbstentladung sowie die Gefahr, dass die Schwungmassen bersten (Andresen et al., 2017, S. 28). Eine hohe Leistungsfähigkeit und eine hohe zyklische Lebensdauer sind große Vorteile der Technologie (Andresen et al., 2017, S. 28). Geeignet ist der Schwungmassenspeicher für den Einsatz als USV, die Reduktion der Maximalleistung oder die Spannungshaltung (Kurzweil und Dietlmeier, 2018, S. 10).

### 3.1.2 Kondensatoren

Kondensatoren (Supercaps) speichern die Energie durch die Bildung eines elektrischen Feldes. Dazu sind zwei gegenüberliegende Elektroden erforderlich, welche durch ein Dielektrikum getrennt werden. Als Besonderheit wird die Kapazität von Kondensatoren in Farad [F] beschrieben. (Sterner und Stadler, 2017, S. 197 f.)

Die Kondensatoren können unterteilt werden in Doppelschichtkondensatoren, Superkondensatoren und Hybridkondensatoren. Der Unterschied liegt in der Art des Dielektrikums und in der Anordnung der einzelnen Kapazitäten. Bei Superkondensatoren kommt zusätzlich zur Doppelschichtkapazität eine Pseudokapazität hinzu (Stadler, 2017, S. 200). Insgesamt können Kondensatoren durch die technischen und ökonomischen Kennzahlen aus Tabelle 19 beschrieben werden.

*Tabelle 19 Technische und ökonomische Kennzahlen von Kondensatoren (Köhler et al., 2018, S. 30[a], S.123[b]; Kurzweil und Dietlmeier, 2018, S. 31[c]; Andresen et al., 2017, S. 84[d]; Thema, 2017, S. 649[e], Fraunhofer ISI, 2015, S. 23[f]; Bauer, 2017, S. 46[g])*

| **Technische Kennzahlen** | **Kondensatoren** |
|---|---|
| Leistung | 10 bis 200.000 kW[a] |
| Leistungsdichte | 800 bis 1.200 W pro kg[c] |
| Kapazität | Modularer Aufbau Wh bis kWh[d] |
| Energiedichte | 0,11 bis 10 Wh pro kg[e] |
| Ausspeicherdauer | < 30 s[d] |
| Wirkungsgrad | 90 bis 95 %[e] |
| Selbstentladungsrate | bis zu 40 % pro Tag[b] |
| Kalendarische Lebensdauer | 10 Jahre[e] |
| Zyklische Lebensdauer | bis zu 1 Mio.[d] |
| Reaktionszeit | Millisekunden[f] |
| **Ökonomische Kennzahlen** | |
| Leistungsspezifische Investitionskosten | 125 bis 300 € pro kW[e] |
| Energiespezifische Investitionskosten | 5.150 bis 12.000 € pro kWh[e] |
| Betriebskosten | 1 bis 5 % der Investitionskosten pro Jahr[g] |

Die Leistungsdichte ist im Vergleich zur Energiedichte bei Kondensatoren viel höher. Ebenso ist die Ausspeicherdauer sehr kurz, was Kondensatoren dazu befähigt, über einen kurzen Zeitraum viel Leistung bereitzustellen, ähnlich wie Schwungmassenspeicher. Die Speicherung einer Energiemenge über einen längeren Zeitraum ist nicht sinnvoll, auch aufgrund der hohen Selbstentladung von 40 % pro Tag. Die zyklische Lebensdauer ist mit einer Million Zyklen sehr hoch. Der Vergleich der leistungsspezifischen mit den energiespezifischen Investitionskosten verdeutlicht, dass Kondensatoren nicht für die Energiespeicherung, sondern für die Leistungsspeicherung geeignet sind.

### 3.1.3 Blei-Säure-Batterien

Eine der bekanntesten und ältesten elektrochemischen Energiespeichertechnologien ist die Blei-Säure-Batterie (Bl-B) (Riegel et al., 2017, S. 247). Außerhalb des Consumer-Bereichs ist die Blei-Säure-Batterie auch im 21. Jahrhundert die am häufigsten eingesetzte Energiespeichertechnologie (Riegel et al., 2017, S. 217). Die beiden größten Absatzmärkte für Blei-Säure-Batterien sind nach wie vor der Markt für Starterbatterien von Autos und der Markt für USV-Systeme (Elsner und Sauer, 2015, S. 22). Der Unterschied zu anderen Batteriesystemen ist die Beteiligung des Elektrolyten an der chemischen Reaktion (Riegel et al., 2017, S. 252). Die Skalierung sowohl hinsichtlich Leistung als auch Kapazität ist beliebig (Elsner und Sauer, 2015, S. 23). Tabelle 20 zeigt die technischen und ökonomischen Kennzahlen von Blei-Säure-Batterien.

*Tabelle 20 Technische und ökonomische Kennzahlen von Blei-Säure-Batterien (Köhler et al., 2018, S. 30[a]; Kurzweil und Dietlmeier, 2018, S. 19[b]; Riegel et al., 2017, S. 250[c]; Elsner und Sauer, 2015, S. 23[d]; Thema, 2017, S.649[e])*

| **Technische Kennzahlen** | **Blei-Säure-Batterie** |
|---|---|
| Leistung | bis zu 50.000 kW (skalierbar)[a] |
| Leistungsdichte | 75 bis 300 W pro kg[b] |
| Kapazität | bis zu 50.000 kWh (skalierbar)[a] |
| Energiedichte | 25 bis 40 Wh pro kg[c] |
| Ausspeicherdauer | 1 bis 10 h[d] |
| Wirkungsgrad | 74 bis 89 %[e] |
| Selbstentladung | 2 bis 5 % im Monat[b] |
| Kalendarische Lebensdauer | 10 Jahre[e] |
| Zyklische Lebensdauer | 203 bis 1.500[e] |
| Reaktionszeit | < 50 ms[d] |
| **Ökonomische Kennzahlen** | |
| Leistungsspezifische Investitionskosten | 200 bis 490 € pro kW[e] |
| Energiespezifische Investitionskosten | 90 bis 355 € pro kWh[e] |
| Betriebskosten | Fix: 0,16 bis 0,76 € pro kWh[e] |

Die Leistungsdichte und die Energiedichte von Blei-Säure-Batterien sind akzeptabel, gerade im Hinblick auf stationäre Anwendungen (Elsner und Sauer, 2015, S. 24). Das Ende der Lebensdauer einer Blei-Säure-Batterie ist nach DIN 43539/Teil 4 dann erreicht, wenn die Speicherfähigkeit auf weniger als 80 % der Nennkapazität abgesunken ist (Riegel et al., 2017, S. 262). Die Investitionskosten von Blei-Säure-Batterien sind gering im Vergleich zu anderen Technologien. Es gibt weltweit bereits viele Hersteller von Blei-Säure-Batterien und durch den Aufbau weiterer Massenproduktion könnten sich die Kosten für Blei-Säure-Batterien noch weiter reduzieren. In Zukunft könnte das Schwermetall Blei jedoch zum Risiko werden, da hier immer wieder über Verbote diskutiert wird. Bei entsprechender Kostenreduzierung könnte aufgrund erhöhter Konkurrenz durch Lithium-Ionen-Batterien auch eine Schwächung der Marktposition von Blei-Säure-Batterien eintreten. (Elsner und Sauer, 2015, S. 25)

Dies führt auch zu einem der größten Nachteile der Blei-Säure-Batterie, der begrenzten zyklischen Lebensdauer. Jedoch ist die Blei-Säure-Batterie eine der günstigsten Energiespeichertechnologien, da diese, wie bereits erwähnt, durch den Markt der Kfz-Starterbatterien in Serie gefertigt wird. Bis 2050 sollen sowohl kalendarische Lebensdauer als auch Wirkungsgrad erhöht werden. (Elsner und Sauer, 2015, S. 23). Die Einsatzgebiete von Blei-Säure-Batterien im stationären Bereich sind die USV und die Eigenverbrauchsoptimierung (Andresen et al., 2017, S. 30).

### 3.1.4 Natrium-Hochtemperatur-Batterien

Zu den Natrium-Hochtemperatur-Batterien (Na-B) gehören die Natrium-Nickel- sowie die Natrium-Schwefel-Batterien (Riegel et al., 2017, S. 281). Diese werden deshalb als Hochtemperatur-Batterien bezeichnet, weil sie eine Betriebstemperatur von 270 bis 350°C benötigen (Riegel et al., 2017, S. 281). Die Einzelzelle besteht aus einer Anode aus geschmolzenem Natrium und einer Kathode aus Grafitgewebe, welches in Schwefel getränkt wird (Andresen et al., 2017, S. 36). Im Vergleich zu anderen Technologien wird bei Natrium-Hochtemperatur-Batterien ein fester Elektrolyt verwendet (Riegel et al., 2017, S. 281). In Tabelle 21 werden die technischen und ökonomischen Kennzahlen von Natrium-Schwefel-Batterien aufgezeigt.

*Tabelle 21 Technische und ökonomische Kennzahlen von Natrium-Hochtemperatur-Batterien (Köhler et al., 2018, S. 30[a]; Riegel et al., 2017, S. 312[b]; Thema, 2017, S. 649[c]; Elsner und Sauer, 2015, S. 36[d])*

| **Technische Kennzahlen** | **Natrium-Batterien** |
|---|---|
| Leistung | Skalierbar (bis zu zweistellige MW)[a] |
| Leistungsdichte | 200 W pro kg[b] |
| Kapazität | Skalierbar (bis zu dreistellige MWh)[a] |
| Energiedichte | 100 bis 165 Wh pro kg[c] |
| Ausspeicherdauer | 1 bis 10 Stunden[d] |
| Wirkungsgrad | 72 bis 81 %[c] |
| Selbstentladungsrate | 1,5 % pro Monat[d] |
| Kalendarische Lebensdauer | 10 bis 20 Jahre[a] |
| Zyklische Lebensdauer | 2.500 bis 8.250[c] |
| Reaktionszeit | < 10 ms[d] |
| **Ökonomische Kennzahlen** | |
| Leistungsspezifische Investitionskosten | 285 bis 1.075 € pro kW[c] |
| Energiespezifische Investitionskosten | 265 bis 645 € pro kWh[c] |
| Betriebskosten | Fix: 0,07 bis 0,76 € pro kWh[c] |

Als Stärke von Natrium-Hochtemperatur-Batterien ist die kalendarische Lebensdauer von 10 bis 20 Jahren hervorzuheben. Im Gegensatz zur kalendarischen Lebensdauer fällt die zyklische Lebensdauer mit 2.500 bis 8.250 Zyklen vergleichsweise gering aus. Durch den Unterschied zwischen kalendarischer und zyklischer Lebensdauer eignet sich die Natrium-Hochtemperatur-Batterie für Einsatzoptionen, in welchen lange Zeitabstände zwischen zwei Zyklen liegen, da auch die Selbstentladungsrate mit 1,5 % pro Monat gering ist. Zudem sollen laut Elsner und Sauer (2015, S. 36) durch Weiterentwicklung der Technologie bis 2050 sowohl die kalendarische Lebensdauer als auch der Wirkungsgrad verbessert werden. Es sollen Wirkungsgrade von 83 bis 91 % und kalendarische Lebensdauern von 21 bis 43 Jahren erreicht werden können. Die ökonomischen Kennzahlen sind nahezu vergleichbar mit denen der Blei-Säure-Batterie.

Durch den Ausbau der Fertigung von Natrium-Hochtemperatur-Batterien können die energiespezifischen Investitionskosten bis 2050 voraussichtlich auf 53 bis 165 € pro kWh reduziert werden (Elsner und Sauer, 2015, S. 36). Der größte Nachteil von Natrium-Hochtemperatur-Batterien liegt in der erforderlichen hohen Betriebstemperatur, da hierdurch ein Sicherheitsrisiko durch Brandgefahr besteht (Elsner und Sauer, 2015, S. 37). Jedoch ist die Technologie gut skalierbar und kann durch die lange kalendarische Lebensdauer mit den Blei-Säure-Batterien und den Lithium-Batterien mithalten (Elsner und Sauer, 2015, S. 37).

### 3.1.5 Lithium-Batterien

Lithium-Batterien (Li-B) können unterschieden werden in Systeme mit metallischem Lithium und in Systeme ohne metallisches Lithium. Die Lithium-Batterien ohne metallisches Lithium werden Lithium-Ionen-Batterien genannt. Der Energiespeichervorgang bei Lithium-Batterien wird durch den Austausch von Li-Ionen in Aktivmaterialien durchgeführt. (Riegel et al., 2017, S. 281-283)

In dieser Studie werden Lithium-Batterien gesamthaft betrachtet. Die technischen und ökonomischen Kennzahlen von Lithium-Batterien werden in Tabelle 22 aufgelistet.

Auch für Lithium-Batterien gilt, dass sie beliebig skalierbar sind. Der Vorteil von Lithium-Batterien ist das gute Verhältnis von Leistung zu Energie (Korthauer, 2013, S. 15). Ein weiterer Vorteil ist der hohe Wirkungsgrad zwischen 90 und 97 %. Ein Nachteil ist aktuell noch die begrenzte Lebensdauer, sowohl kalendarisch als auch zyklisch. Die kalendarische und die zyklische Lebensdauer sollen jedoch bis 2050 auf 14 bis 30 Jahre bzw. bis zu 12.000 Zyklen verbessert werden (Elsner und Sauer, 2015, S. 31). Die energie- und leistungsspezifischen Investitionskosten von Lithium-Batterien sind gleich. Jedoch stellen die derzeit vergleichsweise hohen Gesamt-Investitionskosten eine der größten Schwächen von Lithium-Batterien dar. Durch den Trend der Elektromobilität im Verkehrssektor können sich in Zukunft die Stückzahlen erhöhen und damit eine Kostendegression erzielt werden. Ein weiterer Nachteil ist das aufwendige Batteriemanagementsystem, da Lithium-Batterien bei einem Thermal-Runaway leicht entflammbar sind. Dies und die steigenden Rohstoffpreise von Lithium führen zu Akzeptanzproblemen. Die Vorteile sind neben der hohen Leistungsfähigkeit und hohen Energiedichte, die geringe Selbstentladung und die hohe Effizienz. Aufgrund ihrer flexiblen Einsetzbarkeit haben Lithium-Batterien das Potenzial, den Markt in Zukunft zu dominieren. (Elsner und Sauer, 2015, S. 32f.)

*Tabelle 22 Technische und ökonomische Kennzahlen von Lithium-Batterien (Köhler et al., 2018, S. 30[a]; Riegel et al., 2017, S. 312[b]; Thema, 2017, S. 649[c]; Elsner und Sauer, 2015, S. 36[d])*

| **Technische Kennzahlen** | **Lithium-Batterien** |
|---|---|
| Leistung | skalierbar bis zu mehreren tausend kW[a] |
| Leistungsdichte | 1.500 W pro kg[b] |
| Kapazität | skalierbar bis zu ein- bis zweistelligem MWh-Bereich[a] |
| Energiedichte | 110 bis 190 Wh pro kg[c] |
| Ausspeicherdauer | 0,5 bis 10 Stunden[d] |
| Wirkungsgrad | 90 bis 97 %[c] |
| Selbstentladung | 0,008 bis 0,041 % pro Tag[c] |
| Kalendarische Lebensdauer | 15 Jahre[c] |
| Zyklische Lebensdauer | 400 bis 6.000[c] |
| Reaktionszeit | < 10ms[d] |
| **Ökonomische Kennzahlen** | |
| Leistungsspezifische Investitionskosten | 170 bis 600 € pro kW[c] |
| Energiespezifische Investitionskosten | 170 bis 600 € pro kWh[c] |
| Betriebskosten | Fix: 0,13 bis 0,76 € pro kWh[c] |

Lithium-Batterien können vor allem als Stunden- und Tagesspeicher, aber auch Sekunden- und Minutenspeicher eingesetzt werden (Andresen et al., 2017, S. 37). Die Einsatzgebiete für stationäre Anwendungen sind die USV, die Eigenverbrauchsoptimierung sowie die Primärregelenergiebereitstellung (Korthauer, 2013, S. 385).

### 3.1.6 Redox-Flow-Batterien

Redox-Flow-Batterien (RF-B) gehören zu den elektrochemischen Stromspeichern und speichern die elektrische Energie in voneinander getrennten flüssigen Elektrolyten (Elsner und Sauer, 2015, S. 38). Aktuell befindet sich die Energiespeichertechnologie noch im Entwicklungsstadium und ist noch nicht als Serienprodukt am Markt verfügbar, deshalb ist die Energie- und Leistungsdichte eher gering (Kurzweil und Dietlmeier, 2018, S. 353). Aufgebaut ist eine Redox-Flow-Batterie aus zwei Tanks mit den unterschiedlichen Elektrolyten. Die Tankgröße entscheidet über die Kapazität des Stromspeichers. Die Ladung bzw. Entladung erfolgt über einen mehrzelligen Stack (Andresen et al., 2017, S. 39).

Einer der größten Vorteile dieser Stromspeichertechnologie liegt darin, dass die Leistung und die Kapazität einer Redox-Flow-Batterie unabhängig voneinander dimensioniert werden können (Riegel et al., 2017, S. 315). Dadurch ist ihre Einsetzbarkeit im Vergleich zu anderen Batterien deutlich flexibler (Elsner und Sauer, 2015, S. 41). Tabelle 23 beschreibt die technischen und ökonomischen Kennzahlen von Redox-Flow-Batterien.

Die Stärken der Redox-Flow-Batterie liegen vor allem in der geringen Selbstentladung, der langen Lebensdauer und der guten Skalierbarkeit durch den modularen Aufbau (Elsner und Sauer, 2015, S. 41). Im Jahr 2050 soll die Redox-Flow-Batterie eine kalendarische Lebensdauer von 15 bis 29 Jahren aufweisen (Elsner und Sauer, 2015, S. 40). Weiterer Entwicklungsbedarf ist vor allem bei Leistungs- und Energiedichte sowie dem Wirkungsgrad erforderlich (Elsner und Sauer, 2015, S. 41). Die vergleichsweise hohen spezifischen Investitionskosten weisen darauf hin, dass sich die Technologie noch im Entwicklungsstadium befindet. Aufgrund der hohen leistungsspezifischen Investitionskosen von bis zu 1.790 € für ein Kilowatt und der vergleichsweise geringen kapazitätsspezifischen Investitionskosten von bis zu 700 €, eignet sich die Redox-Flow-Batterie eher als Energiespeicher anstatt als Leistungsspeicher. Beispielsweise können Redox-Flow-Batterien zur Zwischenspeicherung bei netzintegrierten PV- oder Windkraftanlagen eingesetzt werden sowie für den Spitzenlastausgleich oder als USV-System (Riegel et al., 2017, S. 315).

*Tabelle 23 Technische und ökonomische Kennzahlen von Redox-Flow-Batterien (Elsner und Sauer, 2015, S. 39[a]; Fraunhofer ISI, 2015, S. 23 [b]; Thema, 2017, S. 649[c]; Bauer, 2017, 46[d])*

| **Technische Kennzahlen** | **Redox-Fow-Batterien** |
|---|---|
| Leistung | 0,01 bis 5 MW[a] |
| Leistungsdichte | 0,5 bis 2 W pro l[b] |
| Kapazität | 0,1 bis 10 MWh[a] |
| Energiedichte | 16 bis 41 Wh pro kg[c] |
| Ausspeicherdauer | 1 bis 10 h[a] |
| Wirkungsgrad | 70 bis 79 %[c] |
| Selbstentladung | 0,3 % pro Tag[c] |
| Kalendarische Lebensdauer | 17,5 Jahre[c] |
| Zyklische Lebensdauer | 7.000 bis 15.000[c] |
| Reaktionszeit | Sekunden[a] |
| **Ökonomische Kennzahlen** | |
| Leistungsspezifische Investitionskosten | 710 bis 1.790 € pro kW[c] |
| Energiespezifische Investitionskosten | 250 bis 700 € pro kWh[c] |
| Betriebskosten | 1 bis 5 % der Investitionskosten pro Jahr[d] |

Die steigenden Rohstoffpreise können die Marktdurchdringung von Redox-Flow-Batterien gefährden (Elsner und Sauer, 2015, S. 41). Hinzu kommt, dass das Ende der Entwicklungsphase noch nicht abzuschätzen ist (Elsner und Sauer, 2015, S. 41). Für die Speicherung von Energie über nur wenige Stunden ist der Vorteil von Redox-Flow-Batterien gegenüber beispielsweise Blei-Säure-Batterien gering (Elsner und Sauer, 2015, S. 41). Redox-Flow-Batterien sind vor allem bei Anwendungen interessant, die ein großes Kapazitäts-zu-Leistungs-Verhältnis erfordern (Andresen et al., 2017, S. 39). Mögliche Einsatzgebiete sind der Lastspitzenausgleich, die Bereitstellung von Regelenergie sowie zentrale USV bzw. Back-Up-System (Sterner und Stadler, 2017, S. 324)

### 3.1.7 Vergleich der Stromspeichertechnologien

Ebenso wie die Einsatzoptionen für Energiespeicher in Produktionssystemen lassen sich die betrachteten Stromspeichertechnologien anhand der Kennzahlen in einem morphologischen Kasten vergleichen. Abbildung 11 zeigt den morphologischen Kasten für die betrachteten sechs Stromspeichertechnologien.

| Technologie / Kennzahl | SMS | Supercap | Bl-B | Li-B | Na-B | RF-B |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Leistung (max.)** | Bis 10 MW | | 10 – 50 MW | | > 50 MW | |
| **Leistungsdichte (max.)** | Bis 1 kW/Kg | | 1 – 5 kW/Kg | | > 5 kW/Kg | |
| **Kapazität (max.)** | Bis 5 MWh | | 5 – 10 MWh | | > 10 MWh | |
| **Energiedichte (max.)** | Bis 10 Wh/Kg | | 10 – 100 Wh/Kg | | > 100 Wh/Kg | |
| **Ausspeicherdauer (max.)** | Bis 30s | | 30s – 1h | | > 1h | |
| **Wirkungsgrad (Mittelwert)** | Bis 80 % | | 80 – 90 % | | > 90 % | |
| **Selbstentladerate (max.)** | Bis 1% pro Tag | | 1 – 50 % pro Tag | | > 50 % pro Tag | |
| **Kalendarische Lebensdauer (max.)** | Bis 10 Jahre | | 10 – 15 Jahre | | 15 – 20 Jahre | |
| **Zyklische Lebensdauer (max.)** | Bis 5.000 | | 5.000 – 15.000 | | > 15.000 | |
| **Reaktionszeit (max.)** | Bis 10 ms | | 10 – 100 ms | | > 100 ms | |
| **Leistungsspezifische Investitionskosten (Mittelwert)** | Bis 250 €/kW | | 250 – 500 €/kW | | > 500 €/kW | |
| **Energiespezifische Investitionskosten (Mittelwert)** | Bis 250 €/kWh | | 250 – 500 €/kWh | | > 500 €/kWh | |
| **Betriebskosten (Mittelwert)** | Bis 0,5 €/kWh | | 0,5 – 1 €/kWh | | 1 – 5 % der Investitionskosten/a | |

- Schwungmassenspeicher (SMS)
- Kondensator (Supercap)
- Blei-Säure-Batterie (Bl-B)
- Lithium-Batterie (Li-B)
- Natrium-Hochtemperatur-Batterie (Na-B)
- Redox-Flow-Batterie (RF-B)

*Abbildung 11 Vergleich der betrachteten Stromspeichertechnologien hinsichtlich ihrer Kennzahlen*

Im Vergleich der Kennzahlen der unterschiedlichen Stromspeichertechnologien zeigt sich, dass der Kondensator mit Abstand die größte Leistung, aber dafür nur eine sehr kurze Ausspeicherdauer bietet. Dies zeigt sich auch bei der Leistungsdichte und den geringen leistungsspezifischen Investitionskosten. Ähnliche Kennzahlen weist auch der Schwungmassenspeicher auf, womit beide Stromspeichertechnologien als Leistungsspeicher eingeordnet werden können. Die Selbstentladerate und die zyklische Lebensdauer beider Stromspeichertechnologien zeigen, dass diese gut für Einsatzoptionen geeignet sind, bei denen regelmäßig eine hohe Leistung über eine kurze Zeit gespeichert werden muss.

Auf der anderen Seite haben die Energiespeicher Blei-Säure-Batterie, Natrium-Batterien, Lithium-Batterien und Redox-Flow-Batterien eine deutlich größere Energiedichte bzw. geringere energiespezifische Investitionskosten. Blei-Säure-Batterien und Lithium-Batterien bieten die größte Kapazität mit mehr als 10 MWh. Die kalendarisch größte Lebensdauer weisen Lithium-Batterien und Redox-Flow-Batterien auf, obwohl diese noch nicht am Ender der Entwicklung stehen. Das zeigen die hohen spezifischen Investitionskosten im Vergleich zu den anderen Stromspeichertechnologien.

Die Ausspeicherdauer der unterschiedlichen Stromspeichertechnologien verdeutlicht den Unterschied zwischen Leistungsspeicher mit einer Ausspeicherdauer von bis zu maximal einer Stunde (Schwungmassenspeicher, Kondensator) und Energiespeichern (Blei-Säure-Batterie, Natrium-Batterien, Lithium-Batterien, Redox-Flow-Batterien) mit einer Ausspeicherdauer von mindestens einer Stunde.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass die Kennzahlen sich im Großen und Ganzen nur durch die Unterscheidung zwischen Leistungs- und Energiespeicher unterscheiden. Die Kennzahlen der einzelnen Stromspeichertechnologien in der jeweiligen Kategorie sind vergleichbar.

## 3.2 Thermische Energiespeichertechnologien

In der deutschen Industrie werden in etwa 75 % des Energiebedarfs für thermische Energie benötigt (BMWi, 2018, S. 29). Eine der Aufgaben von thermischer Energiespeicherung ist es, thermische Prozesse effektiver zu nutzen und den Energiebedarf zu senken (FVEE, 2015, S. 75; Corrodi und Bertsch, 2015, S. 4; Oertel, 2008, S. 28). Thermische Energiespeicherung kann zum Beispiel in den Bereichen der Kraft-Wärme-Kopplung, zur Nutzung von industrieller Abwärme und bei solaren Wärmeerzeugern sinnvoll eingesetzt werden, um überschüssige thermische Energie für einen späteren Zeitpunkt zwischen zu speichern (Neugebauer, 2014, S. 180).

Die thermische Energiespeicherung kann in drei Haupttechnologien unterteilt werden (FVEE, 2015, S. 76; Oertel, 2008, S. 181):

- die sensiblen Energiespeicher
- die latenten Energiespeicher
- die thermochemischen Energiespeicher

Unter dem Begriff „thermische Energie“ wird sowohl Kälte als auch Wärme verstanden (Oertel, 2008, S. 44). Abbildung 12 gibt einen Überblick zu den verschiedenen thermischen Energiespeichertechnologien und deren Entwicklungsstand.

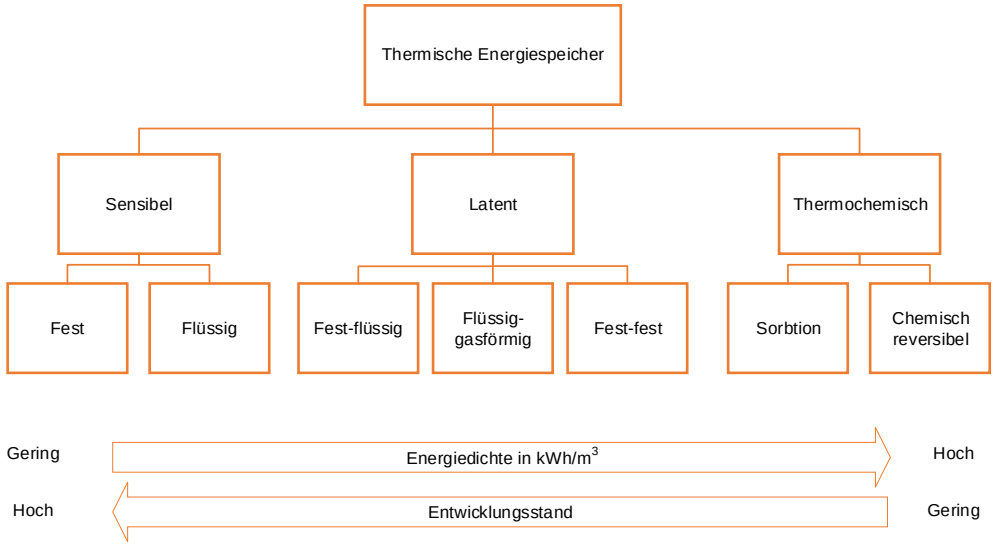


*Abbildung 12 Übersicht verschiedener thermischer Energiespeichertechnologien in Anlehnung an (Hauer, 2017, S. 582)*

In Abbildung 12 sind auf der linken Seite die sensiblen Energiespeicherformen aufgeführt, die eine vergleichsweise geringe Energiedichte in kWh/m³ bieten, dafür aber einen hohen Entwicklungsstand aufweisen. Die thermochemischen Energiespeicher weisen aktuell eine verhältnismäßig hohe Energiedichte in kWh/m³ auf, sind dafür allerdings auf dem niedrigsten Entwicklungsstand. Die latenten Energiespeicher schließen diese Lücken und liegen dementsprechend zwischen den anderen Technologien. (Hauer, 2017, S. 582)

Anhand der Umfrageergebnisse lässt sich für die thermischen Energiespeichertechnologien ein klarer Trend hin zu latenten Technologien erkennen (siehe Abbildung 13).

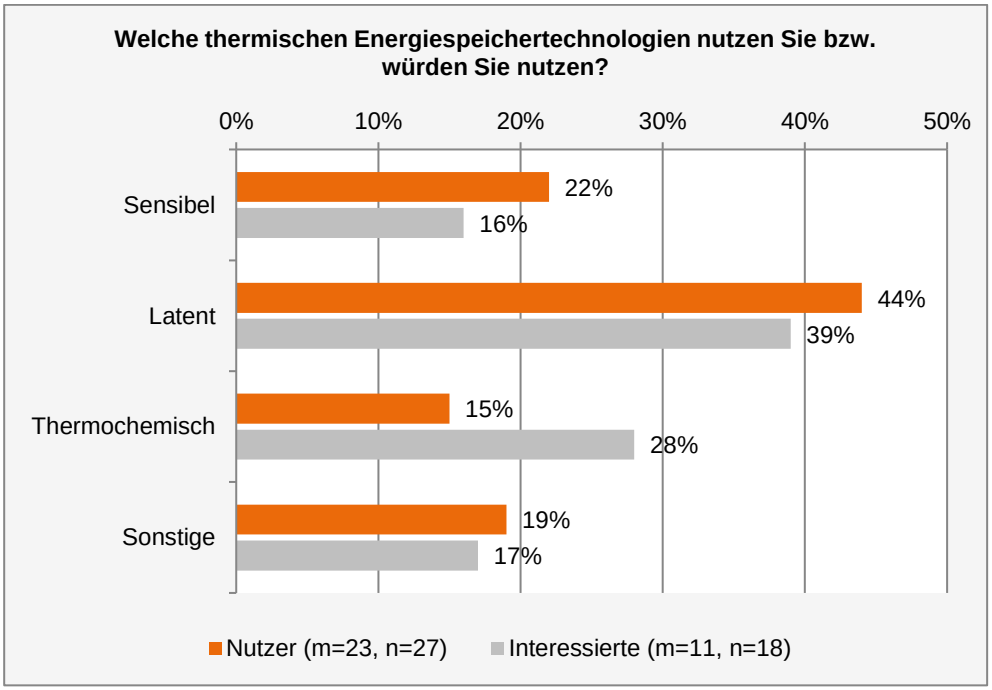


*Abbildung 13 Aktueller Fokus auf Technologien zur Speicherung thermischer Energie*

Die latenten Energiespeichertechnologien werden aktuell mit einem Anteil von 44 % von den meisten Unternehmen eingesetzt. Diesen folgen die sensiblen Energiespeicher mit 22 %. Das Interesse, thermische Energiespeicher im Unternehmen zu nutzen, liegt hauptächlich bei den thermochemischen und latenten Technologien (siehe Abbildung 14).

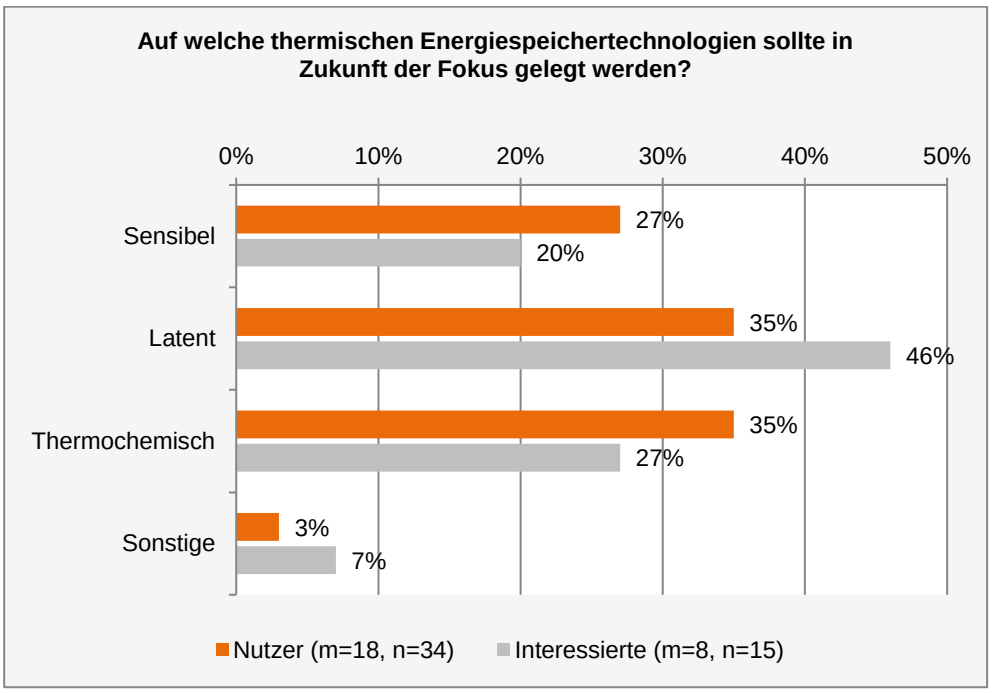


*Abbildung 14 Zukünftiger Fokus auf Technologien zur Speicherung von thermischer Energie*

Laut den Nutzern soll der zukünftige Forschungsfokus mit jeweils 35 % auf latenten und thermochemischen Energiespeichern liegen. Energiespeicherinteressierte sehen mit 46 % den Forschungsbedarf bei latenten Energiespeichern. Denen folgen mit 27 % die thermochemischen und mit 20 % die sensiblen Energiespeichertechnologien.

Im Vergleich zeigen Abbildung 14 und Abbildung 15, dass die Nutzer thermischer Energiespeicher über alle Technologien hinweg einen ähnlich hohen Forschungs- und Entwicklungsbedarf sehen, wobei latente Energiespeichertechnologien häufiger eingesetzt werden als sensible und thermochemische Energiereicher zusammen. Interessierte sehen das größte Potenzial für die Nutzung bei latenten und thermochemischen Energiespeicher.

### 3.2.1 Sensible thermische Energiespeicher

Die sensiblen thermischen Energiespeicher haben den höchsten Entwicklungsstand (siehe Abbildung 12) bei den thermischen Energiespeichern und sind am Markt bereits etabliert. Zwei Technologien werden hierbei unterschieden: die thermische Energiespeicher mit festem und die thermischen Energiespeicher mit flüssigem Speichermedium (Hauer, 2017, S. 587-588; Oertel, 2008, S. 46-47).

Diese Technologien sind auf Grund des Entwicklungsstandes und der verwendeten Komponenten sehr günstig im Verhältnis zu anderen Energiespeichern, dennoch gibt es durch Innovationen immer wieder Verbesserungen an bestehenden Systemen sowie neue Anwendungsfelder (Hauer, 2017, S. 598). Bei den sensiblen thermischen Energiespeichern wird ein Speichermedium fühlbar erhitzt oder abgekühlt (Kübler und Fisch, 2005, S. 11; Corrodi und Bertsch, 2015, S. 6). Bei hoher spezifischer Wärmekapazität des Speichermediums kann mehr Energie pro Kilogramm gespeichert werden als bei Speichermedien mit niedriger spezifischer Wärmekapazität (Kübler und Fisch, 2005, S. 11). Neben den geringen Kosten wird auch aus diesem Grund häufig Wasser als Speichermedium für sensible thermische Energiespeicher verwendet, da es mit 4,19 KJ/(kg K) eine vergleichsweise hohe spez. Wärmekapazität besitzt (Corrodi und Bertsch, 2015, S. 8). Im Verhältnis zu anderen Energiespeichern, liegt bei den sensiblen thermischen Energiespeichern dennoch eine geringere Energiedichte vor, wodurch oft große Speichervolumina notwendig werden (siehe Abbildung 12) (Neugebauer, 2014, S. 182; Sterner und Stadler, 2017, S. 587; Hauer, 2017, S. 587). Diese Art von thermischer Energiespeicherung erfordert eine effiziente und oft kostenintensive thermische Dämmung (Hauer, 2017, S. 617).

Ein Vorteil von großen sensiblen thermischen Energiespeichern im Verhältnis zu kleineren Energiespeichern ist, dass sich die Verluste durch die Dämmung prozentual verringern. Die Verluste sind proportional zu der Oberfläche, wodurch eine möglichst optimale Bauform in Bezug auf das Oberflächen-Volumen-Verhältnis verwendet werden sollte, um die Verluste zu minimieren. (Oertel, 2008, S. 46; Schossig und Haussmann, 2011, S. 4)

Sensible thermische Energiespeicher weisen aktuell einen Wirkungsgrad im Bereich von 50 % bis 90 % auf (Hauer et al., 2013, S. 17; Hewicker et al., 2013, S. 72).

### 3.2.2 Latente Energiespeicher

Anders als bei sensiblen Energiespeichern, welche die thermische Energie über eine fühlbare Temperaturdifferenz speichern, wird bei einem latenten Energiespeicher die thermische Energie hauptsächlich im Phasenwechsel des Speichermediums gespeichert, wobei die Temperatur nahezu konstant bleibt (Neugebauer, 2014, S. 181; Hauer et al., 2013, S. 47). Meistens wird der Phasenwechsel von fest nach flüssig verwendet, da hier bei den meisten Stoffen eine beherrschbare Volumenänderung stattfindet (Oertel, 2008, S. 51; Hauer, 2017, S. 582).

Die Phasenübergänge von fest nach gasförmig oder flüssig nach gasförmig können hingegen sehr große unbeherrschbare Volumenänderungen aufweisen (Schossig und Haussmann, 2011, S. 6; Hauer, 2017, S. 583).

Diese Gegebenheit lässt sich am Beispiel Wasser deutlich erkennen. Während sich das Volumen beim Phasenwechsel von flüssigem Wasser zu Eis um ca. 10 % erhöht, vertausendfacht es sich beim Phasenwechsel von flüssigem Wasser zu Wasserdampf (Kübler und Fisch, 2005, S. 13; Hauer, 2017, S. 582). Die gespeicherte thermische Energiemenge eines latenten Energiespeichers hängt von der Schmelztemperatur und -enthalpie des Speichermediums ab (Hauer et al., 2013, S. 47). Mit einer Schmelztemperatur von 0 °C und einer Schmelzenthalpie von 334 kJ/kg ist Wasser dafür ein gut geeignetes Medium (Hauer, 2017, S. 599). Neben Wasser werden in latenten Energiespeichern typischerweise auch verschiedene Salzhydrate mit einem Schmelztemperaturbereich zwischen 29 °C bis 117 °C und einer Schmelzenthalpie von 149 kJ/kg bis 280 kJ/kg eingesetzt. Außerdem wird Paraffin mit einer Schmelztemperatur von 28 °C und einer Schmelzenthalpie von 245 kJ/kg verwendet. (Hauer et al., 2013, S. 51)

Abbildung 15 zeigt den Unterschied zwischen sensibler und latenter thermischer Energiespeicherung mit Bezug auf den Zusammenhang zwischen Temperatur und gespeicherter thermischer Energie.

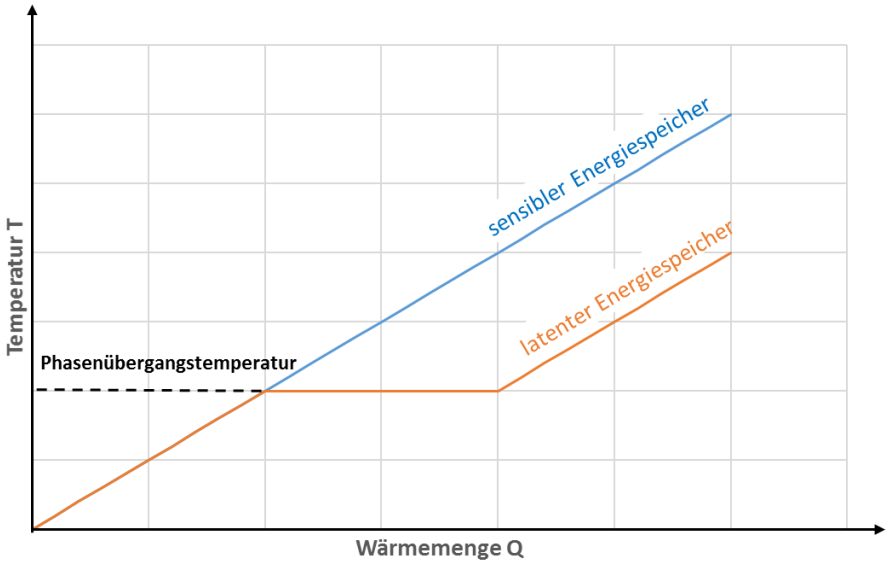


*Abbildung 15 Wärmemenge in Abhängigkeit der Temperatur in Anlehnung an Sterner und Stadler (2017, S. 601)*

Wie in Abbildung 15 zu erkennen ist, bleibt die Temperatur bei dem latenten Speichermedium über einen gewissen Bereich konstant, wobei sich lediglich die Wärmeenergie verändert. Im Gegensatz dazu steht der sensible Energiespeicher, bei dem die Wärmemenge mit dem Temperaturniveau des Speichermediums dauerhaft zusammenhängt. Das Prinzip des latenten Energiespeichers wird in Abbildung 16 visualisiert.

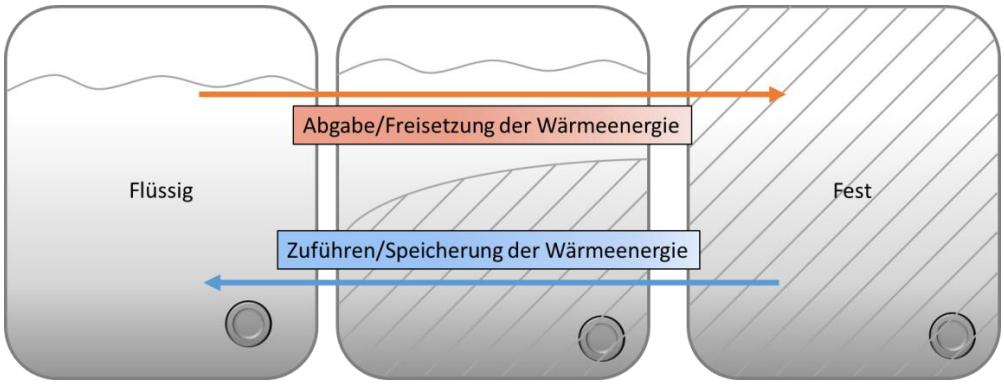


*Abbildung 16 Schematische Darstellung eines latenten Energiespeichers in Anlehnung an (Hauer et al., 2013, S. 34)*

Hierbei wird einem festen Medium Wärme zugeführt, wodurch es eine Phasenänderung erfährt und anschließend in flüssiger Form vorliegt. Bei Wärmebedarf wird ein Phasenwechsel initiiert, der Wärme freisetzt. Sobald das Speichermedium die ursprüngliche feste Phase und die Umgebungstemperatur erreicht hat, wird keine Wärme mehr freigegeben.

Das heißt, es ist eine nahezu isotherme Energiespeicherung möglich, dies bedeutet, dass eine geringe Wärmedämmung notwendig sein kann, je nach Verhältnis der Phasenübergangstemperatur zur Umgebungstemperatur (Hauer et al., 2013, S. 47). Hinzu kommt, dass eine zusätzliche thermische Energiespeicherung möglich wäre, wobei dem Speichermedium nach dem Phasenübergang weiter thermische Energie zugeführt wird, hierbei wäre dann wieder eine verstärkte Wärmedämmung sinnvoll (Hauer et al., 2013, S. 47). Der latente Energiespeicher verliert allerdings an Effektivität, wenn eine zusätzliche sensible thermische Energiespeicherung verwendet wird (Kübler und Fisch, 2005, S. 16).

Die Schmelzenthalpie von Speichermedien, die für latente Energiespeicher verwendet werden können, liegt derzeit zwischen 100 kJ/kg bis 340 kJ/kg (Hauer, 2017, S. 612f.). Dadurch liegt eine wesentlich größere Energiedichte als bei sensiblen thermischen Energiespeichern vor, wodurch weniger Platz für die gleiche Speicherkapazität benötigt wird (Oertel, 2008, S. 52; Kübler und Fisch, 2005, S. 16).

Allerdings gilt diese Überlegenheit der latenten Energiespeicher gegenüber den sensiblen thermischen Energiespeichern nur in Temperaturbereichen der Schmelztemperatur, wodurch nur geringe Temperaturbereiche mit einem latenten Energiespeicher abgedeckt werden können (Kübler und Fisch, 2005, S. 16; Oertel, 2008, S. 51; Neugebauer, 2014, S. 184).

Um mehrere Temperaturbereiche abdecken zu können, werden dementsprechend unterschiedliche latente Energiespeicher benötigt. Die latenten Energiespeichern haben einen Wirkungsgrad zwischen 75 % und 90 % (Hauer et al., 2013, S. 17; Hewicker et al., 2013, S. 72).

### 3.2.3 Thermochemische Energiespeicher

Die thermochemischen Energiespeicher befinden sich derzeit hauptsächlich in der Grundlagenforschung und sind somit kaum in der Praxis vertreten (Neugebauer, 2014, S. 185; Hauer, 2017, S. 583).

Diese Art der thermischen Energiespeicherung verspricht aus heutiger Sicht eine höhere Energiespeicherdichte als bei sensibler oder latenter thermischer Energiespeicherung (Neugebauer, 2014, S. 184). Es wird die Reaktionsenergie von reversiblen chemischen Prozessen oder von physikalischen Oberflächenreaktionen genutzt (Hauer, 2017, S. 610). Diese Technologie hat den großen Vorteil, dass eine nahezu verlustfreie Energiespeicherung möglich ist (Kerskes et al., 2011, S. 2; Sterner und Stadler, 2017, S. 610). Von dieser Technologie wird ein Wirkungsgrad zwischen ca. 80 % und 100 % erwartet (Hauer et al., 2013, S. 17; Hewicker et al., 2013, S. 72)

Thermochemische Energiespeicher können in zwei verschiedene Kategorien eingeteilt werden. Diese basieren auf chemisch reversiblen Reaktionen und der Sorption, dazu zählen Adsorption und Absorption (Kerskes et al., 2011, S. 2; Corrodi und Bertsch, 2015, S. 2). Die chemisch reversiblen Reaktionen besitzen die Gleichgewichtstemperatur als wichtigstes Kriterium, die das thermodynamische Gleichgewicht der Produkte und Edukte beschreibt. Eine Entladung findet dabei unterhalb der Gleichgewichtstemperatur statt und eine Beladung oberhalb der Gleichgewichtstemperatur. Adsorptionsspeicher (ein Stoff lagert sich am anderen an) besitzen keine eindeutige Gleichgewichtstemperatur und die Energiespeicherung hängt von der schwankenden Bindungsenergie des Adsorbens ab und ist somit nicht konstant.

Die Energiedichte eines Adsorbens hängt von der Verdampfungsenthalpie des Adsorbats, den Bindungskräften zwischen Adsorbat und dem Adsorbens und dem Beladungshub zwischen Lade- und Entladetemperatur ab. Ein Absorptionsspeicher speichert thermische Energie, indem ein Stoff in einem anderen Stoff gelöst beziehungsweise aufgenommen wird. Das Lösungsmittel wird als Absorbens und der zu lösende Stoff als Absorbat bezeichnet. Hierbei hängt die Energiedichte im Wesentlichen von der molaren Masse des Absorbats, der Affinität zwischen Absorbens und Absorbat und dem Aggregatzustand von Absorbens und Absorbat ab. (Sterner und Stadler, 2017, S. 611)

### 3.2.4 Vergleich der thermischen Energiespeichertechnologien

Bei den sensiblen thermischen Energiespeichern wird verstärkt im Bereich der Isolation des Energiespeichers und der Temperaturschichtung im Energiespeicher geforscht (Hauer et al., 2013, S. 126; Schossig und Haussmann, 2011, S. 3; Sterner und Stadler, 2017, S. 598; Hauer, 2017, S. 598). Bei der Technologie der latenten Energiespeicherung wird dabei die Verbesserung des Wärmetransports beziehungsweise des Wärmeübertragens erforscht (Hauer et al., 2013, S. 130). Die Forschungsaktivitäten der thermochemischen Energiespeicher fokussieren auf das Reaktordesign des Energiespeichers und auf geeignete Sorptionsmittel (Schossig und Haussmann, 2011, S. 9; Hauer et al., 2013, S. 130).

In den folgenden Tabellen sind die verschiedenen Technologien und Kennzahlen aufgelistet. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Kosten pro kWh bei den thermischen Energiespeichern wesentlich geringer sind als bei elektrochemischen Energiespeichern (Vergleich Kapitel 3.1).

*Tabelle 24 Technische und ökonomische Kennzahlen von sensiblen Energiespeichern in Form eines sensiblen Wasserspeichers (FVEE, 2010, S. 110[a]; Thema, 2017, S. 653[b]; Hauer, 2017, S. 588[c])*

| **Technische und ökonomische Kennzahlen** | **Sensible Energiespeicher** |
|---|---|
| Leistung | 0,001 bis 50 MW[a] |
| Energiedichte | 100 bis 300 kWh pro m³[b] |
| Ausspeicherdauer | Stunden bis Jahr[c] |
| Wirkungsgrad | 45 % bis 75 %[b] |
| Kosten | 0,2 bis 8 € pro kWh[b] |

*Tabelle 25 Technische und ökonomische Kennzahlen von latenten Energiespeichern (Hauer et al., 2013, S. 17[a]; Thema, 2017, S. 653[b]; FVEE, 2010, S. 110[c])*

| **Technische und ökonomische Kennzahlen** | **Latente Energiespeicher** |
|---|---|
| Leistung | < 10 MW[a] |
| Energiedichte | 113 kWh pro m³[b] |
| Ausspeicherdauer | Stunden bis Wochen[a] |
| Wirkungsgrad | 75 % bis 90 % [abc] |
| Kosten | 15 bis 50 € pro kWh[b] |

*Tabelle 26 Technische und ökonomische Kennzahlen von thermochemischen Energiespeichern (Hauer et al., 2013, S. 17[a]; Thema, 2017, S. 653[b]; FVEE, 2010, S. 110[c])*

| **Technische und ökonomische Kennzahlen** | **Thermochemische Energiespeicher** |
|---|---|
| Leistung | < 1 MW[a] |
| Energiedichte | 120 bis 250 kWh pro m³ [ab] |
| Ausspeicherdauer | Stunden bis Wochen[a] |
| Wirkungsgrad | 80 % bis 100 %[abc] |
| Kosten | 8 bis 100 € pro kWh[b] |

Die thermischen Energiespeicher können in verschiedenen Kenngrößen klassifiziert werden. Dabei spielt der Temperaturbereich, in der die thermische Energiespeicherung stattfinden soll, eine wesentliche Rolle (Schossig und Haussmann, 2011, S. 2; Hauer, 2017, S. 581). Ein weiteres wichtiges Kriterium bei der thermischen Energiespeicherung ist die Speicherdauer, wobei unterschieden wird zwischen Langzeitspeichern, die über Wochen bis hin zu einem Jahr speichern und Kurzzeitspeichern, die im Bereich von Stunden und wenigen Tagen speichern (Schossig und Haussmann, 2011, S. 2; Hauer et al., 2013, S. 35). Diese Zeiträume sind bei thermischen Energiespeichern im Vergleich zu elektrischen bzw. elektrochemischen Energiespeichern anders definiert (vgl. Kapitel 2).

Des Weiteren kann eine Auswahl des thermischen Energiespeichers nach den Kriterien stationärer oder mobiler thermischer Energiespeicher und zentraler oder dezentraler Speicherung erfolgen (Hauer et al., 2013). Jeder Energiespeichertechnologie sind mehrere Anwendungsfälle zuzuordnen, je nach Einsatz-, Temperatur- und Leistungsbereich. Durch die vielfältigen Anforderungen an thermische Energiespeicher, müssen diese individuell an die Situation angepasst werden (Rundel et al., 2013, S. 9). Dabei ist zu beachten, dass für viele Anwendungsfälle noch keine passenden thermischen Energiespeicher vorhanden sind und hier ein großer Bedarf an Forschungs- und Entwicklungsarbeit herrscht (Rundel et al., 2013, S. 9).

In Tabelle 27 werden die verschiedenen Anwendungsfelder und die dazu am besten passenden Energiespeichertechnologien aufgeführt. Derzeitige thermische Energiespeichersysteme sind zum großen Teil auf der sensiblen Energiespeicherungstechnologie aufgebaut. Dies liegt an den Kosten und der Umsetzbarkeit der thermischen Energiespeicherung (Elsner und Sauer, 2015, S. 52–57).

*Tabelle 27 Übersicht über Anwendungen von thermischen Energiespeichern und eingesetzte / zukünftig einsetzbare thermische Energiespeichertechnologien (Hewicker et al., 2013, S. 75)*

| **Anwendung** | **Energiespeichertechnologie** |
|---|---|
| Beheizung von Gebäuden (Einzeln und in Blocks) | Sensible Energiespeicher (kleine, mittlere und unterirdische Wassertanks) |
| Fernwärmesysteme | Sensible Energiespeicher |
| Warmwasser | Sensible Energiespeicher (kleine Wassertanks) |
| Saisonale Energiespeicher | Sensible Energiespeicher (Großtanks, Aquiferspeicher) |
| Prozesswärme | Thermochemische Energiespeicher (Sorption) |
| Hochtemperaturspeicher in Industrie und Forschung | Latente Energiespeicher und thermochemische Energiespeicher |
| Industrielle Abwärme | Sensible, latente und thermochemische Energiespeicher |

Wie in Tabelle 27 zu sehen ist, sollen thermochemische Energiespeicher in Form eines Sorptionsenergiespeichers in Zukunft für die Speicherung von Prozesswärme eingesetzt werden. Dies erscheint nach aktuellem Forschungsstand sinnvoll, da Prozesswärme häufig dezentral entsteht und somit auch am effektivsten dezentral gespeichert werden sollte, um lange Versorgungsleitungen und damit einhergehende Verluste zu vermeiden. Ein sensibler thermischer Energiespeicher benötigt dazu im Vergleich einen höheren Platzbedarf und eignet sich vorwiegend als großer zentraler Energiespeicher, um wirkungsgradoptimiert betrieben zu werden. Er wird somit selten in Prozessnähe verbaut.

## 3.3 Energiespeichertechnologien im Markt

Für die Einschätzung bezüglich der Energiespeichertechnologien wurden die Umfrageteilnehmer im ersten Schritt gefragt, welche Energiespeichertechnologie, unterteilt nach ihren physikalischen Eigenschaften, sie nutzen bzw. nutzen würden (siehe Abbildung 17).

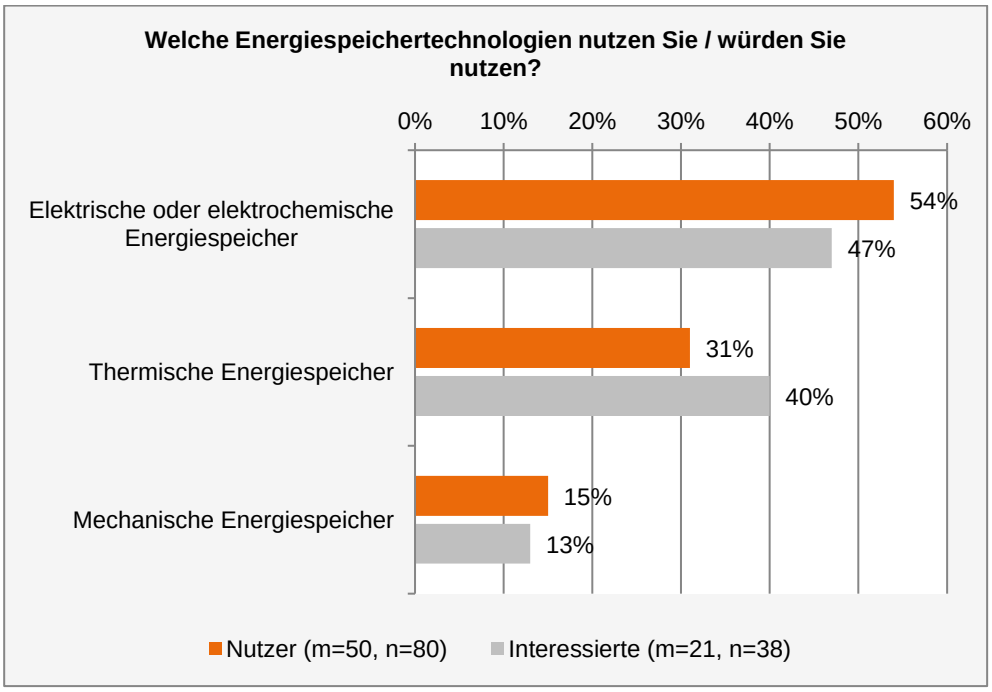


*Abbildung 17 Interesse an aktuellen Energiespeichertechnologien*

Zu aktuell genutzten Energiespeichertechnologien gaben über die Hälfte (54 %) der Nutzer an, einen elektrischen oder elektrochemischen Energiespeicher zu nutzen. Ein knappes Drittel nutzt thermische Speicher und nur 15 % nutzen mechanische Speicher. Die Interessierten sehen das ähnlich. Auch hier liegt der Fokus auf elektrischen oder elektrochemischen Energiespeichern (47 %). Ein etwas größeres Einsatzpotenzial wird den thermischen Energiespeichern zugetraut. Abbildung 18 zeigt die Einschätzung der künftigen Entwicklung von Energiespeichertechnologien.

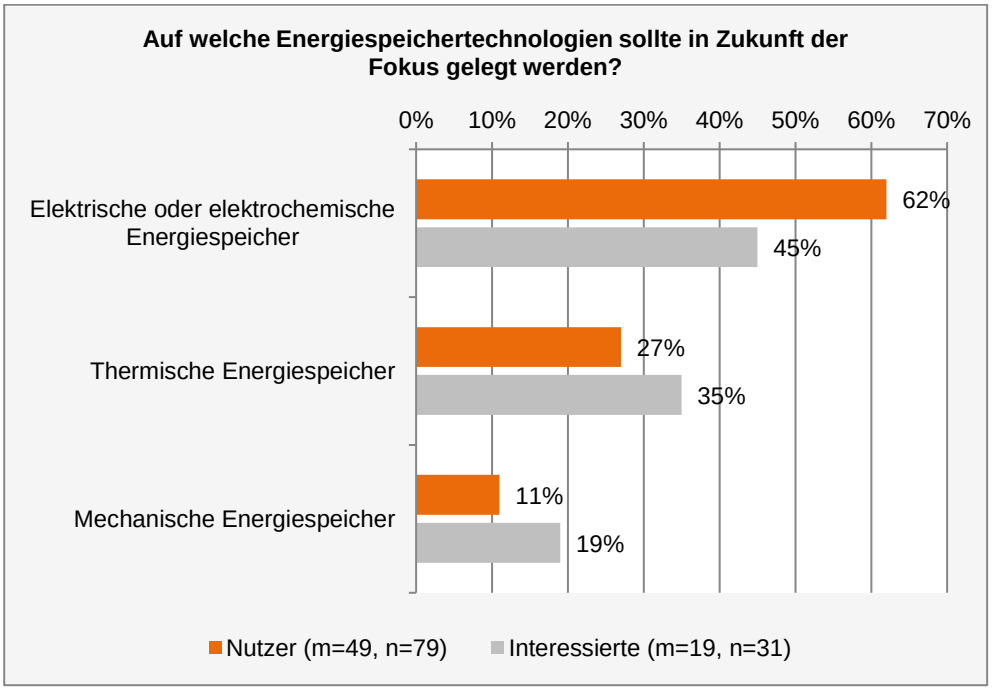


*Abbildung 18 Interesse an zukünftigen Energiespeichertechnologien*

Zukünftig werden weiterhin die elektrischen bzw. die elektrochemischen Energiespeicher den Markt dominieren. Ein Grund hierführ könnte die zunehmende Elektrifizierung von Prozessen sein. Eine Verstärkung dieses Trends sehen vor allem die Nutzer (62 %), weniger die Interessierten (45 %). Die Interessierten sehen auch in thermischen (35 %) und mechanischen (19 %) Technologien zukünftig eine Möglichkeit der Energiespeicherung.

Auf konkrete Energiespeichertechnologien heruntergebrochen sehen Nutzer bei den elektrischen und elektrochemischen Energiespeichern die Lithium-Batterien als die entscheidende Technologie für stationäre Anwendungen (siehe Abbildung 19). Hauptsächlich kann dies durch den Trend der Elektromobilität begründet werden. Dieses Bild spiegelt auch die Meinung der Experten wider. Darüber hinaus wurde von den Experten zudem die Blei-Säure-Batterie aufgrund der aktuellen Kostenvorteile genannt.

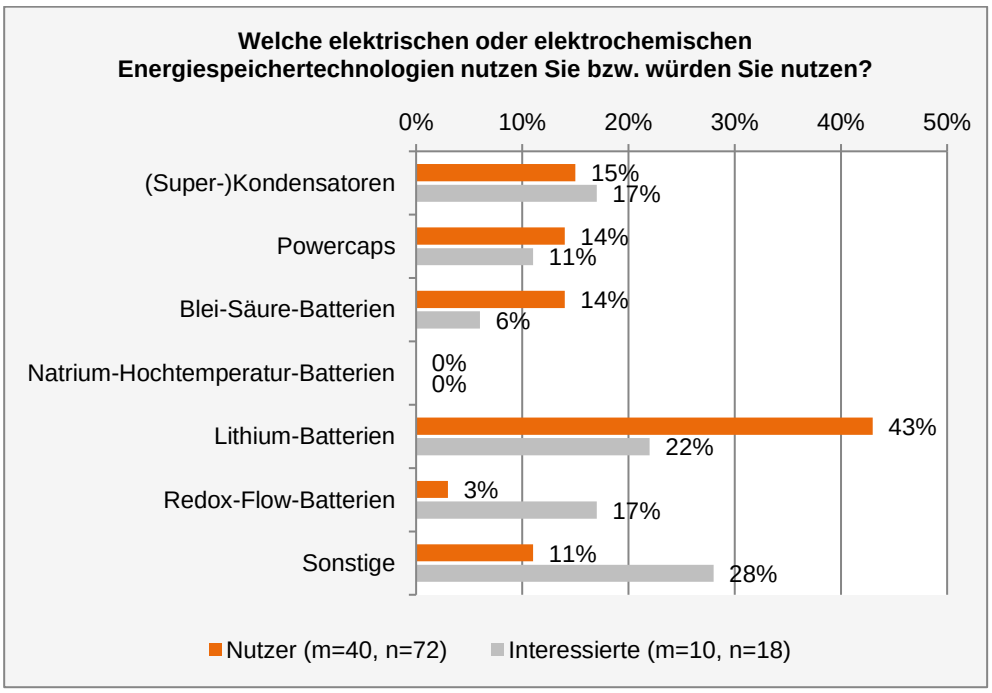


*Abbildung 19 Interesse an aktuellen elektrischen und elektrochemischen Energiespeichertechnologien*

Demgegenüber ist die Meinung der Interessierten, dass sowohl Lithium-Batterien (22 %) als auch Redox-Flow-Batterien (17 %) für stationäre Anwendungen geeignet sind. Aus den Freitextantworten der Interessierten, die Sonstige ausgewählt haben, konnte noch keine Aussage über eine konkrete Energiespeichertechnologie abgeleitet werden, da sie in der Analyse einer Energiespeicherintegration noch nicht so weit sind oder auf andere Energiespeichertechnologien wie Nickel-Metallhydrid-Batterien verweisen. Bei der Frage nach zukünftigen Energiespeichertechnologien ergab sich ein ähnliches Bild (siehe Abbildung 20).

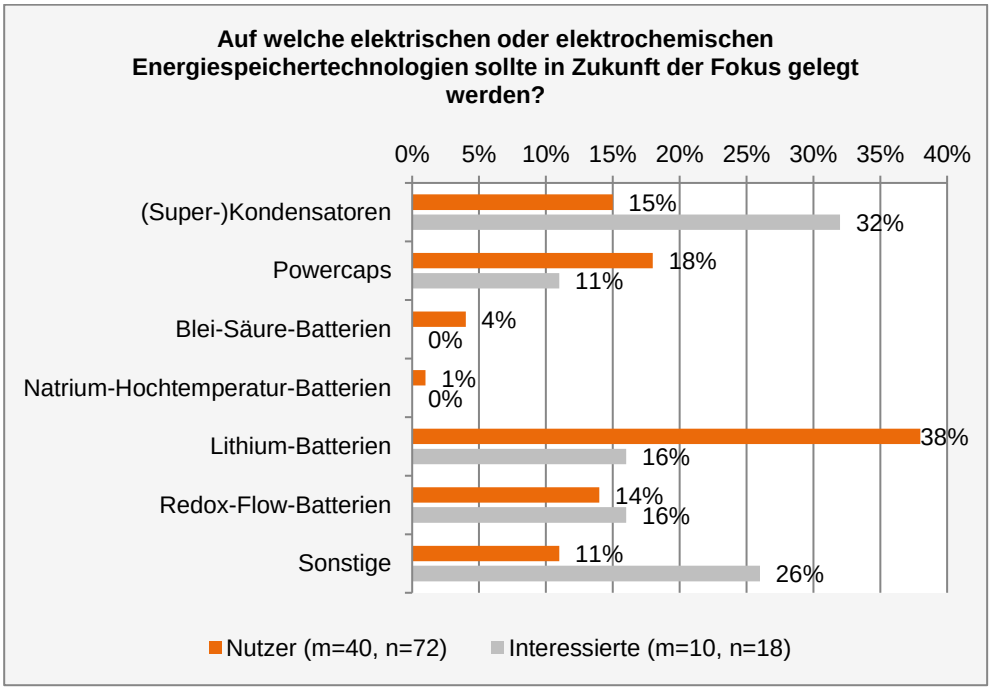


*Abbildung 20 Interesse an zukünftigen elektrischen und elektrochemischen Energiespeichertechnologien*

Auch zukünftig sehen die Nutzer Lithium-Batterien als relevanteste Energiespeicher-technologie an, jedoch spielen auch Kondensatoren und Redox-Flow-Batterien eine Rolle. Dabei ist der Zuwachs von Redox-Flow-Batterien mit dem aktuellen Entwicklungsstadium begründbar. Die Interessierten sehen hingegen zukünftig ein großes Einsatzpotenzial für Kondensatoren. Insgesamt haben die Umfrageteilnehmer neben den auszuwählenden Energiespeichertechnologien vor allem alternative Energieformen, wie bspw. Wasserstoff, Power-to-Gas und synthetische Kraftstoffe erwähnt.

In der Zukunft sind auch hybride Energiespeichersysteme denkbar.Unter hybriden Energiespeichersystem wird in dieser Studie die Kombinatino von unterschiedlichen Energiespeichertechnologien verstanden. Auf die Frage, ob hybride Energiespeicherlösungen in Frage kommen, antworteten die Experten zwar mit Interesse, wiesen aber darauf hin, dass es aktuell an Anwendungsfeldern mangelt. Auch die befragten Unternehmen finden hybride Energiespeichersysteme interessant. Nutzer befürworten hybride Energiespeichersysteme zu 83 % und Interessierte sogar zu 90 %. Welche Kombinationsmöglichkeiten die Befragten bevorzugen würden zeigt Abbildung 21.

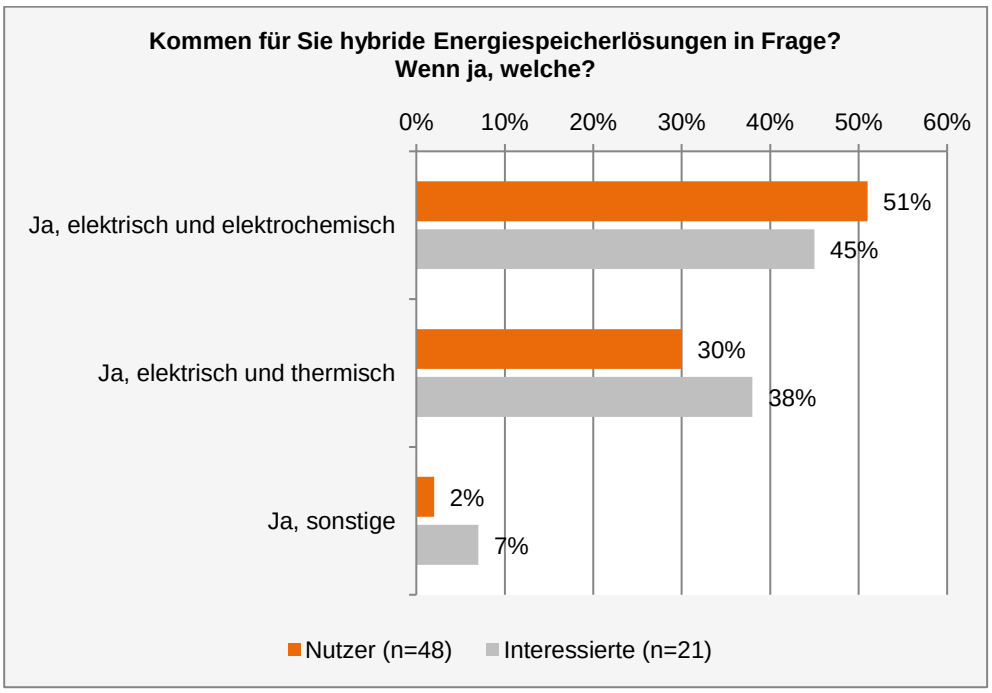


*Abbildung 21 Interesse an hybriden Energiespeicherlösungen*

Über die Hälfte der Nutzer (51 %) bevorzugt ein hybrides Energiespeichersystem bestehend aus elektrischen und elektrochemischen Energiespeichern. Ein knappes Drittel der Nutzer (30 %) findet auch hybride Energiespeichersysteme aus elektrischen und thermischen Energiespeichern interessant. Die Interessierten zeigen eine ähnliche Tendenz, jedoch liegen die beiden Kombinationsmöglichkeiten näher beieinander. Das Interesse für hybride Energiespeichersysteme ist also durchaus vorhanden, aber wie die Experten erwähnt haben, stellt sich hier noch die Frage nach der Einsatzoption und damit anschließend auch die Frage der Wirtschaftlichkeit.

Nachdem in Kapitel 2 die Einsatzoptionen vorgestellt und miteinander verglichen und die Energiespeichertechnologien in diesem Kapitel vorgestellt wurden, werden abschließend die Einsatzoptionen den Stromspeichertechnologien gegenübergestellt. Tabelle 28 zeigt die Matrix von Einsatzoptionen und Energiespeichertechnologien.

*Tabelle 28 Eignung unterschiedlicher Speichertechnologien für betrachtete Einsatzoptionen*

| Technologie/ Einsatzoption | SMS | Supercap | Bl-B | Li-B | Na-B | RF-B |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Sicherstellung der Versorgungssicherheit** | ● | ● | ◕ | ◕ | ◕ | ◑ |
| **Aufrechterhaltung der Versorgungskapazität** | ● | ● | ◔ | ◑ | ◑ | ◑ |
| **Eigenverbrauchs-optimierung** | ○ | ○ | ◕ | ● | ● | ◕ |
| **Rekuperation** | ● | ● | ● | ● | ● | ◕ |
| **Handel an der Strombörse** | ◑ | ◑ | ◕ | ◕ | ● | ◕ |
| **Netzentgeltreduktion** | ◑ | ◑ | ◑ | ● | ● | ◕ |
| **Regelenergie-bereitstellung** | ◔ | ◔ | ◑ | ● | ● | ◕ |
| **Abschaltbare Lasten** | ◔ | ◔ | ◕ | ◕ | ◕ | ◕ |

Bei der Gegenüberstellung von Einsatzoptionen und Stromspeichertechnologien zeigt sich, dass für die Einsatzoptionen zur Absicherung der Produktion die Leistungsspeicher Schwungmassenspeicher und Kondensator geeignet sind. Aber auch Blei-Säure-Batterien und Lithium-Batterien kommen für große zentrale USV-Systeme in Frage.

Im Gegensatz hierzu ist ein Einsatz der beiden Leistungsspeicher für die Eigenverbrauchsoptimierung nicht sinnvoll, da diese die Ausspeicherung nicht zur Verfügung stellen können, unter anderem wegen der hohen Selbstentladerate. Für diese Einsatzoption sind vor allem die Energiespeicher geeignet wie Lithium-Batterien und Natrium-Hochtemperatur-Batterien. Blei-Säure-Batterien haben hier den Nachteil einer sehr geringen zyklischen Lebensdauer und Redox-Flow-Batterien sind aktuell noch zu teuer. Obwohl es für die Einsatzoption Rekuperation wenig aussagekräftige Anforderungen gibt, sind auch hier die Leistungsspeicher geeignet aufgrund von schnell auftreten Beschleunigungs- und Bremsvorgängen. Dadurch, dass für den Handel an der Strombörse und die Netzentgeltreduktion die zu überbrückenden Zeiträume aktuell bei 15 Minuten festgesetzt sind, sind für diese beiden Einsatzoptionen hauptsächlich Natrium-Hochtemperatur-Batterien und Lithium-Batterien einsetzbar. Für die Systemdienstleistungen werden sehr große Energiespeicher benötigt, wodurch auch hier die Batterien wie Lithium-Batterien oder Natrium-Hochtemperatur-Batterien geeignet sind.

**Kernaussagen Kapitel 3:**

1. Die technischen und ökonomischen Kennzahlen der Stromspeichertechnologien zeigen, dass Schwungmassenspeicher und Kondensatoren sich für Einsatzoptionen eignen, bei welchen eine große Leistung über eine kurze Zeit zur Verfügung gestellt werden muss. Die Batterietechnologien sind im Gegensatz dazu für von Energiespeicheranwendungen geeignet.
2. Latente und thermochemische Energiespeichertechnologien sollten zukünftig im Fokus der Forschung und Entwicklung bzgl. thermischer Energiespeicherung liegen.
3. Latente Energiespeicher sind die am Häufigsten eingesetzten thermischen Energiespeicher.
4. Die Technologien der elektrischen bzw. elektrochemischen Energiespeicher werden sowohl aktuell als auch zukünftig von der Lithium-Ionen-Batterie dominiert.
5. Kondensatoren und Redox-Flow-Batterien haben das Potenzial, zukünftig eine größere Rolle bei stationären Anwendungen zu spielen.
6. Hybride Energiespeichersysteme aus elektrischen und elektrochemischen oder elektrischen und thermischen Energiespeichern sind zukünftig vorstellbar.
7. Die Leistungsspeicher (Schwungmassenspeicher, Kondensator) sind für die Einsatzoptionen zur Absicherung der Produktion (Versorgungssicherheit, Versorgungsqualität) und die Rekuperation geeignet.
8. Für die Eigenverbrauchsoptimierung, den Handel an der Strombörse und die Netzentgeltreduktion sind Blei-Säure-Batterien, Lithium-Batterien, Natrium-Hochtemperatur-Batterien und Redox-Flow-Batterien einsetzbar.
9. Für Systemdienstleistungen werden große Energiespeicher benötigt, wie Lithium-Batterien und Redox-Flow-Batterien.

# 4 Herausforderungen und Chancen für Energiespeicher

Zur Beobachtung und Analyse der aktuellen Situation der Energiespeicher am Markt wurde in den Experteninterviews und der Umfrage die aktuelle Bedeutung von Energiespeichern im Unternehmen sowie die Herausforderungen und Chancen für den Einsatz der Energiespeicher identifiziert. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Experten- und Teilnehmerantworten zusammengefasst dargelegt.

## 4.1 Bedeutung von Energiespeichern in Unternehmen

Die Zeit, welche für das Thema einer Energiespeicherintegration in Unternehmen investiert wird, spiegelt die Bedeutung dieses Themas wider. Daher wurde analysiert, ob und wie viel Zeit dafür investiert wird sowie in welcher Form (internes oder externes Personal) die Beschäftigung mit dem Thema erfolgt. Das Ergebnis wird in Abbildung 22 dargestellt.

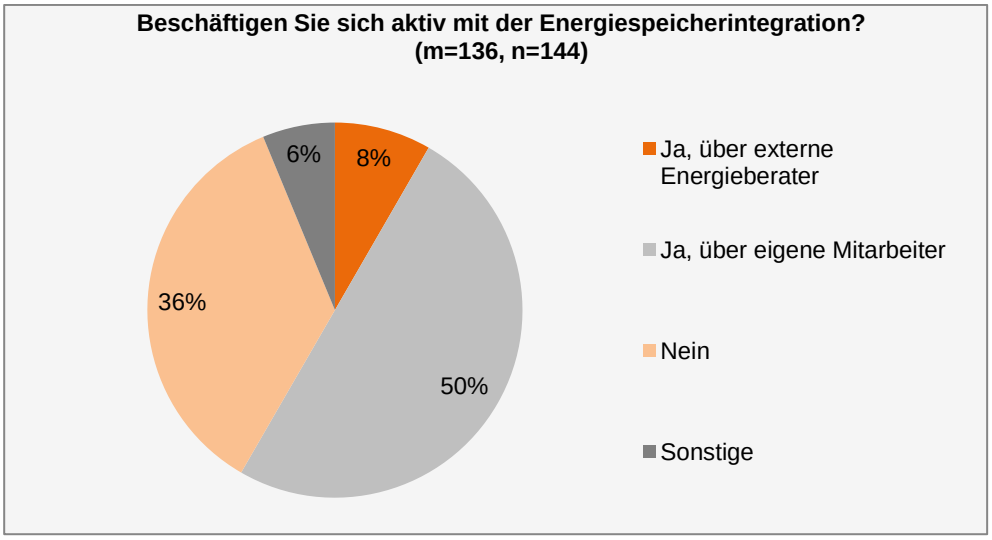


*Abbildung 22 Personaleinsatz bei einer Energiespeicherintegration*

Über die Hälfte der Umfrageteilnehmer gab an, dass sie sich aktiv mit der Integration von Energiespeichern beschäftigen, wobei der Hauptteil dafür eigene Mitarbeiter beschäftigt. Ähnlich sind die Aussagen aus den Experteninterviews, denn die Ermittlung von Energiespeicherpotenzialen findet fast ausschließlich intern statt. Nur sehr selten kommt es vor, dass eine Energiespeicherintegration extern beauftragt wird.

Die Tatsache, dass es sich meist um eigene Mitarbeiter handelt, welche sich mit Energiespeichern beschäftigen, zeigt, dass die Beschäftigung mit dem Thema Energiespeicher scheinbar intrinsisch getrieben ist. Da eher selten eine externe Beauftragung vergeben wird, ist entweder bereits Expertise vorhanden oder das Wissen wird intern angeeignet. Prinzipiell kann es aber auch sein, dass es zu teuer ist, einen Externen zu beauftragen. Ein weiteres Drittel der Umfrageteilnehmer gibt an, dass sich niemand aktiv mit der Energiespeicherintegration beschäftigt. Dennoch geben 41 % unter ihnen an, Interesse an einer Energiespeicherintegration zu haben.

## 4.2 Potenzial einer Energiespeicherintegration in Unternehmen

Um herauszufinden, ob fehlendes Potenzial der Grund dafür ist, keinen Energiespeicher zu integrieren, wurden die Interessierten hinsichtlich ihrer Gründe befragt, warum diese bisher noch keinen Energiespeicher besitzen (siehe Abbildung 23).

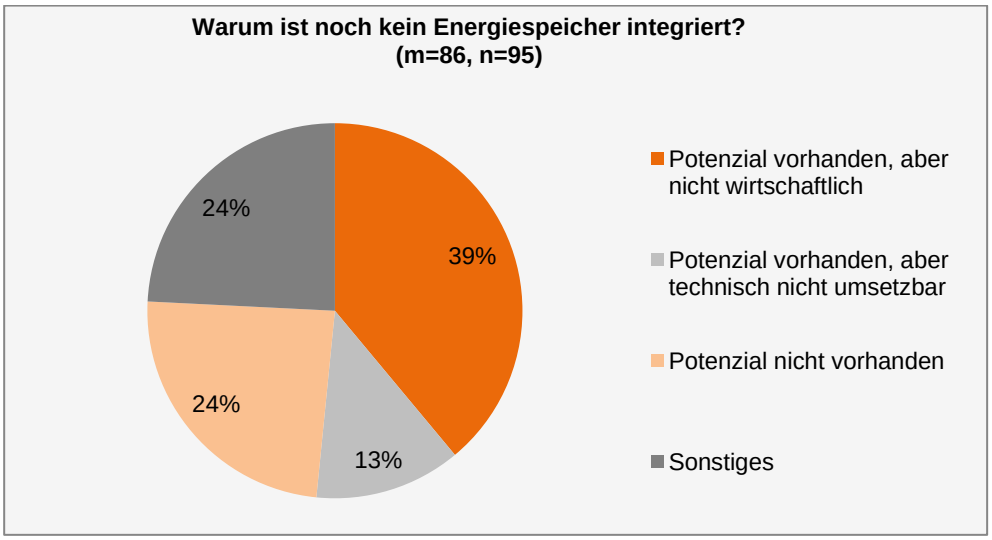


*Abbildung 23 Gründe gegen eine Energiespeicherintegration*

Anhand der Ergebnisse lässt sich feststellen, dass knapp über die Hälfte der Interessierten durchaus vorhandenes Potenzial sieht. Jedoch ist es meist nicht wirtschaftlich (39 %) oder aber technisch nicht umsetzbar (13 %). Zu jeweils knapp einem Viertel sehen die an Energiespeichern interessierten Teilnehmer entweder keine Potenziale oder geben sonstige Gründe an. Knapp die Hälfte der Freitextantworten zu den sonstigen Gründen verweist darauf, dass Potenziale bisher nicht geprüft wurden, eine Planungs- bzw. Bewertungsphase aber kürzlich angelaufen ist oder bevorsteht.

## 4.3 Herausforderungen für eine Energiespeicherintegration in Unternehmen

Um herauszufinden, welche Faktoren die Nutzung von Energiespeichern ausbremsen, wurden Experten sowie Umfrageteilnehmer nach den Herausforderungen befragt (siehe Abbildung 24).
Einig sind die Experten sowie die Umfrageteilnehmer, die bereits einen Energiespeicher nutzen, in drei zentralen Herausforderungen:

1. Wirtschaftlicher Faktor: Dieser ist am wichtigsten, da den hohen Investitionskosten zu geringe Energiekosteneinsparungen gegenüberstehen[1].
2. Regulatorischer Faktor: Am zweitwichtigsten sind für die Nutzer regulatorische Hürden[2]. Die Experten verweisen vor allem auf die fehlenden regulatorischen Rahmenbedingungen im Bereich Automobil- und Sicherheitstechnik.
3. Wissensfaktor[3]: Zu wenige Erfahrungswerte stellen die drittgrößte Herausforderung für die Umfrageteilnehmer dar. Auch die Experten sind durchweg der Meinung, dass in diesem Bereich Know-how und praxisnahe Demonstratoren fehlen.

Die drei Punkte spiegeln 60 % der Umfrageantworten wider. Die übrigen 40 % verteilen sich auf neun weitere Herausforderungen. Dabei gibt es erhebliche Abweichungen in den Antworten zwischen den Teilnehmergruppen Nutzer und Interessierte bei den Herausforderungen fehlendes Wissen über die Hersteller, komplexe Auslegung und Dimensionierung und Instandhaltungsaufwand. Ungefähr doppelt so viele Interessierte sehen in den genannten Punkten eine Herausforderung. Umgekehrt sehen die Interessierten die Herausforderungen regulatorische Hürden und großer Platzbedarf als weniger wichtig an. Die Experten weisen darauf hin, dass gerade im Bereich der Mobilität technische Anforderungen wie hohe Leistungsdichten existieren, die mit den aktuell am Markt verfügbaren Energiespeichertechnologien nur schwer umsetzbar sind.

[1] Siehe Umfrageergebnisse Nutzer Platz 1 „Hohe Investitionskosten“ und Platz 2 „Zu wenig Rendite“ mit insg. (37 %)
[2] Siehe Umfrageergebnisse Nutzer Platz 3 „Regulatorische Hürden wie Gesetze, Steuern und Abrechnung“ (13 %).
[3] Siehe Umfrageergebnisse Nutzer Platz 4 „Zu geringe (Langzeit-) Erfahrungswerte“ (10 %)

Daneben mangelt es oft an einer verlässlichen Informationsbasis, wie z. B. bei Verbrauchsdaten und Lastgängen, welche für die Auslegung von Speichern eine Voraussetzung darstellen. Daher wurde in der Umfrage zusätzlich nach der Messung von Energiedaten gefragt.

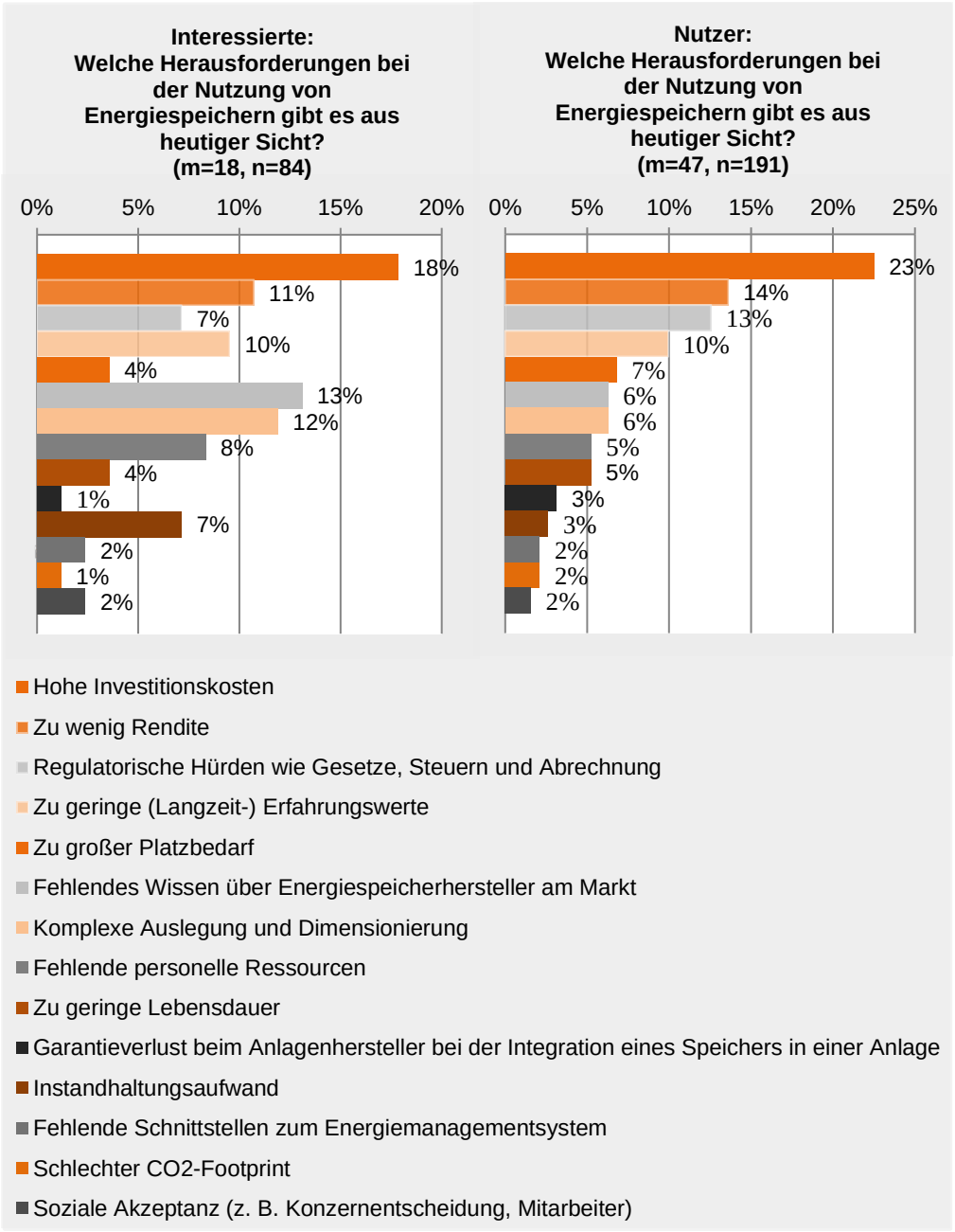


*Abbildung 24 Aktuelle Herausforderungen für Energiespeicher*

Exkurs: Messung von Energiedaten

Da die Datengrundlage in Form von Lastprofilen eine wesentliche Basis für die Potenzialermittlung und Auslegung darstellt (Rothacher et al., 2018, S. 98), ist das Vorhandensein von Energiedaten eine grundlegende Voraussetzung für die Entscheidungsfindung zur Energiespeicherintegration.

Aus den Experteninterviews geht hervor, dass eine Aussage darüber, ob eine Erfassung von Energiedaten stattfindet, nicht pauschal getroffen werden kann, da sich die Datenermittlung in Bezug auf Ort, Umfang, Auflösung und Speicherung deutlich unterscheiden kann. Dennoch erfassten die Umfrageteilnehmer zum Großteil Energiedaten (80 %). Als Grund für das Nicht-Erfassen wird hauptsächlich angegeben, dass kein betrieblicher Bedarf besteht (70 % der Nein-Antwortenden). Abbildung 25 zeigt das Umfrageergebnis.

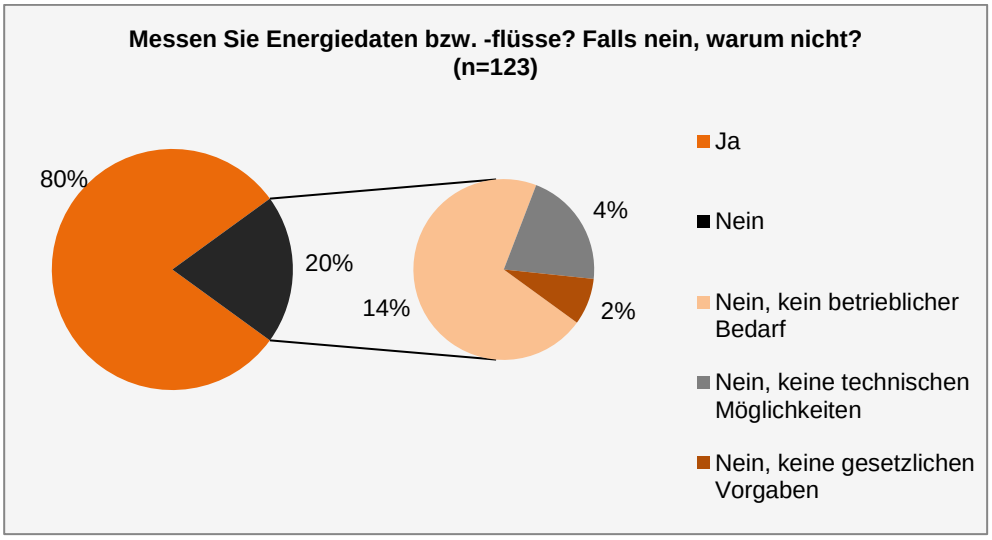


*Abbildung 25 Erfassung von Energiedaten in Unternehmen*

Interessant ist, dass 80 % beider Gruppen (Nutzer wie Interessierte) angeben, Energiedaten zu messen. Der hohe Anteil spricht dafür, dass ein Zusammenhang zwischen vorhandenen Messdaten und Interesse für eine Energiespeicherintegration besteht.

## 4.4 Treiber und Chancen von Energiespeichern in Unternehmen

Grundsätzlich bestehen vier Treiber, welche Anwender zu einer Energiespeicherintegration bewegen können (siehe Abbildung 26). Diese sind:

- Kostenreduktion durch Anpassung an die regulatorischen Rahmenbedingungen (betriebswirtschaftliche Sicht)
- Kostenreduktion Energieeffizienzsteigerung (energetische Sicht)
- Absicherung der Produktion (Produktionssicht)
- Erhöhung der Energieflexibilität (Netzdienlichkeit)

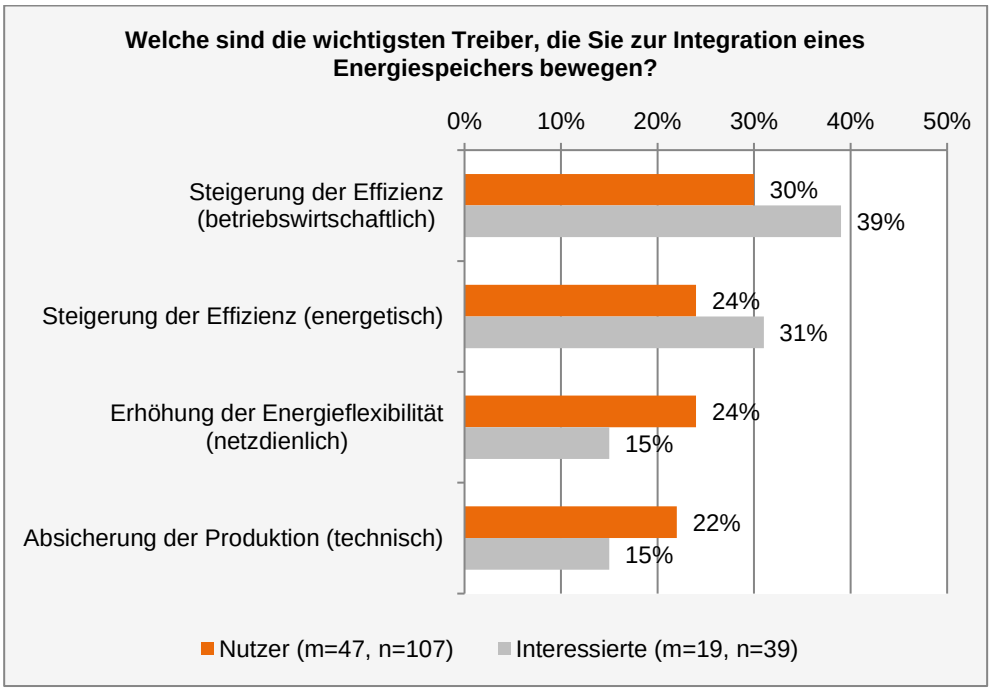


*Abbildung 26 Gründe für die Integration von Energiespeichern*

Für die Umfrageteilnehmer haben alle vier Treiber eine Relevanz. Jedoch unterscheidet sich die Aufteilung der Antworten zwischen den Nutzern und Interessierten. Während die Interessierten hauptsächlich die betriebswirtschaftliche (39 %) und energetische (31 %) Effizienzsteigerung im Fokus haben, ist die Aufteilung der vier Treiber unter den Nutzern insgesamt gleichmäßiger. Die Steigerung der betriebswirtschaftlichen Effizienz ist zwar auch bei den Nutzern wichtiger (30 %), aber die übrigen 70 % verteilen sich ungefähr gleich auf die weiteren drei Treiber.

Neben der Absicherung der Produktion sehen die Experten außerdem einen weiteren Treiber bei Entwicklungen von Anwendungen bei den Kunden. Das kann so verstanden werden, dass bereits Kundennachfrage für eine Energiespeicherintegration vorhanden ist.

## 4.5 Wirtschaftlichkeit von Energiespeichern

In diesem Kapitel wurde bereits mehrfach die Wichtigkeit der Wirtschaftlichkeit angesprochen. Die nähere Untersuchung dieses zentralen Hemmnisses zeigt, dass einerseits die Amortisationszeit eine wichtige Rolle spielt und andererseits eine starke Verbindung zwischen Wirtschaftlichkeit und Treibern zur Energiespeicherintegration besteht.

Aus Sicht der Experten gestaltet sich die Wirtschaftlichkeitsrechnung als schwierig, denn eine reine Nutzung der Energiespeicher zur Speicherung von Energie ist an sich meist nicht wirtschaftlich. Allerdings kann die synergetische Nutzung eines Energiespeichers bspw. in Kombination mit einer USV eine wirtschaftliche Investition mit vergleichsweise kurzer Amortisationszeit darstellen. Daher wurde in der Umfrage auch nach der angewandten Bewertungsmethode für die Wirtschaftlichkeit gefragt (siehe Abbildung 27).

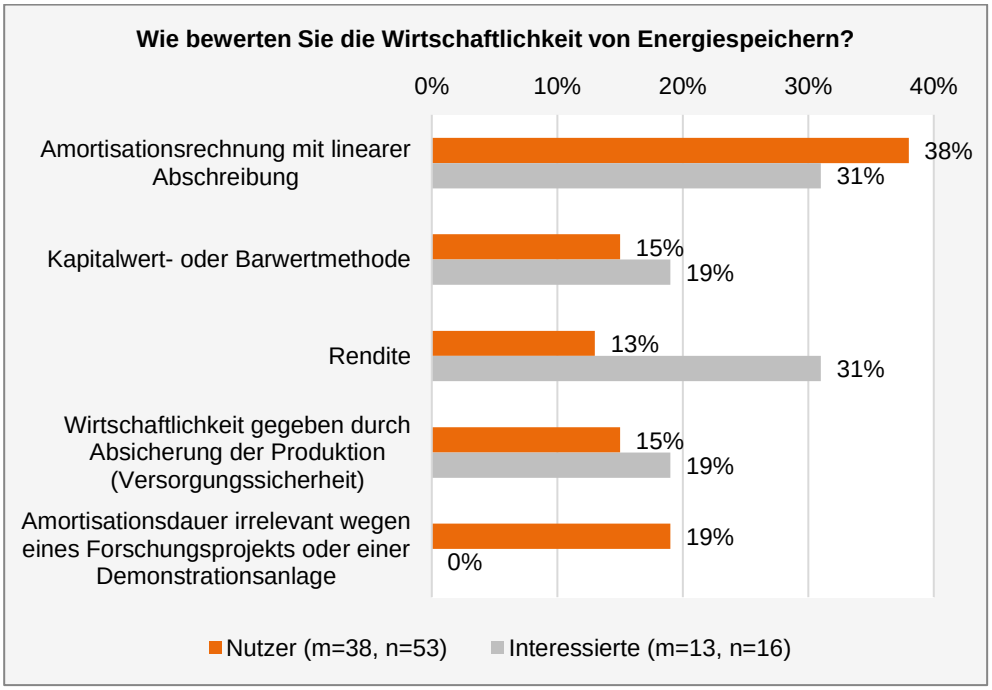


*Abbildung 27 Wirtschaftliche Bewertungsmethoden für Energiespeicher*

Interessant ist, dass für Interessierte die Amortisationsrechnung (mit linearer Abschreibung) und die Rendite gleich wichtig sind (jeweils 31 %). Ebenso verhält es sich mit der Kapitalwertmethode und der Wirtschaftlichkeit gegeben durch die Absicherung der Produktion (jeweils 19 %).

Dagegen gaben die Nutzer klar die Amortisationsrechnung als das wichtigste Bewertungsinstrument (38 %) an. Im Gegensatz dazu ist an zweiter Stelle die Amortisationszeit aufgrund eines Forschungsprojektes als irrelevant eingestuft worden (19 %). Die übrigen 43 % verteilen sich relativ gleichmäßig auf Kapitalwertmethode, Rendite und Produktionsabsicherung.

Insgesamt zeigt sich die Sichtweise der Experten, dass bei der Bewertung der Wirtschaftlichkeit der Treiber Produktionsabsicherung im Sinne der Versorgungssicherheit mit 15 % bzw. 19 % durchaus eine Rolle spielt. Die Wirtschaftlichkeit ist durch die Verhinderung eines potentiellen Produktionsausfalls, welcher mit sehr hohen Kosten verbunden ist, gegeben. Bei der Bewertung der Wirtschaftlichkeit zeigt sich, dass gerade für die Nutzer die Amortisationszeit ein sehr wichtiges Bewertungsinstrument darstellt. Aus diesem Grund wurde in der Umfrage explizit nach der geplanten (siehe Abbildung 28) sowie tatsächlichen (siehe Abbildung 29) Amortisationszeit gefragt.

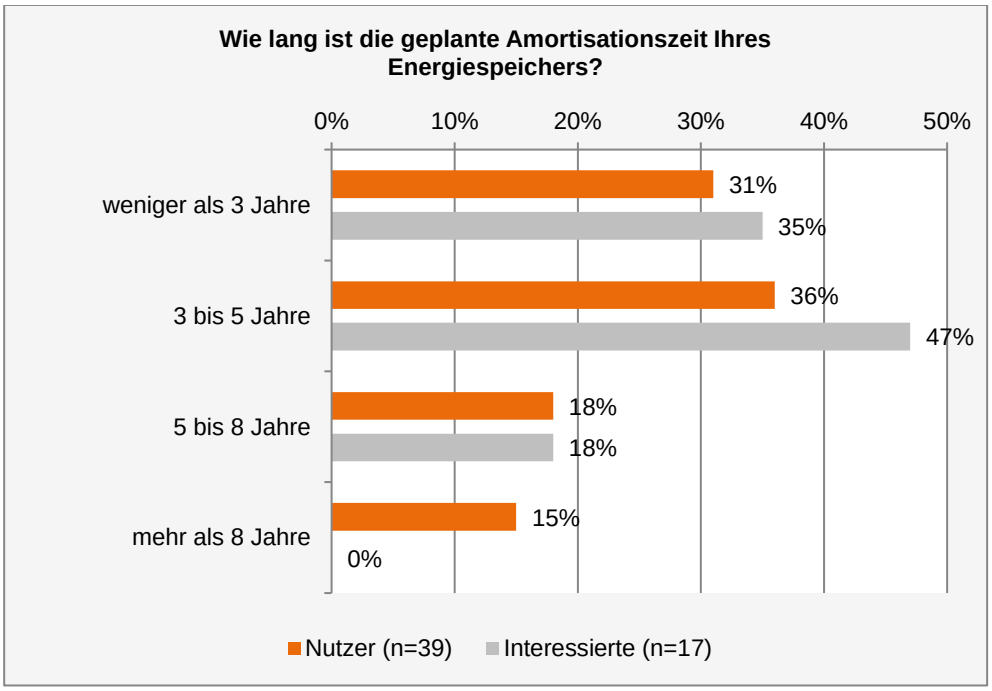


*Abbildung 28 Geplante Amortisationszeit von Energiespeichern*

Bei der geplanten Amortisationszeit ergibt sich ein ähnliches Bild bei Nutzern und Interessierten: In beiden Gruppen gaben 18 % an, mit fünf bis acht Jahren Amortisationszeit zu planen; ungefähr ein Drittel plant in beiden Gruppen jedoch mit weniger als drei Jahren. Die meisten beider Gruppen planen mit einer Amortisationszeit von drei bis fünf Jahren (36 % der Nutzer und 47 % der Interessierten). Während 15 % der Nutzer sogar mit mehr als acht Jahren planen, hat keiner der Interessierten solch einen langen Zeitraum veranschlagt. Die Ergebnisse decken sich also nicht ganz mit der Expertenaussage, dass meist eine Amortisationszeit von fünf bis acht Jahren angestrebt wird. Beim Abgleich der Ergebnisse der Nutzer zwischen der geplanten und der tatsächlichen Amortisationszeit ergibt sich folgendes Bild (siehe Abbildung 29).

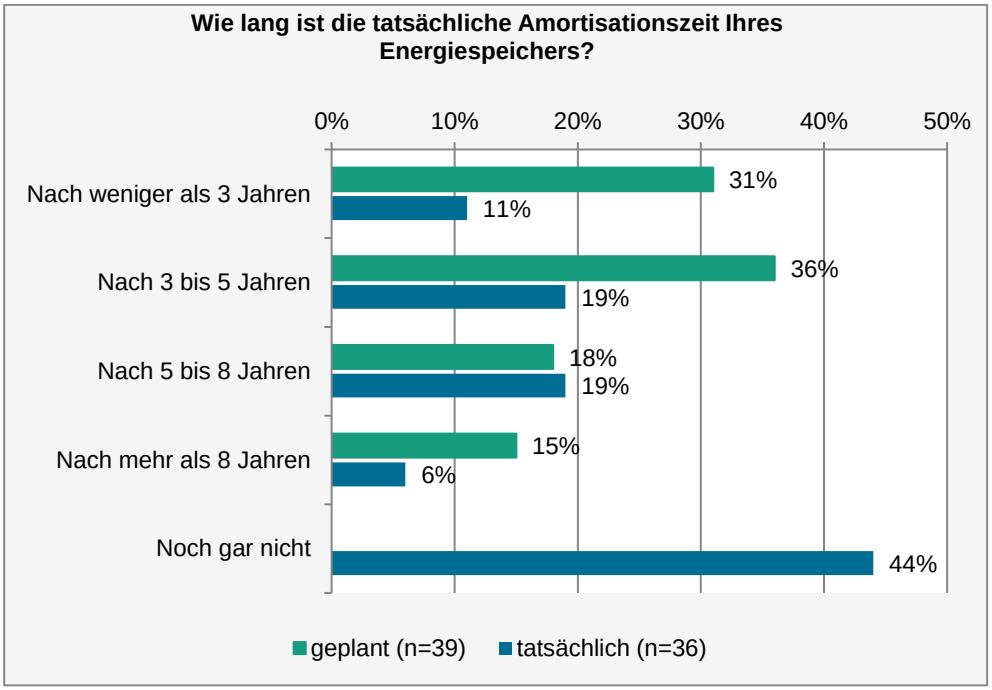


*Abbildung 29 Vergleich der geplanten mit der tatsächlichen Amortisationszeit (Nutzer)*

Beinahe die Hälfte aller installierten Energiespeicher hat sich bisher noch nicht amortisiert. Mit jeweils 19% liegt der Großteil der bisher tatsächlich amortisierten Energiespeicher in einem Zeitbereich von drei bis fünf bzw. fünf bis acht Jahren. Obwohl ein knappes Drittel der Nutzer mit einer Amortisationszeit von unter drei Jahren geplant hat, konnten sich bisher lediglich 11 % der Energiespeicher tatsächlich innerhalb dieser Zeitspanne amortisieren. Generell scheint die optimistische Planung (67% der Energiespeicher sollten sich innerhalb von fünf Jahren amortisieren) in der Realität bisher noch nicht zuzutreffen. Nur 30 % der Energiespeicher haben sich bisher innerhalb von fünf Jahren amortisiert. Es zeigt sich, dass die zentrale Herausforderung der Wirtschaftlichkeit besonders durch die

hohen Investitionskosten und die Anforderung an eine möglichst geringe Amortisationszeit beeinflusst wird.

**Kernaussagen Kapitel 4:**

1. Es besteht hohes Interesse an der Energiespeicherintegration im industriellen Umfeld.
2. Über die Hälfte der Befragten beschäftigt sich bereits aktiv mit dem Thema, aber auch viele der bisher Inaktiven melden ihr Interesse an.
3. Die größten Herausforderungen für die Energiespeicherintegration stellen die Wirtschaftlichkeit, der regulatorische Rahmen und fehlendes Know-how in der Branche dar.
4. Realisierbares Potenzial bieten Energiespeicher hauptsächlich durch die Steigerung der Effizienz, sowohl aus betriebswirtschaftlicher als auch aus energetischer Sicht.
5. Die tatsächliche Amortisationszeit als wichtiger Bewertungsfaktor liegt meistens zwischen drei und acht Jahren.

# 5 Fazit

Für Energiespeicher existieren viele Einsatzoptionen im industriellen Umfeld. Grundsätzlich kann zwischen den Einsatzoptionen zur Absicherung der Produktion, Optimierung des Energiebezugs und Systemdienstleistungen unterschieden werden. Bereits etabliert sind die Einsatzoptionen zur Absicherung der Produktion, während die Einsatzoptionen zur Optimierung des Energiebezugs für produzierende Unternehmen immer interessanter werden. Die Einsatzoptionen durch Systemdienstleistungen werden nur als Nebeneffekt zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit gesehen.

Auf Seite der Energiespeichertechnologien gibt es aufgrund des Trends zur Elektromobilität einen hohen Druck zur technologischen Weiterentwicklung. Technologisch zählen Schwungmassenspeicher, Kondensatoren und Blei-Säure-Batterien zu den ausgereiften, am Markt verfügbaren Technologien. Lithium-Batterien sind auf dem besten Weg dorthin. Auch Redox-Flow-Batterien können aufgrund der getrennten Dimensionierung von Leistung und Kapazität eine wichtige Rolle einnehmen. Alle Energiespeichertechnologien haben gemein, dass wegen der geringen Stückzahl die Herstellungskosten und damit die Investitionskosten sehr hoch sind. Eine Senkung der Investitionskosten kann bei fast allen betrachteten Energiespeichertechnologien durch eine Massenproduktion erreicht werden. Eine andere Möglichkeit, um die hohen Investitionskosten von Energiespeichern zu reduzieren, ist die Nutzung von Second-Life-Batterien aus Elektroautos.

Die Umfrage hat gezeigt, dass die Integration von Energiespeichern in Unternehmen eine Rolle spielt. Meistens befassen sich sogar eigene Mitarbeiter aktiv mit der Analyse einer Energiespeicherintegration. Die größte Herausforderung ist und bleibt die Wirtschaftlichkeit der Energiespeicherintegration. Besonders die hohen Investitionskosten der Energiespeicher und die hohen Anforderungen der Unternehmen an geringe Amortisationszeiten stellen eine Hürde dar. Neben der Wirtschaftlichkeit sind jedoch auch die Regulierungen eine Herausforderung für die Energiespeicherintegration. Außerdem mangelt es in der Branche an Erfahrung, Know-how und praxisnahen Demonstratoren. Der größte Treiber für die Energiespeicherintegration ist die Notwendigkeit zur Effizienzsteigerung sowohl aus betriebswirtschaftlicher als auch aus energetischer Sicht.

**Fazit**

Am häufigsten werden stationär aktuell elektrische bzw. elektrochemische Energiespeicher eingesetzt. Auch in Zukunft werden diese Energiespeichertechnologien – zumindest für kurz- und mittelfristige Einsatzoptionen – den Markt dominieren, wobei thermische Energiespeicher auch an Bedeutung gewinnen. Den Lithium-Batterien wird auch bei stationären Anwendungen ein großes Einsatzpotenzial zugetraut. Aber auch noch nicht marktreife Energiespeichertechnologien, wie Redox-Flow-Batterien, können aus Sicht der Umfrageteilnehmer für stationäre Anwendungen zukünftig interessant werden. Eine große Chance für Unternehmen liegt in der Entwicklung und dem Aufbau von hybriden Energiespeichersystemen, bestehend aus elektrischen und elektrochemischen Energiespeichern oder elektrischen und thermischen Energiespeichern.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass eine Energiespeicherintegration zur Optimierung des Energiebezugs für Unternehmen zunehmend interessanter wird, jedoch die Wirtschaftlichkeit immer noch die größte Herausforderung darstellt. Zudem tendieren Unternehmen eher zu einem großen zentralen Energiespeicher, um sich energetisch vom Netz zu entkoppeln. Durch einen zentralen großen Energiespeicher ist ein multifunktionaler Einsatz des Energiespeichers möglich, um diesen besser auszulasten und so die Wirtschaftlichkeit zu erhöhen. Die Kostendegression der Energiespeichertechnologien, welche durch technologische Weiterentwicklung und den zunehmenden Aufbau einer Massenfertigung getrieben wird, ist weiterhin der wichtigste Faktor für die positive Entwicklung der Wirtschaftlichkeit. Laut einer Studie des Fraunhofer ISI (2015) sollen Lithium-Batterien ab 2030 nur noch zwischen 50 und 100 €/kWh kosten und können somit nicht nur bei Elektroautos, sondern auch bei stationären Anwendungen konkurrenzfähig sein. Um die wirtschaftliche Situation von Energiespeichern zu optimieren, ist es außerdem empfehlenswert, Second-Life-Konzepte in Verbindung mit der Elektromobilität zu verfolgen. So kann bspw. durch die erneute Verwendung gebrauchter Batterien aus Elektroautos für stationäre Anwendungen ein positiver ökonomischer und ökologischer Effekt erzielt werden.

# Literatur

**50 Hertz et al. (2018)**
50Hertz Transmission GmbH; Amprion GmbH; TenneT TSO GmbH; TransnetBW GmbH (Hg.): Ausschreibungskalender PRL 2019, 2018. Online verfügbar unter https://www.regelleistung.net/ext/download/Ausschreibungskalender_RL, zuletzt geprüft am 19.06.2019.

**50 Hertz et al. (2019a)**
50Hertz Transmission GmbH; Amprion GmbH; TenneT TSO GmbH; TransnetBW GmbH (Hg.): Abschaltbare Lasten, 2019. Online verfügbar unter https://www.regelleistung.net/ext/static/abla, zuletzt geprüft am 19.02.2019.

**50 Hertz et al. (2019b)**
50Hertz Transmission GmbH; Amprion GmbH; TenneT TSO GmbH; TransnetBW GmbH (Hg.): Allgemeines zur Regelleistung - Technische Aspekte, 2019. Online verfügbar unter https://www.regelleistung.net/ext/static/technical, zuletzt geprüft am 19.06.2019.

**AEE (2012)**
Agentur für Erneuerbare Energien (Hg.): Strom speichern, 2012. Online verfügbar unter http://www.unendlich-viel-energie.de/media/file/160.57_Renews_Spezial_Strom_speichern_mar13_online.pdf, zuletzt geprüft am 09.05.2019.

**Agora (2014)**
Agora Energiewende (Hg.): Stromspeicher in der Energiewende. Untersuchung zum Bedarf an neuen Stromspeichern in Deutschland für den Erzeugungsausgleich, Systemdienstleistungen und im Verteilnetz, Berlin, 2014. Online verfügbar unter http://www.agora-energiewende.de/fileadmin/downloads/publikationen/Studien/Speicher_in_der_Energiewende/Agora_Speicherstudie_Web.pdf, zuletzt geprüft am 13.03.2019.

**Amprion GmbH (2019)**
Amprion GmbH (Hg.): Leitfaden für die Ermittlung der Netzentgelte, 2019. Online verfügbar unter https://www.amprion.net/Strommarkt/Netzkunde/Netzentgelte/Leitfaden-f%C3%BCr-die-Ermittlung-der-Netzentgelte.html, zuletzt geprüft am 14.05.2019.

**Andresen et al. (2017)**
Andresen, L.; Badeda, J.; Bauer, F. et al.: VDI-Statusreport Oktober 2017. Energiespeicher. VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt (Hg.), Düsseldorf, 2017. Online verfügbar unter https://www.vdi.de/presse/publikationen/publikationen-details/pubid/vdi-statusreport-energiespeicher/, zuletzt geprüft am 14.03.2019.

**Bauer (2017)**
Bauer, F.: Definition und Klassifizierung von Energiespeichern. Beitrag in: Sterner und Stadler (2017). Springer Vieweg. Berlin, Heidelberg, 2017.

**Bauer et al. (2017)**
Bauer, F.; Budt, M.; Heindl, E. et al.: Mechanische Energiespeicher. Beitrag in: Sterner und Stadler (2017). Springer Vieweg. Berlin, Heidelberg, 2017.

**BDEW (2016)**
Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (Hg.): Bereitstellung von (System-)Dienstleistungen im Stromversorgungssystem: Beitrag von Energiespeichern, 2016. Online verfügbar unter https://www.bdew.de/media/documents/Awh_20160725_SDL-Energiespeicher.pdf, zuletzt geprüft am 18.10.2018.

**BDEW (2019)**
Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (Hg.): BDEW - Strompreisanalyse Januar 2019. Haushalte und Industrie, Berlin, 2019. Online verfügbar unter https://www.bdew.de/media/documents/190115_BDEW-Strompreisanalyse_Januar-2019.pdf, zuletzt geprüft am 03.07.2019.

**BGH (2009)**
Bundesgerichtshof. Beschluss vom 17.11.2009 - EnVR 56/08 - Pumpspeicherkraftwerke. EnVR 56/08. Online verfügbar unter https://lexetius.com/2009,4223, zuletzt geprüft am 03.07.2019.

**BMF (2017)**
Bundesministerium der Finanzen: Referentenentwurf des Bundesministeriums der Finanzen. Dritte Verordnung zur Änderung der Energiesteuer- und der Stromsteuer-Durchführungsverordnung sowie weitere Verordnungen, 2017. Online verfügbar unter https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Gesetzestexte/Gesetze_Gesetzesvorhaben/Abteilungen/Abteilung_III/18_Legislaturperiode/2017-10-06-Dritte-Aenderung-Energie-Stromsteuer/1-Referentenentwurf.pdf?__blob=publicationFile&v=6, zuletzt geprüft am 17.05.2018.

**BMJV (1999)**
Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. Stromsteuergesetz. StromStG, vom 27.08.2017. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/stromstg/BJNR037810999.html, zuletzt geprüft am 17.05.2018.

**BMJV (2005)**
Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. Energiewirtschaftsgesetz. EnWG, vom 07.07.2005 (BGBl. I. S. 1970, 3621), zuletzt geändert durch Artikel 3 des Gesetzes am 17.12.2018 (BGBl. I S. 2549). Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/enwg_2005/, zuletzt geprüft am 16.05.2019.

**BMJV (2016)**
Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. Verordnung über Vereinbarungen zu abschaltbaren Lasten. AbLaV, vom 16.08.2016 (BGBl. I S. 1984), zuletzt geändert durch Artikel 9 des Gesetzes am 22.12.2016 (BGBl. I S. 3106). Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/ablav_2016/BJNR198400016.html, zuletzt geprüft am 16.05.2019.

**BMWi (2018)**
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hg.): Energieeffizienz in Zahlen. Entwicklungen und Trends in Deutschland 2018, Berlin, 2018. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen-2018.pdf?__blob=publicationFile&v=12, zuletzt geprüft am 24.07.2019.

**BNetzA (2011a)**
Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (Hg.): Leitfaden zur Genehmigung von individuellen Netzentgelten nach § 19 Abs. 2 S. 1 StromNEV und von Befreiungen von den Netzentgelten nach § 19 Abs. 2 S. 2 StromNEV, Bonn, 2011. Online verfügbar unter https://www.bonn-netz.de/Stromnetz/Preisblaetter/Preisblaetter/201109-Leitfaden-19-StromNEV-NetzA.pdf, zuletzt geprüft am 14.05.2019.

**BNetzA (2011b)**
Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (Hg.): Regelenergie. Ausschreibungsverfahren (Sekundärregelenergie), Bonn, 2011. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Service-Funktionen/Beschlusskammern/1BK-Geschaeftszeichen-Datenbank/BK6-GZ/2010/2010_0001bis0999/2010_001bis099/BK6-10-097bis-099/BK6-10-098_Beschluss_2011_04_12.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt geprüft am 14.03.2019.

**BNetzA (2015a)**
Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (Hg.): Festlegungsverfahren zur Weiterentwicklung der Ausschreibungsbedingungen und Veröffentlichungspflichten für Sekundärregelung und Minutenreserve, Bonn, 2015. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Service-Funktionen/Beschlusskammern/1_GZ/BK6-GZ/2015/2015_0001bis0999/BK6-15-158/BK6-15-158_Eckpunktepapier.html?nn=411978, zuletzt geprüft am 19.02.2019.

**BNetzA (2015b)**
Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (Hg.): Netzentgeltsystematik Elektrizität, Bonn, 2015. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Netzentgelte/Netzentgeltsystematik/Bericht_Netzentgeltsystematik_12-2015.pdf?__blob=publicationFile&v=1, zuletzt geprüft am 16.10.2018.

**BNetzA (2018)**
Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (Hg.): Netzentgelt, Bonn, 2018. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/FAQs/DE/Sachgebiete/Energie/Verbraucher/Energielexikon/Netzentgelt.html, zuletzt geprüft am 16.05.2019.

**BNetzA (2019a)**
Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (Hg.): Abschaltbare Lasten, Bonn, 2019. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Engpassmanagement/AbLaV/AbschbareLasten_node.html, zuletzt geprüft am 19.02.2019.

**BNetzA (2019b)**
Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (Hg.): Monitoringbericht 2018, Bonn, 2019. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Bundesnetzagentur/Publikationen/Berichte/2018/Monitoringbericht_Energie2018.pdf?__blob=publicationFile&v=5, zuletzt geprüft am 14.05.2019.

**BNetzA (2019c)**
Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (Hg.): Prosumer, 2019. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/FAQs/DE/Sachgebiete/Energie/Verbraucher/NetzanschlussUndMessung/MsBG/FAQ_Prosumer.html, zuletzt geprüft am 19.02.2019.

**Bolay (2015)**
Bolay, S.: Faktenpapier zur atypischen Netznutzung. Chancen, Beispiele, Rechtsrahmen. Deutscher Industrie- und Handelskammertag; Bundesverband der Energie-Abnehmer e.V. (Hg.), Brüssel, 2015. Online verfügbar unter https://www.vea.de/fileadmin/user_upload/06_Publikationen/Faktenpapier_Atypische_Netznutzung2015.pdf, zuletzt geprüft am 09.05.2019.

**Böttcher und Nagel (2018)**
Böttcher, J.; Nagel, P. (Hg.): Batteriespeicher. Rechtliche, technische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen. Walter de Gruyter GmbH, Berlin, Boston, 2018. ISBN: 978-3-11-045848-0.

**Bussar et al. (2013)**
Bussar, R.; Lippert, M.; Bonduelle, G. et al.: Battery Energy Storage for Smart Grid Applications, 2013. Online verfügbar unter https://eurobat.org/images/news/position-papers/eurobat_smartgrid_publication_may_2013.pdf, zuletzt geprüft am 30.01.2019.

**Consentec (2014)**
Consentec GmbH (Hg.): Beschreibung von Regelleistungskonzepten und Regelleistungsmarkt. Studie im Auftrag der deutschen Übertragungsnetzbetreiber, Aachen, 2014. Online verfügbar unter https://www.regelleistung.net/ext/download/marktbeschreibung, zuletzt geprüft am 16.05.2019.

**Corrodi und Bertsch (2015)**
Corrodi, R.; Bertsch, S.: Hochtemperaturspeicher in der Industrie. Vorstudie. Institut für Energiesysteme; NTB Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs, Buchs, Schweiz, 2015. Online verfügbar unter https://www.fv-ies.ch/fileadmin/NTB_Institute/IES/FV-IES/2015_Hochtemperaturspeicher.pdf, zuletzt geprüft am 18.03.2019.

**DCTI (2014)**
Deutsches CleanTech Institut GmbH (Hg.): Speichertechnologien 2014. Technologien - Anwendungsbereiche - Anbieter, Bonn, 2014. Online verfügbar unter www.dcti.de/fileadmin/user_upload/Publikationen_DCTI-gesammelt/DCTI_Speichertechnologien-2014_web.pdf, zuletzt geprüft am 09.05.2019.

**Deutscher Bundestag (2005a)**
Deutscher Bundestag. Stromnetzentgeltverordnung. StromNEV, vom 25.07.2005 (BGBl. I S. 2225), zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung am 14.03.2019 (BGBl. I S. 333). Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/stromnev/StromNEV.pdf, zuletzt geprüft am 14.05.2019.

**Deutscher Bundestag (2005b)**
Deutscher Bundestag. Verordnung über den Zugang zu Elektrizitätversorgungsnetzen (Stromnetzzugangsverordnung). StromNZV, vom 25.07.2005 (BGBl. I S. 2243),zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung am 19.12.2017 (BGBl. I S. 3988). In: Bundesgesetztblatt Teil 1 (BGBl. I). Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/stromnzv/, zuletzt geprüft am 14.05.2019.

**Deutscher Bundestag (2017)**
Deutscher Bundestag. Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien. EEG 2017, vom 17.07.2017. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/BJNR106610014.html, zuletzt geprüft am 23.12.2017.

**DIHK und VEA (2014)**
Deutscher Industrie- und Handelskammertag Berlin/Brüssel; Bundesverband der Energieabnehmer e. V. (Hg.): Faktenpapier Eigenerzeugung von Strom. Rahmenbedingungen, Trends, Beispiele, 2014. Online verfügbar unter https://www.vea.de/fileadmin/user_upload/06_Publikationen/Faktenpapier_DIHK_VEA2014.pdf, zuletzt geprüft am 24.07.2019.

**Elsner und Sauer (2015)**
Elsner, P.; Sauer, D. Uwe (Hg.): Energiespeicher. Technologiesteckbrief zur Analyse "Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050", 2015. Online verfügbar unter http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Publikationen/Materialien/ESYS_Technologiesteckbrief_Energiespeicher.pdf , zuletzt geprüft am 28.03.2017.

**EPEX SPOT (2019)**
EPEX SPOT (Hg.): Produkte: kontinuierlicher Intraday-Handel, 2019. Online verfügbar unter https://www.epexspot.com/de/produkte/intradaycontinuous/intraday_vorlaufzeit, zuletzt geprüft am 25.03.2019.

**Fahlbusch (2015)**
Fahlbusch, E. (Hg.): Batterien als Energiespeicher. Beispiele, Strategien, Lösungen. 1. Auflage. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich, 2015. ISBN: 978-3-410-24478-3.

**Fraunhofer ISI (2015)**
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (Hg.): Technologie-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030, Karlsruhe, 2015. Online verfügbar unter www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/t/de/publikationen/TRM-SES.pdf, zuletzt geprüft am 16.05.2019.

**Fuchs et al. (2012)**
Fuchs, G.; Lunz, B.; Leuthold, M. et al.: Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität. Überblick zum Potenzial und zu Perspektiven des Einsatzes elektrischer Speichertechnologien. RWTH Aachen, Aachen, 2012. Online verfügbar unter http://www.sefep.eu/activities/projects-studies/Ueberblick_Speichertechnologien_SEFEP_deutsch.pdf, zuletzt geprüft am 09.05.2018.

**FVEE (2010)**
ForschungsVerbund Erneuerbare Energien (Hg.): Forschen für das Zeitalter der erneuerbaren Energien. Jubiläumstagung des FVEE, 11. - 12. Oktober 2010, Umweltforum Berlin, Berlin, 2010.

**FVEE (2015)**
ForschungsVerbund Erneuerbare Energien (Hg.): Forschung für die Wärmewende. Jahrestagung 2015 des ForschungsVerbunds Erneuerbare Energien 3. und 4. November 2015 Umweltforum Berlin, Berlin, 2015.

**Genoese (2013)**
Genoese, F.: Modellgestützte Bedarfs- und Wirtschaftlichkeitsanalyse von Energiespeichern zur Integration erneuerbarer Energien in Deutschland. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2013.

**Gobmaier (2014)**
Gobmaier, T.: Überblick zu Stromspeichertechniken. Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH, München, 2014. Online verfügbar unter https://www.ffegmbh.de/download/veroeffentlichungen/495_stromspeichertechniken/ffe_20141016_stromspeichertechniken_go.pdf, zuletzt geprüft am 16.05.2019.

**Graeber (2013)**
Graeber, D. Richard: Handel mit Strom aus erneuerbaren Energien. Kombination von Prognosen. Dissertation. Universität Hohenheim, Stuttgart, 2013.

**Hauer et al. (2013)**
Hauer, A.; Hiebler, S.; Reuß, M.: Wärmespeicher. 5., vollständig überarbeitete Auflage. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2013. ISBN: 978-3-8167-8366-4.

**Hauer (2017)**
Hauer, A.: Thermische Energiespeicher. Beitrag in: Sterner und Stadler (2017). Springer Vieweg. Berlin, Heidelberg, 2017.

**Herbener (2011)**
Herbener, F.: Batterien und Schwungradspeicher und deren Verwendung in USV-Anlagen, 2011. Online verfügbar unter www.piller.com/de-DE/documents/2133/batteries-and-flywheels-de.pdf, zuletzt geprüft am 15.05.2019.

**Hewicker et al. (2013)**
Hewicker, C.; Raadschelders, J.; Werner, O. et al.: Energiespeicher in der Schweiz. Bedarf, Wirtschaftlichkeit und Rahmenbedingungen im Kontext der Energiestrategie 2050. Bundesamt für Energie BFE (Hg.), 2013. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/profile/Tim_Mennel/publication/264698096_Energiespeicher_in_der_Schweiz_Bedarf_Wirtschaftlichkeit_und_Rahmenbedingungen_im_Kontext_der_Energiestrategie_2050/links/53eb970f0cf202d087ccf34e/Energiespeicher-in-der-Schweiz-Bedarf-Wirtschaftlichkeit-und-Rahmenbedingungen-im-Kontext-der-Energiestrategie-2050.pdf?origin=publication_detail, zuletzt geprüft am 16.05.2019.

**Hölder (2014)**
Hölder, D.: Energiespeicher im Strommarkt: Aufgaben und Rahmenbedingungen. DUH Netzwerk Energiespeicher, Berlin, 16.09.2014. Online verfügbar unter http://www.clens.eu/fileadmin/Daten/Mediathek/Termine/140916_DUH_Stromspeicher_CLENS.pdf.

**IEA (2014)**
International Energy Agency (Hg.): Technology Roadmap Energy Storage, 2014. Online verfügbar unter https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapEnergystorage.pdf, zuletzt geprüft am 14.03.2019.

**Kanngießer (2013)**
Kanngießer, A.: Entwicklung eines generischen Modells zur Einsatzoptimierung von Energiespeichern für die techno-ökonomische Bewertung stationärer Speicheranwendungen. Dissertation. TU Dortmund, Dortmund, 2013.

**Kerskes et al. (2011)**
Kerskes, H.; Bertsch, F.; Mette, B. et al.: Thermochemische Energiespeicher, 2011. Online verfügbar unter https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cite.201100091, zuletzt geprüft am 15.05.2019.

**Köhler et al. (2018)**
Köhler, A. R.; Baron, Y.; Bulach, W. et al.: Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands. Stationäre Energiespeichersysteme in der industriellen Produktion, 2018. Online verfügbar unter https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/downloads/studien/VDI-ZRE_Studie_Energiespeichertechnologien_bf.pdf, zuletzt geprüft am 09.10.2018.

**Korthauer (2013)**
Korthauer, R.: Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2013. ISBN: 978-3-642-30653-2.

**Kübler und Fisch (2005)**
Kübler, R.; Fisch, N.: Wärmespeicher. 4. Aufl. TÜV-Verlag, Köln, 2005. ISBN: 3410179879.

**Kurzweil und Dietlmeier (2018)**
Kurzweil, P.; Dietlmeier, O. K.: Elektrochemische Speicher. Superkondensatoren, Batterien, Elektrolyse-Wasserstoff, Rechtliche Rahmenbedingungen. 2. Auflage. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2018. ISBN: 978-3-658-21829-4.

**Neugebauer (2014)**
Neugebauer, R. (Hg.): Handbuch ressourcenorientierte Produktion. Hanser Verlag, München, 2014. ISBN: 9783446430082.

**Oertel (2008)**

Oertel, D.: Energiespeicher. Stand und Perspektiven ; Sachstandsbericht zum Monitoring "Nachhaltige Energieversorgung". Büro für Technikfolgen-Abschätzung bei Deutschen Bundestag (TAB), Berlin, 2008 (Nr. 123). Online verfügbar unter https://www.tab-beim-bundestag.de/de/pdf/publikationen/berichte/TAB-Arbeitsbericht-ab123.pdf, zuletzt geprüft am 18.03.2019.

**Riegel et al. (2017)**

Riegel, B.; Ohms, D.; Cottaneo, E. et al.: Elektrochemische Speicher. Beitrag in: Sterner und Stadler (2017). Springer Vieweg. Berlin, Heidelberg, 2017.

**Rothacher et al. (2018)**

Rothacher, T.; Schwarzburger, H.; Tinke, T.: Stromspeicher für Gewerbe und Industrie. Technik, Auswahl und Auslegung. Mit Anmerkungen für Heimspeicher. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich, 2018. ISBN: 9783410257561.

**Rundel et al. (2013)**

Rundel, P.; Meyer, B.; Meiller, M. et al.: Speicher für die Energiewende. Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Sulzbach-Rosenberg, 2013. Online verfügbar unter http://www.umsicht-suro.fraunhofer.de/content/dam/umsicht-suro/de/documents/studien/, zuletzt geprüft am 21.11.2018.

**Schaab et al. (2018)**

Schaab, D. Andreas; Laribi, R.; Zimmermamn, F.: Energiespeicher für Rekuperation in Industriemaschinen. Untersuchung eines Anwendungsszenarios für den Einsatz von Stromspeichern. In: wt Werkstatttechnik online, Jahrgang 108, Nr. 5, S. 325–331, 2018.

**Schossig und Haussmann (2011)**

Schossig, P.; Haussmann, T.: Wärme- und Kältespeicherung - Stand der Technik und Ausblick. Leibniz-Institut Lifis, 2011. Online verfügbar unter https://www.leibniz-institut.de/archiv/schossig_11_04_11.pdf, zuletzt geprüft am 18.03.2019.

**SMA (2010)**

SMA Solar Technology AG (Hg.): Gewerblicher Eigenverbrauch von Solarstrom, 2010. Online verfügbar unter https://www.sma.de/partner/expertenwissen/gewerblicher-eigenverbrauch-von-solarstrom.html, zuletzt geprüft am 24.07.2019.

**Stadler (2017)**
Stadler, I.: Elektrische Energiespeicher. Beitrag in: Sterner und Stadler (2017). Springer Vieweg. Berlin, Heidelberg, 2017.

**Sterner et al. (2015)**
Sterner, M.; Eckert, F.; Thema, M. et al.: Der positive Beitrag dezentraler Batteriespeicher für eine stabile Stromversorgung. Kurzstudie, 2015. Online verfügbar unter https://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/BEE_HM_FENES_Kurzstudie_Der_positive_Beitrag_von_Batteriespeichern_2015.pdf, zuletzt geprüft am 18.10.2018.

**Sterner und Stadler (2017)**
Sterner, M.; Stadler, I. (Hg.): Energiespeicher. Bedarf Technologien Integration. 2. Auflage. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2017. ISBN: 978-3-662-48893-5.

**Thema (2017)**
Thema, M.: Vergleich der Speichersysteme. Beitrag in: Sterner und Stadler (2017). Springer Vieweg. Berlin, Heidelberg, 2017.

**Thomas (2017)**
Thomas, H.: Rechtliche Rahmenbedingungen der Energiespeicher und der Sektorkopplung. EnWG mit Strommarktgesetz, EEG 2017 und KWKG 2016. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2017. ISBN: 978-3-658-17640-2.

**VDE (2013)**
Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (Hg.): Versorgungszuverlässigkeit und Spannungsqualität in Deutschland. Fakten, 2013. Online verfügbar unter https://www.vde.com/resource/blob/824912/2a9a511f3dd6da0e5c00dab2d4db4398/fnn-fakten-versorgungsqualitaet-2013-03-11--1--data.pdf, zuletzt geprüft am 24.01.2019.

**VDEW (1999)**
Verband der Elektrizitätswirtschaft e. V. (Hg.): Repräsentative VDEW-Lastprofile, 1999. Online verfügbar unter https://www.bdew.de/media/documents/1999_Repraesentative-VDEW-Lastprofile.pdf, zuletzt geprüft am 16.10.2018.

**Zapf (2017)**
Zapf, M.: Stromspeicher und Power-to-Gas im deutschen Energiesystem. Rahmenbedingungen, Bedarf und Einsatzmöglichkeiten. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2017. ISBN: 978-3-658-15072-3.

**ZVEI (2013)**
Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (Hg.): Beitrag industrieller Blindleistungs-Kompensationsanlagen und -Verbraucher für ein innovatives Blindleistungs-Management in der Stromversorgung Deutschlands, 2013. Online verfügbar unter https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2013/september/Studie_zur_Optimierung_des_Netzbetriebs_durch_Blindleistungs-Kompensation/Beitrag-industrieller-Blindleistungs-Kompensationsanlagen.pdf, zuletzt geprüft am 24.01.2019.