

Zukunft elektrochemischer Speicher für Hybridantriebe

- Studienreport am Beispiel von Hybridrangierlokomotiven -



Studienreports des Lehrstuhls für Produktionswirtschaft, Band 2

Christian Kaucher, M.Sc.

Dipl.-Ing. Martin Kunath

Univ.-Prof. Dr. habil. Herwig Winkler

Impressum

Kaucher, Christian / Kunath, Martin / Winkler, Herwig: Zukunft elektrochemischer Speicher für Hybridantriebe

- Studienreport am Beispiel von Hybridrangierlokomotiven -

Schriftenreihe: Studienreports des Lehrstuhls für Produktionswirtschaft, Band 2

Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg

IKMZ – Universitätsbibliothek

Cottbus, 24. Juni 2018

Vorwort

Executive Summary

I. Einleitende Vorbemerkungen zur Studie

II. Studiendesign und strukturelle Daten

1. Konzeption der Studie
2. Strukturelle Daten des Teilnehmerkreises

III. Ergebnisse der Befragung

1. Bedeutung verschiedener Batterieparameter
2. Eignung aktueller Technologien für Hybridantriebe
3. Detailbewertung der Lithium-Ionen-Technologie
4. Eignung neuer Technologien für Hybridantriebe

IV. Produkt- und Technologie-Roadmap

1. Erläuterungen zur Roadmap
2. Darstellung der Roadmap

V. Quellen

VI. Anhang

Vorwort

Executive Summary

- I. Einleitende Vorbemerkungen zur Studie**
- II. Studiendesign und strukturelle Daten**
 1. Konzeption der Studie
 2. Strukturelle Daten des Teilnehmerkreises
- III. Ergebnisse der Befragung**
 1. Bedeutung verschiedener Batterieparameter
 2. Eignung aktueller Technologien für Hybridantriebe
 3. Detailbewertung der Lithium-Ionen-Technologie
 4. Eignung neuer Technologien für Hybridantriebe

Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs ist derzeit eines der großen Zukunftsthemen der Automobilindustrie. Das Thema ist nicht nur für den Automobilsektor relevant, sondern bietet auch Potential für andere Bereiche der Mobilität. Ein Beispiel ist die Umrüstung von Diesel-Rangierlokomotiven und Diesel-Triebwagen auf hybride Antriebe. In verschiedenen Projekten konnte bereits gezeigt werden, dass sich Emissionen und Kraftstoffverbrauch so erheblich reduzieren lassen.

Als wichtigste Komponente des hybriden oder elektrischen Antriebsstrangs ist der Energiespeicher zu sehen. Er bestimmt wesentlich über die erzielbare Reichweite sowie die Verbrauchs- und Leistungsparameter des Fahrzeugs. In dieser Studie wird daher ein Überblick über aktuell verfügbare und sich in Entwicklung befindende Speichertechnologien sowie eine Einschätzung zu deren Weiterentwicklung gegeben. Der Fokus liegt dabei auf der Eignung der Speicher für die Anwendung in Hybridrangierlokomotiven.

Zu diesem Zweck wurde einerseits eine umfassende Recherche in aktueller Fachliteratur durchgeführt. Andererseits erfolgte eine Befragung von Experten für elektrochemische Speicher aus Wissenschaft und Industrie. Darauf aufbauend erfolgte eine Bewertung der Eignung aktueller und zukünftiger Speichertechnologien für die Verwendung in Hybridrangierlokomotiven. Zur Visualisierung der zukünftigen Entwicklungen wurde eine Produkt- und Technologie-Roadmap für die relevanten Technologien erstellt.

Wir hoffen, dass unsere Arbeit bei der Leserschaft auf hohes Interesse stößt.

M.Sc. Christian Kaucher
Dipl.-Ing. Martin Kunath
Univ.-Prof. Dr. habil. Herwig Winkler

Vorwort

Executive Summary

- I. Einleitende Vorbemerkungen zur Studie**
- II. Studiendesign und strukturelle Daten**
 1. Konzeption der Studie
 2. Strukturelle Daten des Teilnehmerkreises
- III. Ergebnisse der Befragung**
 1. Bedeutung verschiedener Batterieparameter
 2. Eignung aktueller Technologien für Hybridantriebe
 3. Detailbewertung der Lithium-Ionen-Technologie
 4. Eignung neuer Technologien für Hybridantriebe

Kernaussagen der Studie

- Im Zeitraum von **Dezember 2017 bis März 2018** wurden vom Lehrstuhl für Produktionswirtschaft Experten zur Zukunft elektrochemischer Speicher für Hybridantriebe befragt. Der Fokus der Befragung lag auf Speichern für Hybridrangierlokomotiven. Die Erkenntnisse lassen sich jedoch auch auf andere Hybridfahrzeuge übertragen.
- Insgesamt konnten **21 vollständige Antwortsätze** ausgewertet werden. Die Teilnehmer stammen zu etwa 40 % aus dem wissenschaftlichen Bereich und zu etwa 60 % aus der Industrie.
- Die wichtigsten Speicherparameter für Hybridantriebe sind aus Sicht der Experten die **Leistung** der Speicher (spez. Leistung [W/kg] und Leistungsdichte [W/L]), die **Lebensdauer** (zyklisch und kalendarisch) sowie die **Sicherheit**. Im Fall des Parameters Preis [€/kWh] wurden Hinweise auf eine Überschätzung der Bedeutung des Parameters durch die Wissenschaft gefunden.
- Für die nächsten mindestens 15 Jahre wird die **Lithium-Ionen-Technologie** die dominierende Speichertechnologie für Hybridrangierlokomotiven darstellen. Stärken der Technologie sind die hohe spezifische Energie und Energiedichte, die hohe zyklische Lebensdauer sowie die hohe Leistung.* Bislang sind Lithium-Ionen-Batterien noch teurer als alternative Speichertechnologien wie die NiCd-Technologie. In den nächsten Jahren ist jedoch mit weiteren Preissenkungen zu rechnen. Verschiedene Untersuchungen erwarten bis zum Jahr 2030 Preise von etwa 100 €/kWh.

* Der Begriff Lithium-Ionen-Technologie stellt einen Sammelbegriff für viele verschiedene Kombinationen von Anoden- und Kathodenmaterialien dar. Die Eigenschaften der unterschiedlichen Materialsysteme unterscheiden sich zum Teil deutlich. Zudem hat der Aufbau der Zellen erheblichen Einfluss auf die Eigenschaften. Die Angaben zu den Stärken sind daher Tendenzen zu sehen und gelten nicht für alle Lithium-Ionen-Batterien gleichermaßen.

Kernaussagen der Studie

- Die derzeit in den Medien häufig thematisierte Knappheit verschiedener **Rohstoffe** stellt nach aktueller Einschätzung kein Hindernis für die Verbreitung der Technologie dar. Sie verdeutlicht jedoch die Wichtigkeit eines effektiven Recyclings gebrauchter Batterien.
- Derzeit kommen in Hybridantrieben verbreitet **NiCd- bzw. NiMH-Batterien** zum Einsatz. Aufgrund der besseren Charakteristika und der zu erwartenden Preissenkung werden diese zunehmend durch die Lithium-Ionen-Technologie verdrängt. Aufgrund der langen Nutzungsdauer von Rangierlokomotiven werden NiCd-Batterien jedoch in diesem Bereich noch mehrere Jahrzehnte für die Instandhaltung relevant sein.
- Ab dem Jahr 2030 werden zunehmend **alternative Speichertechnologien** auf den Markt drängen. Diese haben teilweise das Potential, die Lithium-Ionen-Technologie abzulösen. Als relevant sind Hybridkondensatoren sowie die Lithium-Schwefel- und die Lithium-Luft-Technologie zu sehen.
 - **Hybridkondensatoren** (beispielsweise Lithium-Ionen-Kondensatoren) stellen eine Mischform aus Superkondensatoren und Batterien dar. Sie bieten eine sehr hohe Leistung bei einem im Vergleich zu herkömmlichen Superkondensatoren erheblich erhöhten Energiegehalt. Erste Speicher auf Basis der Technologie sind bereits am Markt erhältlich. Bis zu einem Einsatz im Mobilitätsbereich sind jedoch noch weitere Entwicklungen notwendig. Der Energiegehalt ist im Vergleich zu Batterien weiterhin sehr gering, bislang sind lediglich kleinformatische Speicher verfügbar und der Preis pro kWh ist sehr hoch.

Kernaussagen der Studie

- Die **Lithium-Schwefel-Technologie** basiert auf der Materialkombination aus Lithium und Schwefel. Diese bietet eine sehr hohe theoretische spezifische Energie und Energiedichte. Aktuell befindet sich die Technologie im Entwicklungsstadium. Erste Unternehmen arbeiten an der Kommerzialisierung der Technologie. Die Technologie ist für den Einsatz in Hybridantrieben bedingt geeignet. Bislang ist die zyklische Lebensdauer von Lithium-Schwefel-Batterien zu gering. Zudem verfügen die Batterien bislang lediglich über eine geringe Leistung.
- Bei der **Lithium-Luft-Technologie** kommt Sauerstoff aus der Umgebungsluft als Reaktionspartner des Lithiums zum Einsatz. Die Technologie hat das Potential eine extrem hohe spezifische Energie und Energiedichte zu erreichen. Derzeit befindet sich die Technologie in einem frühen Entwicklungsstadium. Defizite sind wie bei der Lithium-Schwefel-Technologie insbesondere Lebensdauer und Leistung. Mit einem Einsatz der Technologie in Fahrzeugen ist allenfalls langfristig (nach 2040) zu rechnen.

Vorwort

Executive Summary

I. Einleitende Vorbemerkungen zur Studie

II. Studiendesign und strukturelle Daten

1. Konzeption der Studie
2. Strukturelle Daten des Teilnehmerkreises

III. Ergebnisse der Befragung

1. Bedeutung verschiedener Batterieparameter
2. Eignung aktueller Technologien für Hybridantriebe
3. Detailbewertung der Lithium-Ionen-Technologie
4. Eignung neuer Technologien für Hybridantriebe

Elektrochemische Energiespeicher basieren auf der Umwandlung chemischer Energie in elektrische Energie und der Umkehrung dieses Vorgangs.¹ Es werden Primär- und Sekundärelemente unterschieden. Primärelemente wandeln chemische Energie irreversibel in elektrische Energie um, während Sekundärelemente wieder aufgeladen werden können. Sekundärelemente werden auch als Akkumulatoren bezeichnet.²

Das Deutsche Institut für Normung definiert den Begriff **Akkumulator** als „Energiespeicher, der zugeführte elektrische Energie als chemische Energie speichern (Ladung) und bei Bedarf als elektrische Energie abgeben kann (Entladung)“.³ In dieser Studie werden Akkumulatoren für den Betrieb von Elektro- und Hybridfahrzeugen betrachtet. Entsprechende Akkumulatoren werden als Antriebs- oder Traktionsbatterien bezeichnet.⁴

Darüber hinaus werden auch **Superkondensatoren** betrachtet. Diese nutzen sowohl elektrostatische als auch elektrochemische Speichermechanismen.⁵



Lithium-Ionen-Speicherzellen⁶

¹ Vgl. Huggins (2016), S. 119 f.

³ DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (1985), S. 1

⁵ Vgl. Huggins (2016), S. 72

² Vgl. Kurzweil (2015), S. 193

⁴ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (1985), S. 6

⁶ Quelle: Malcolm Koo, abgerufen von [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lithium-ion_cell_\(18650\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lithium-ion_cell_(18650).jpg) am 24.06.2018 (CC-BY-SA 4.0),

Ein **Hybridfahrzeug** ist gemäß der Definition der Vereinten Nationen ein Fahrzeug, welches von einem hybriden Antriebsstrang angetrieben wird. Von einem hybriden Antriebsstrang spricht man, wenn der Antriebsstrang mindestens zwei Energiewandler und zwei Energiespeichersysteme (an Bord des Fahrzeugs) enthält. Wenn es sich bei den Energiespeichersystemen um einen verbrauchbaren Treibstoff und um einen Speicher für elektrische Energie handelt, spricht man von einem hybrid-elektrischen Antriebsstrang. Ein entsprechend angetriebenes Fahrzeug wird als **Hybridelektrofahrzeug (HEV)** bezeichnet.¹ Diese Studie befasst sich mit hybrid-elektrischen Antrieben. Andere Speichertechnologien, wie mechanische und hydraulische Speicher, werden nicht betrachtet.

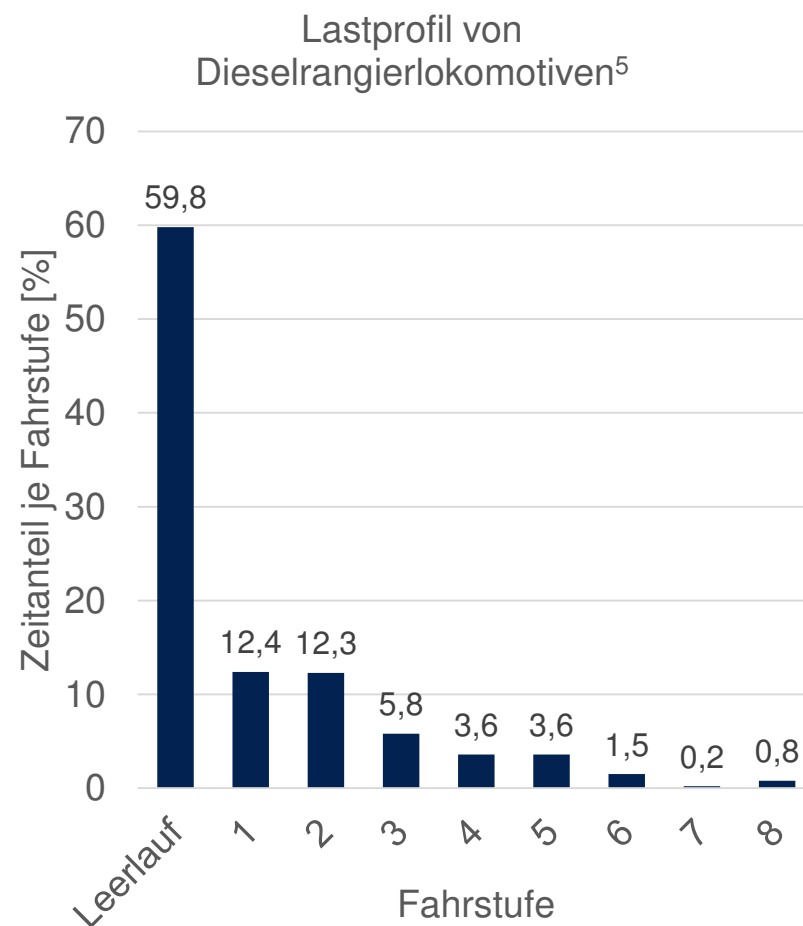


Hybridrangierlokomotive
(BR203H von Alstom)²

¹ Vgl. United Nations (2005), S. 6

² Quelle: Kache (2014), S. 34

Verbrennungsmotoren weisen im Hochlastbetrieb einen besseren Wirkungsgrad auf, als im Teillastbetrieb.¹ Aus dem Lastprofil von Rangierlokomotiven geht hervor, dass dieser Anteil bei Rangierlokomotiven gering ist. Durch die **Hybridisierung** wird eine Lastpunktanhebung und somit ein Betrieb in einem effizienteren Betriebsbereich ermöglicht. Überschüssige mechanische Energie kann umgewandelt und in der Traktionsbatterie zwischengespeichert werden. Wird Energie zum elektrischen Fahren oder zum Beschleunigen benötigt, steht diese in der Traktionsbatterie zur Verfügung.² In niedrigen Lastbereichen ist ein reiner Batteriebetrieb möglich. In einigen Fällen ist es zudem möglich einen Verbrennungsmotor geringerer Leistung einzusetzen (Downsizing), der kontinuierlich an einem effizienten Betriebspunkt betrieben wird.³ Zusätzlich ermöglicht der Einsatz einer Traktionsbatterie die Rückgewinnung von Energie bei Bremsvorgängen.⁴



¹ Vgl. Hofmann (2014), S. 105

² Vgl. Hofmann (2014), S. 106 f.

³ Vgl. Lu et al. (2008), S. 2

⁴ Vgl. Hofmann (2014), S. 117 ff.

⁵ Zu den Daten vgl. United States Environmental Protection Agency (1998), S. 52

Vorwort

Executive Summary

I. Einleitende Vorbemerkungen zur Studie

II. Studiendesign und strukturelle Daten

1. Konzeption der Studie
2. Strukturelle Daten des Teilnehmerkreises

III. Ergebnisse der Befragung

1. Bedeutung verschiedener Batterieparameter
2. Eignung aktueller Technologien für Hybridantriebe
3. Detailbewertung der Lithium-Ionen-Technologie
4. Eignung neuer Technologien für Hybridantriebe

- Die Studie war als Einzelbefragung mehrerer Experten konzeptioniert. Experten stellen eine besonders wertvolle Quelle für Informationen über technologische Entwicklungen dar.¹ Durch die Einzelbefragung von mehreren Experten können verschiedene Fehlerquellen, wie der Einfluss sozialer und psychologischer Faktoren, vermieden werden.²
- Zielgruppe der Befragung waren Experten für elektrochemische Energiespeicher aus Wissenschaft und Wirtschaft. Aufgrund des langen Zeithorizonts bis zur Kommerzialisierung neuer Speichermaterialien³ wurden hauptsächlich Wissenschaftler aus der anwendungsnahen Forschung befragt. Auf die Zusammensetzung des Teilnehmerkreises wird im Folgenden detaillierter eingegangen.
- Die Befragung wurde als Online-Befragung mit Hilfe des Umfragetools *LimeSurvey* durchgeführt. Im Fragebogen kamen offene, halboffene sowie geschlossene Fragen zum Einsatz. Insbesondere Optionsfelder (Ratings), Mehrfachauswahllisten und Freitextfragen wurde häufig verwendet. Die Inhalte des Fragebogens sind auf den folgenden Seiten dargestellt.

¹ Vgl. Geschka (1995), S. 631

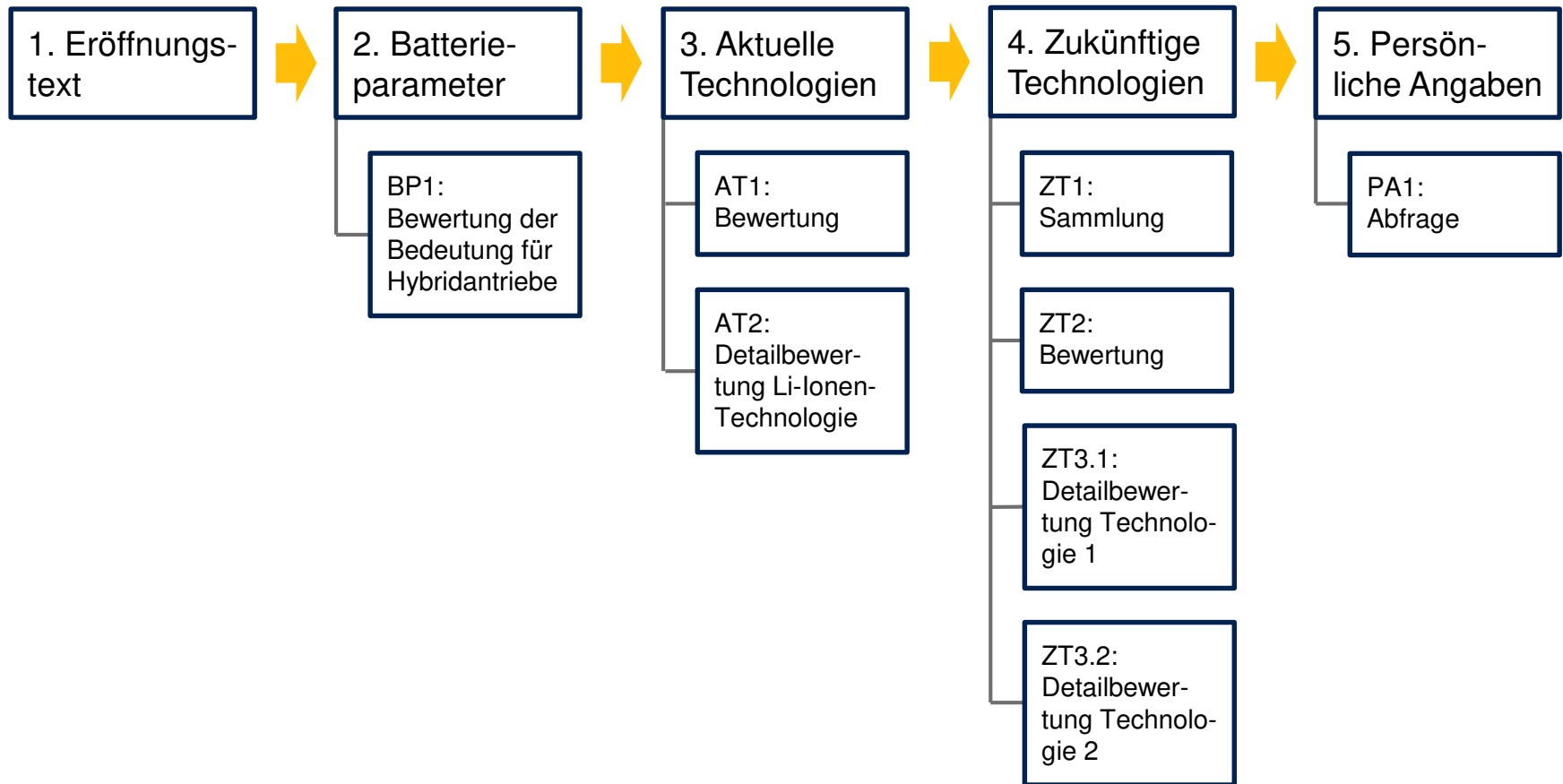
² Vgl. Roper et al. (2011), S. 34 f.

³ Vgl. Ketterer et al. (2009), S. 25

Der Fragebogen gliederte sich in einen Eröffnungstext sowie vier Fragengruppen. Die Struktur des Fragebogens ist auf der nächsten Folie grafisch dargestellt. Die Inhalte der vier Fragengruppen waren die Folgenden:

- In der ersten Fragengruppe wurde zunächst die Einschätzung der Experten zur Bedeutung verschiedener Speicherparameter für den Einsatz von Speichern in Hybridantrieben abgefragt. Den Teilnehmern wurden verschiedene, in der Literatur identifizierte, Speicherparameter zur Bewertung vorgegeben. Zusätzlich bestand die Möglichkeit weitere Parameter zu ergänzen und zu bewerten.
- Im zweiten Abschnitt wurden die Einschätzungen zu aktuellen Speichertechnologien abgefragt. Zunächst wurde deren Eignung, zukünftige Weiterentwicklungen sowie die Entwicklung der Bedeutung der Technologien für Hybridantriebe abgefragt. Im Folgenden wurden vertiefende Fragen zur Lithium-Ionen-Technologie gestellt, da diese derzeit im Fokus der Forschung steht.
- Die dritte Fragengruppe befasste sich mit zukünftige Speichertechnologien. Darin wurde zunächst abgefragt, welche Technologien den Teilnehmern bekannt sind. Im Anschluss erfolgte eine Bewertung dieser. Zu den zwei aus Sicht des jeweiligen Experten relevantesten Technologien wurden Detailfragen gestellt. Diese orientierten sich an den Fragen zur Lithium-Ionen-Technologie.
- In der letzten Fragengruppe wurden persönliche Angaben abgefragt. Die bezogen sich auf Arbeitgeber, Wirtschaftszweig, Funktion, Berufserfahrung sowie Kontaktmöglichkeiten. Zuletzt bestand die Möglichkeit abschließende Kommentare und Verbesserungsvorschläge zum Fragebogen abzugeben.

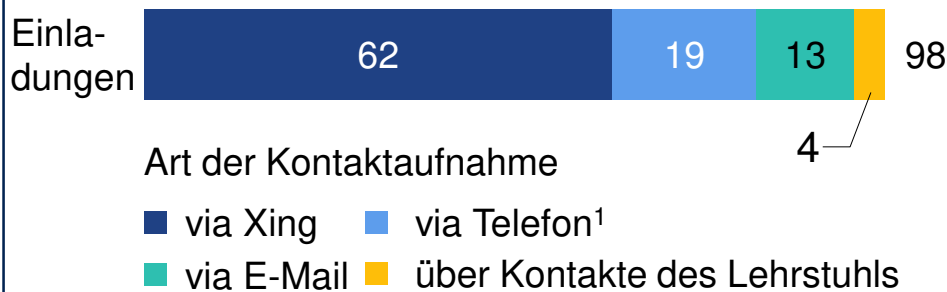
Struktur des Fragebogens:¹



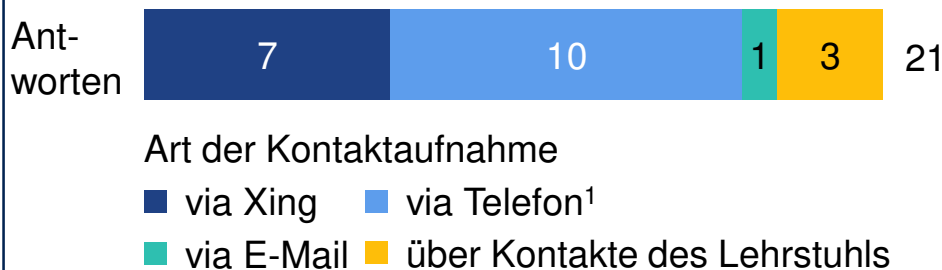
¹ Quelle: Verfasser

Ergebnis

Einladungen (Häufigkeit absolut)



Antworten (Häufigkeit absolut)



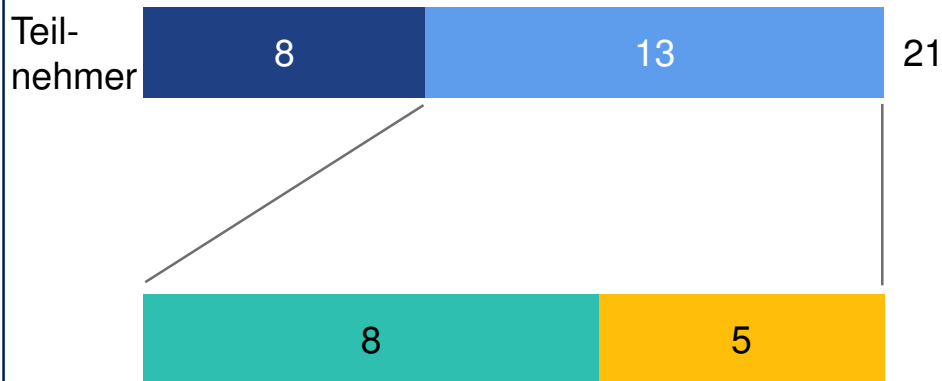
¹ Es sind lediglich Kontaktaufnahmen enthalten, bei denen ein Adressat erreicht wurde.

Aussagen

- Insgesamt wurden 98 Kontaktanfragen gestellt.
- Die Anfragen wurden über
 - XING,
 - E-Mail,
 - Telefon und
 - Kontakte des Lehrstuhls gestellt.
- Es konnten 21 vollständige Antwortsätze ausgewertet werden. Dies entspricht einer Antwortquote von 19 %.
- Es wurde eine starke Abhängigkeit von der Art der Kontaktaufnahme festgestellt.
- Der Teilnehmerkreis beschränkte sich auf deutschsprachige Teilnehmer.

Ergebnis

Aufteilung des Teilnehmerkreises auf Forschungseinrichtungen und Unternehmen (Häufigkeit absolut)



Arbeitgeber der Teilnehmer

- Lehrstühle / Institute
- Industrieunternehmen
- Zellen- / Batteriehersteller
- Sonstige

Aussagen

- Es wurden Experten aus Wissenschaft und Industrie befragt.
 - Lehrstühle/Institute: 38 %
 - Industrie: 62 %
- Teilnehmer aus der Industrie waren sowohl Mitarbeiter von Zellen- / Batterieherstellern als auch von Technologieanwendern wie beispielsweise Automobilherstellern
- Bei den Teilnehmern handelte es sich hauptsächlich um
 - Entwicklungsingenieure,
 - Wissenschaftliche Mitarbeiter und
 - Vertriebsmitarbeiter.

Vorwort

Executive Summary

I. Einleitende Vorbemerkungen zur Studie

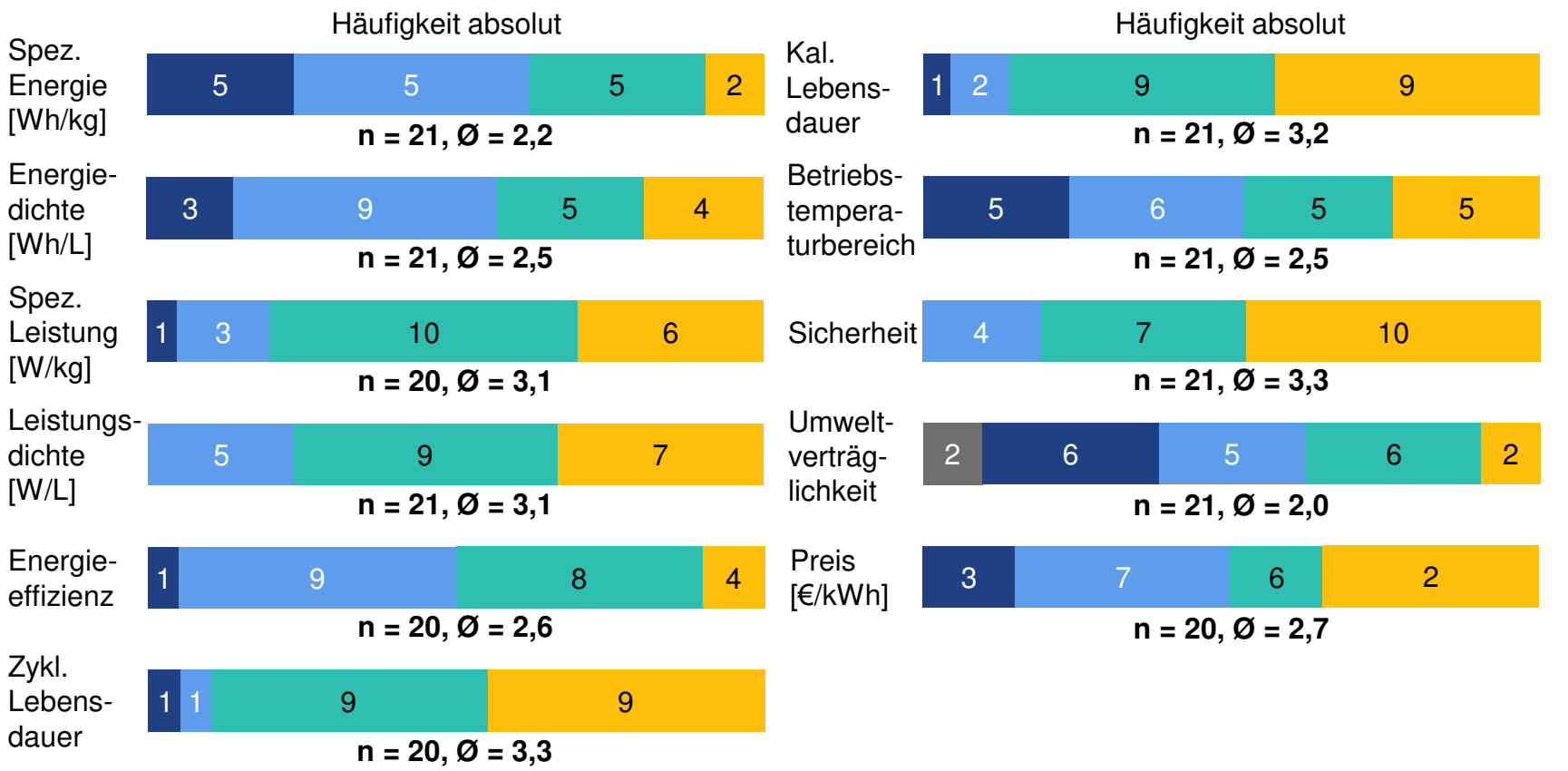
II. Studiendesign und strukturelle Daten

1. Konzeption der Studie
2. Strukturelle Daten des Teilnehmerkreises

III. Ergebnisse der Befragung

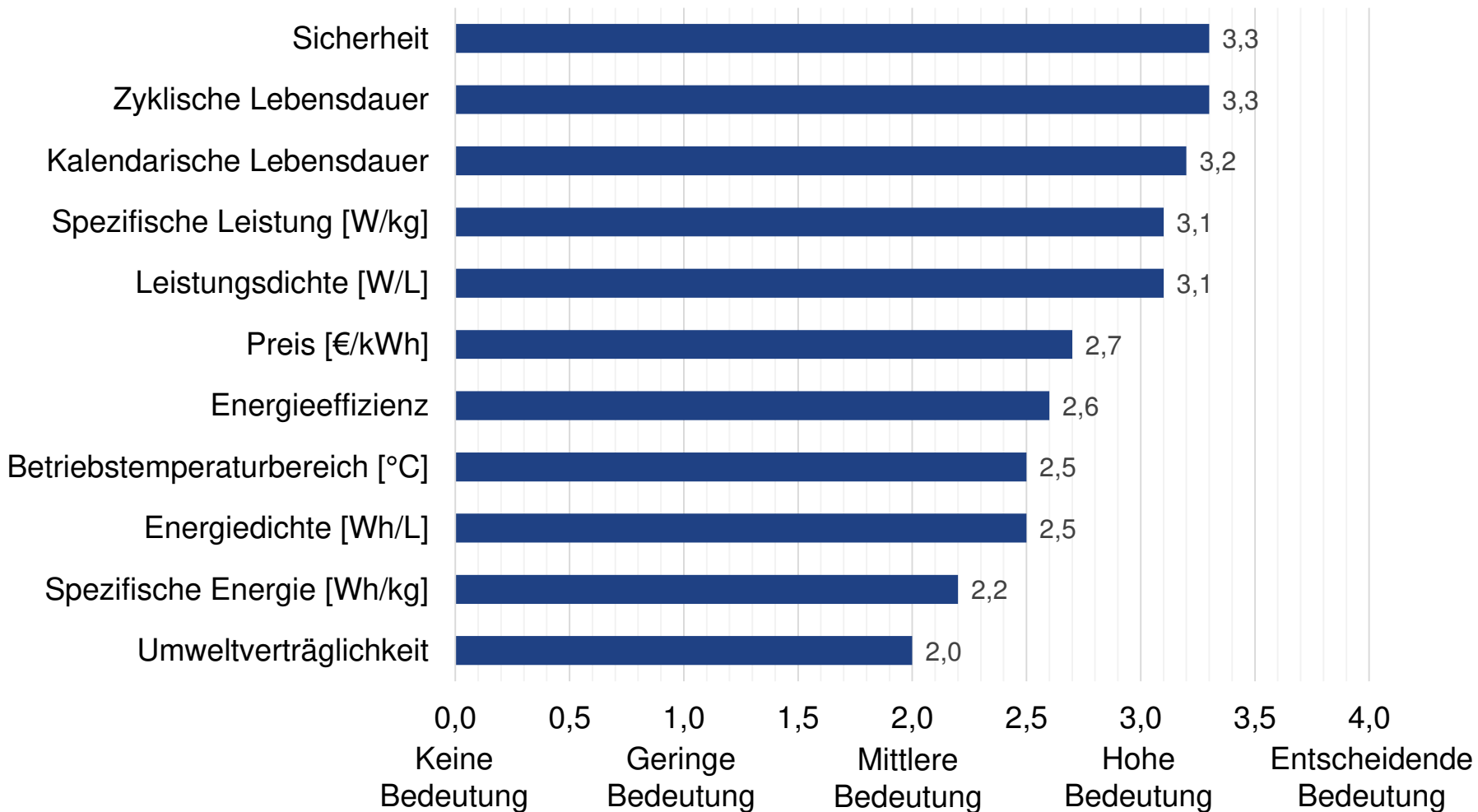
1. Bedeutung verschiedener Batterieparameter
2. Eignung aktueller Technologien für Hybridantriebe
3. Detailbewertung der Lithium-Ionen-Technologie
4. Eignung neuer Technologien für Hybridantriebe

Bedeutung verschiedener Speicherparameter für die Verwendung von Speichern in Hybridantrieben von Schienenfahrzeugen (Häufigkeit absolut):



= Keine Bedeutung [0]
 = Geringe Bedeutung [1]
 = Mittlere Bedeutung [2]
 = Hohe Bedeutung [3]
 = Entscheidende Bedeutung [4]

Bedeutung verschiedener Speicherparameter für die Verwendung von Speichern in Hybridantrieben von Schienenfahrzeugen (Durchschnittswerte, sortiert):



- Laut Ansicht der Experten sind die Parameter **Sicherheit**, **Lebensdauer** (zyklisch und kalendarisch) sowie die **leistungsbezogenen Parameter** (spezifische Leistung und Leistungsdichte) die für den Einsatz von elektrochemischen Speichern in Hybridantrieben von Schienenfahrzeugen wichtigsten Parameter.
- Die für Elektrofahrzeuge wichtigen Parameter **spezifische Energie** und **Energiedichte** sind für Hybridantriebe grundsätzlich nur von mittlerer Bedeutung. Im speziellen Fall von Hybridrangierlokomotiven ist der Energiegehalt jedoch nicht zu vernachlässigen, da die Betriebsstrategie auch einen beträchtlichen Teil rein elektrischer Arbeit vorsieht.¹ Die Energiedichte ist für Hybridrangierlokomotiven von höherer Bedeutung als die spezifische Energie. Ein hohes Gewicht der Speicher ist unter Umständen sogar von Vorteil, da so die Traktion zwischen Rad und Schiene erhöht wird.
- Der Parameter **Umweltverträglichkeit** ist nach Ansicht der Experten der Parameter mit der geringsten Bedeutung. Er erhält lediglich eine Durchschnittsbewertung von 2,0, was einer mittleren Bedeutung entspricht. Bei diesem Parameter tritt eine erhöhte Streuung der Bewertungen auf, was auf abweichende Meinungen bezüglich der Bedeutung des Parameters hindeutet.
- Im Fall des Parameters **Preis** tritt eine Abweichung zwischen den Bewertungen von Experten aus der Wissenschaft und denen von Experten aus der Wirtschaft auf. Experten aus der Industrie schätzen die Bedeutung des Parameters als deutlich geringer ein, als Experten aus der Wissenschaft (Industrie: Ø 2,25; Wissenschaft: Ø 3,36).
Bei Experten aus der Industrie kann tendenziell von einer besseren Kenntnis der Marktsituation ausgegangen werden. Die unterschiedliche Bewertung deutet daher auf eine Überschätzung des Faktors Preis pro Kilowattstunde Speicherkapazität in der Forschung hin.

¹ Vgl. Soeda (2012), S. 3

In der Fachliteratur wurden die folgenden fünf Speichertechnologien als derzeit relevant für Hybridantriebe identifiziert:

- Blei-Säure-Technologie
- NiCd-/NiMH-Technologie
- Lithium-Ionen-Technologie
- Natrium-Nickelchlorid-Technologie (ZEBRA-Technologie)
- Superkondensator-Technologie

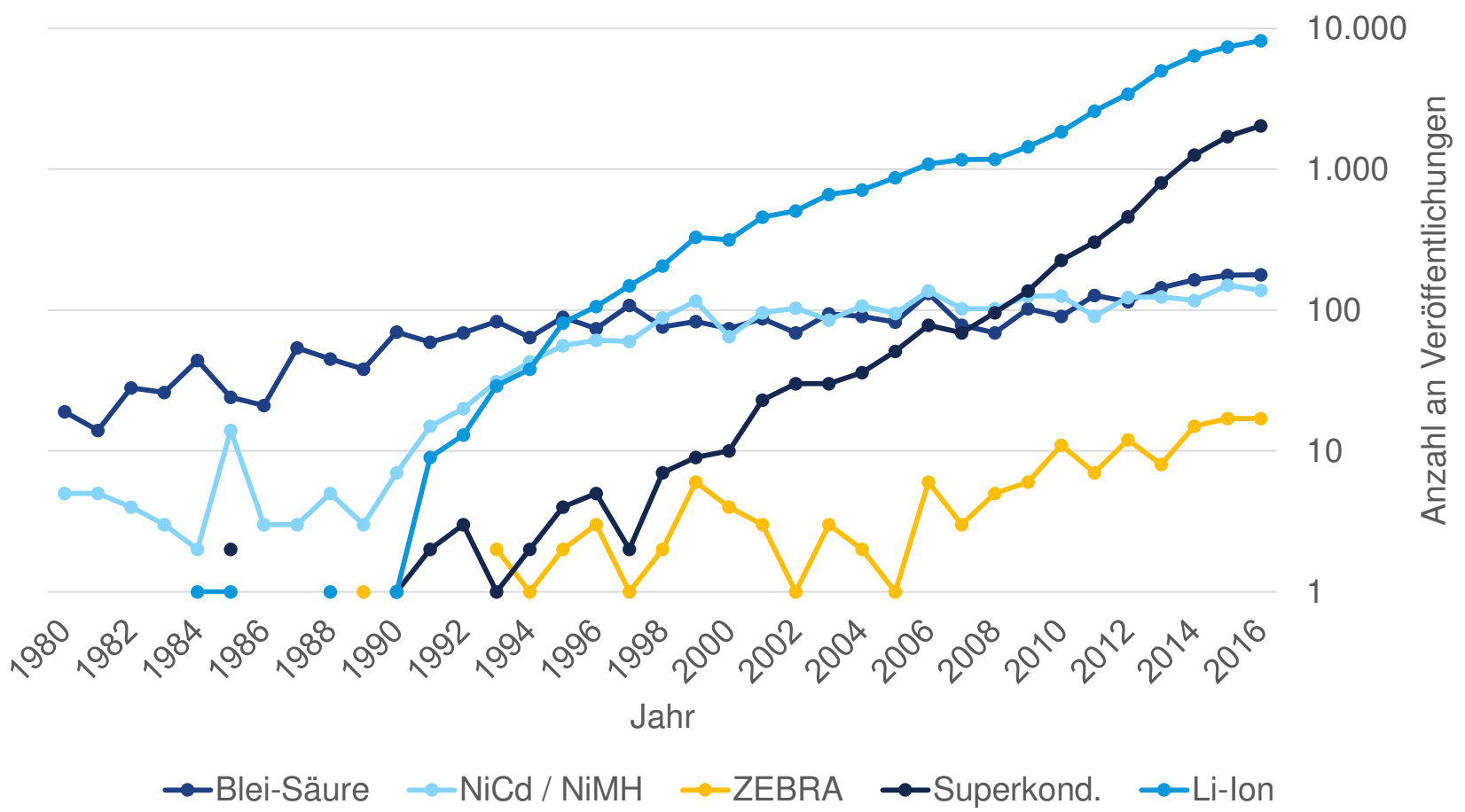
Die Befragung zu aktuellen Technologien fokussierte sich daher auf diese Technologien. Es bestand die Möglichkeit weitere Technologien zu ergänzen.

Die Anzahl an Veröffentlichungen zu den Technologien kann als Indikator für die Forschungsaktivität zu den Technologien dienen. Auf der nächsten Seite ist die Anzahl an Veröffentlichungen zu den Technologien bei *Web of Science* im Zeitverlauf von 1980 bis 2016 dargestellt.

Es wird deutlich, dass in den letzten Jahren insbesondere die Forschungsaktivität zur Lithium-Ionen-Technologie sowie zur Superkondensator-Technologie zugenommen hat. Die Anzahlen an Veröffentlichungen zur Blei-Säure- und zur NiCd-/NiMH-Technologie stagnieren. Die ZEBRA-Technologie spielt keine bedeutende Rolle.¹

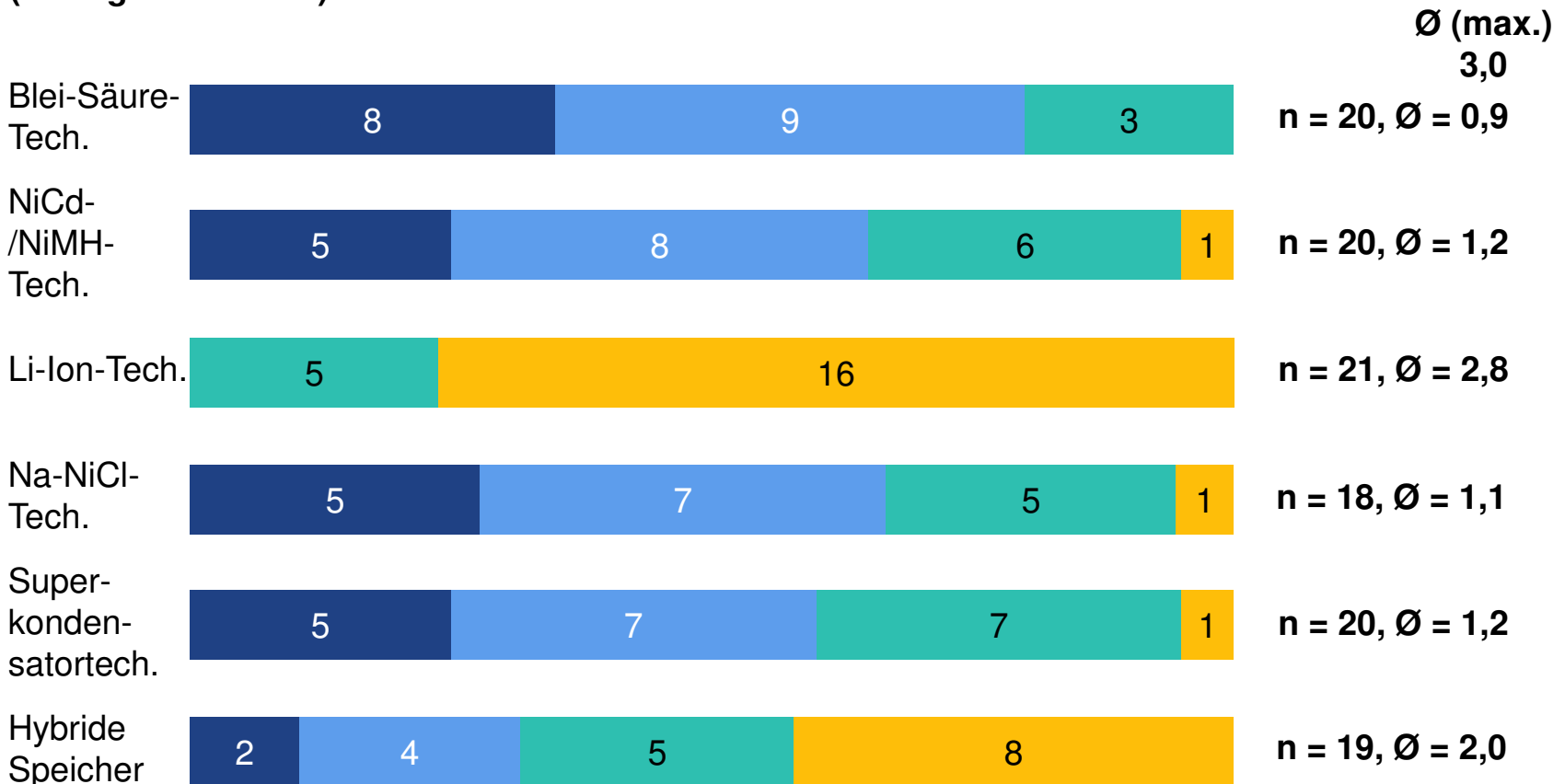
¹ Vgl. Anhang zu den genauen Zahlenwerten.

Veröffentlichungen zu aktuellen Technologien¹



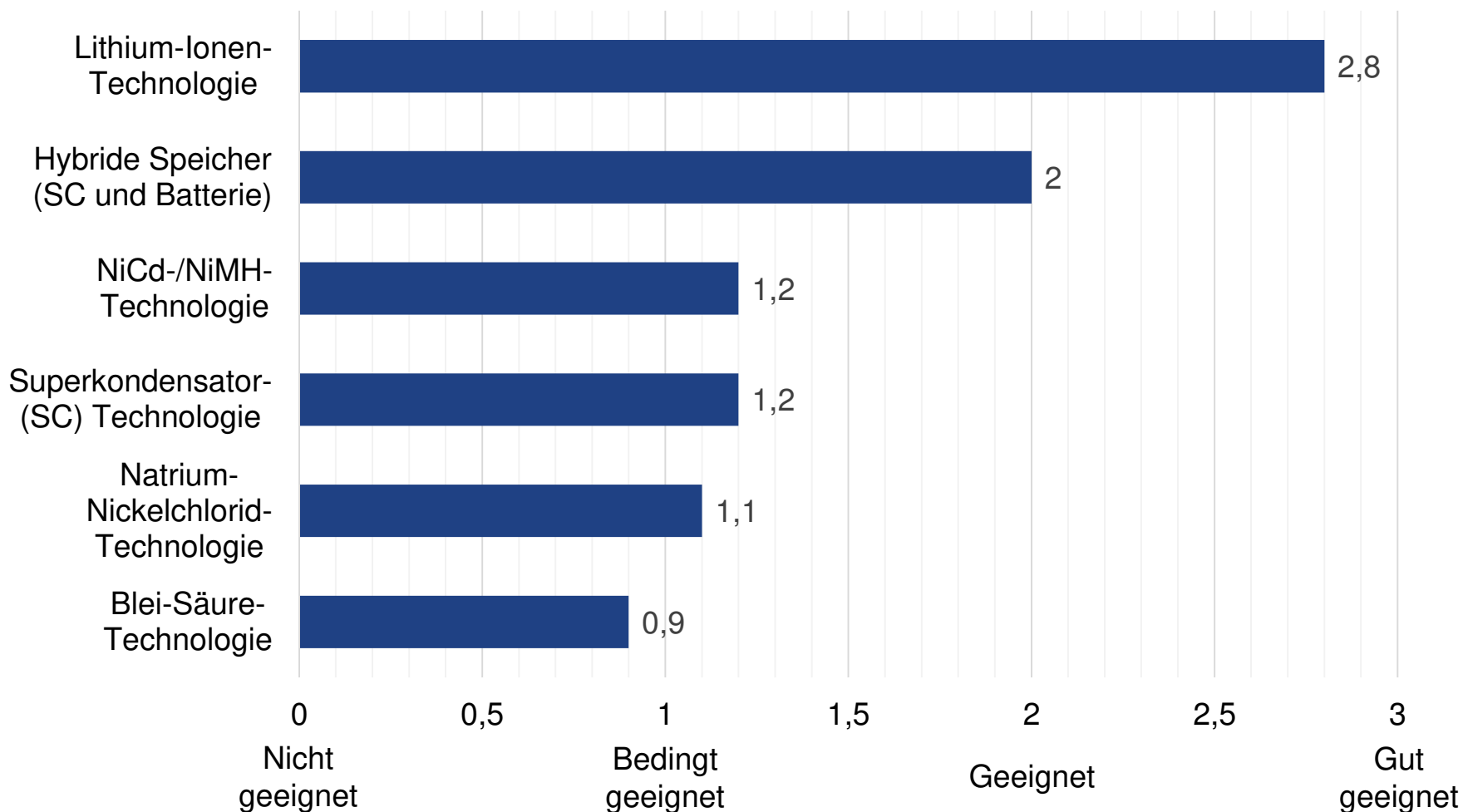
¹ Quelle: Verfasser, zu den zugrunde liegenden Daten vgl. Anhang

**Bewertung der Eignung aktueller Speichertechnologien zur Verwendung in Hybridantrieben
(Häufigkeit absolut):**



■ = Nicht geeignet [0]
 ■ = Geeignet [2]
 ■ = Bedingt geeignet [1]
 ■ = Gut geeignet [3]

**Bewertung der Eignung aktueller Speichertechnologien zur Verwendung in Hybridantrieben
(Durchschnittswerte, sortiert):**



Entwicklung der Bedeutung der Speichertechnologien als Speicher für hybride Abtriebe (absolute Häufigkeiten):

Blei-Säure-Technologie (n = 21)					
Zeit-horizont / Bedeutung	< 5 Jahre	5 - 10 Jahre	> 10 Jahre	Keine Zeit-angabe	Zeilen-summe
Stark steigend [2]	0	0	0	0	0
Steigend [1]	0	0	0	0	0
Gleichbleibend [0]	2	2	0	0	4
Sinkend [-1]	1	6	0	2	9
Stark sinkend [-2]	7	0	0	1	8

NiCd-/NiMH-Technologie (n = 19)					
Zeit-horizont / Bedeutung	< 5 Jahre	5 - 10 Jahre	> 10 Jahre	Keine Zeit-angabe	Zeilen-summe
Stark steigend [2]	0	0	0	0	0
Steigend [1]	0	0	0	0	0
Gleichbleibend [0]	1	3	0	0	4
Sinkend [-1]	5	2	1	0	8
Stark sinkend [-2]	3	2	0	2	7

Lithium-Ionen-Technologie (n = 20)					
Zeit-horizont / Bedeutung	< 5 Jahre	5 - 10 Jahre	> 10 Jahre	Keine Zeit-angabe	Zeilen-summe
Stark steigend [2]	7	3	1	1	12
Steigend [1]	3	1	0	1	5
Gleichbleibend [0]	2	0	1	0	3
Sinkend [-1]	0	0	0	0	0
Stark sinkend [-2]	0	0	0	0	0

Natrium-Nickelchlorid-Technologie (n = 17)					
Zeit-horizont / Bedeutung	< 5 Jahre	5 - 10 Jahre	> 10 Jahre	Keine Zeit-angabe	Zeilen-summe
Stark steigend [2]	0	0	0	0	0
Steigend [1]	1	3	0	1	5
Gleichbleibend [0]	2	1	1	2	6
Sinkend [-1]	4	1	0	0	5
Stark sinkend [-2]	1	0	0	0	1

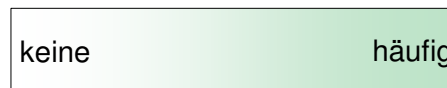
Legende auf Folie 30

Entwicklung der Bedeutung der Speichertechnologien als Speicher für hybride Abtriebe (absolute Häufigkeiten):

Superkondensator-Technologie (SC) (n = 18)					
Zeit-horizont / Bedeutung	< 5 Jahre	5 - 10 Jahre	> 10 Jahre	Keine Zeit-angabe	Zeilen-summe
Stark steigend [2]	0	2	0	0	2
Steigend [1]	3	3	0	2	8
Gleichbleibend [0]	2	2	0	1	5
Sinkend [-1]	1	1	0	0	2
Stark sinkend [-2]	0	1	0	0	1

Hybride Speicher (SC + Batterie) (n = 19)					
Zeit-horizont / Bedeutung	< 5 Jahre	5 - 10 Jahre	> 10 Jahre	Keine Zeit-angabe	Zeilen-summe
Stark steigend [2]	0	2	1	0	3
Steigend [1]	4	5	2	1	12
Gleichbleibend [0]	1	1	0	0	2
Sinkend [-1]	0	0	0	0	0
Stark sinkend [-2]	0	2	0	0	2

Häufigkeit der Nennung



Häufigkeit der Nennung (Zeilensumme)



- Die Eignung der **Lithium-Ionen-Technologie** als Speichertechnologie für Hybridantriebe wird mit Abstand am besten bewertet (\bar{x} 2,8/3). Neben der Lithium-Ionen-Technologie wurden auch **hybride Speicher** aus Superkondensatoren und reinen elektrochemischen Speichern als geeignet bewertet (2,0).
- Auffällig ist die vergleichsweise schlechte Bewertung der Eignung der **NiCd- bzw. NiMH-Technologie**. NiMH-Speicher sind in im Hybridanwendungen im Automobilbereich verbreitet im Einsatz.¹ NiCd-Speicher kommen in Hybridrangierlokomotiven zum Einsatz.² Die Technologien haben somit ihre Eignung bereits unter Beweis gestellt. Hintergrund der Bewertung könnte sein, dass die Teilnehmer die NiCd-/NiMH-Technologie im Vergleich zur besser geeigneten Lithium-Ionen-Technologie bewertet haben.
- In Zukunft erwarten die Experten eine starke Zunahme der Bedeutung der Lithium-Ionen-Technologie als Speichertechnologie für hybride Antriebe. Für die heute verbreitete NiCd-/NiMH-Technologie wird mit einer Abnahme der Bedeutung gerechnet. Es ist somit zu erwarten, dass die Lithium-Ionen-Technologie die NiCd-/NiMH-Technologie in den nächsten Jahren im Bereich der hybriden Antriebe verstärkt verdrängen wird. Dieser Trend deutet sich auch in so fern an, dass derzeit deutlich intensiver an der Lithium-Ionen-Technologie geforscht wird, als an anderen Technologien.³

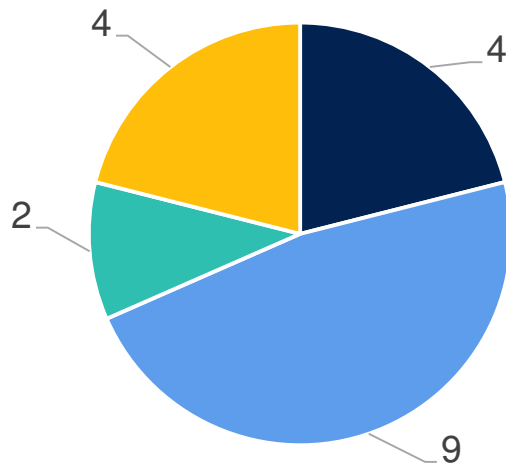
¹ Vgl. Budde-Meiwes et al. (2013), S. 767

² Vgl. z.B. Girard et al. (2008), S. 4 f.

³ Vgl. Anhang

Ergebnis

Bewertung von Superkondensatoren im Vergleich zu rein elektrochemischen Speichern (Häufigkeit absolut):



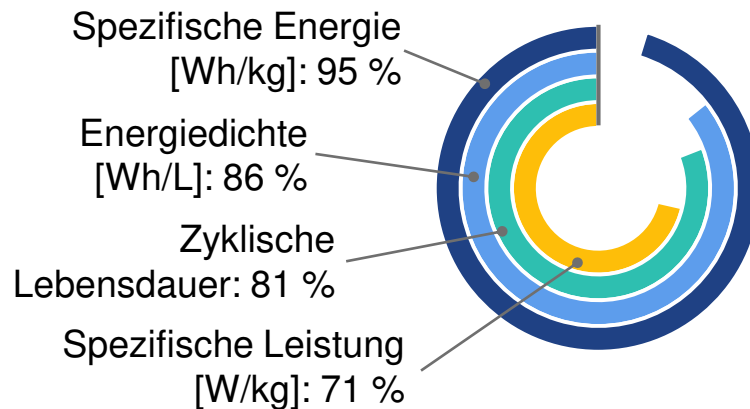
Legende:

- | | |
|---|---|
| ■ Konkurrenz-technologie | ■ Komplementär-technologie |
| ■ Sowohl als auch | ■ Weder noch |

Aussagen

- Die Mehrzahl der befragten Experten sieht Superkondensatoren als Ergänzung zu rein elektrochemischen Speichern.
- Superkondensatoren können insbesondere dazu dienen Leistungsspitzen abzufangen
- Es wurde auch angemerkt, dass die Kombination verschiedener Speicher mit einem erhöhten Integrationsaufwand verbunden ist. Es kann daher wirtschaftlicher sein, einen Speicher einer Technologie so groß zu dimensionieren, dass er energie- und leistungsbezogene Anforderungen erfüllt.

Ergebnis

**Stärken der Lithium-Ionen-Technologie (Angabe
anteilig an der Gesamtzahl):****Herausforderungen der Technologie:**

- Preis
- Sicherheit
- Lebensdauer

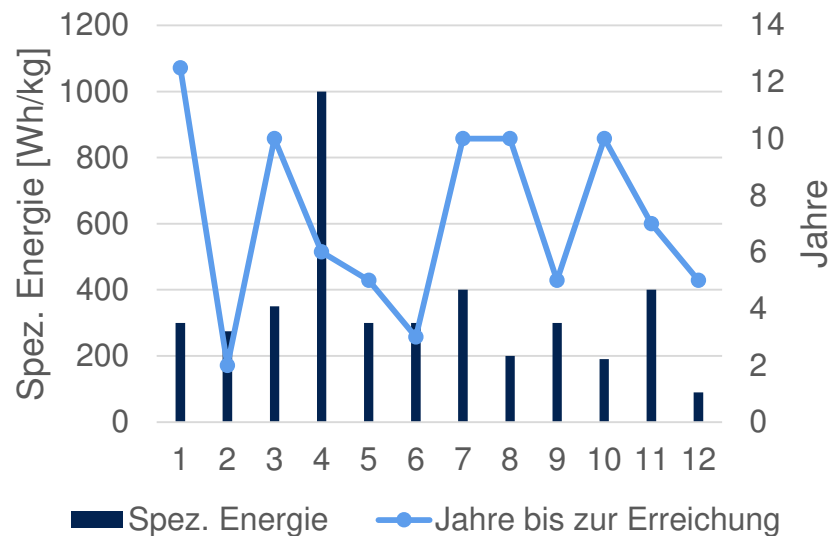
Aussagen

- Als Stärke der Technologie sehen die Experten insbesondere die hohe spezifische Energie.
- Weitere Stärken sind die Energiedichte, die zyklische Lebensdauer sowie die spezifische Leistung.
- Als Herausforderungen sehen die Befragten den bislang noch hohen Preis, Sicherheitsprobleme bei einigen Materialkombinationen sowie die teilweise noch zu geringe Lebensdauer.

¹ Aufgrund des hohen Entwicklungspotentials und des Forschungsaufwandes wurde die Lithium-Ionen-Technologie detailliert betrachtet. Zu beachten ist bei den Aussagen, dass unter dem Begriff Lithium-Ionen-Technologie eine Vielzahl unterschiedlicher Materialkombinationen mit zum Teil sehr unterschiedlichen Eigenschaften zusammengefasst sind. Bei den Aussagen handelt es sich somit um Tendenzen, die nicht für jede Materialkombination zutreffen.

Ergebnis

Welche spez. Energie halten Sie mit der Lithium-Ionen-Technologie zukünftig für erreichbar?



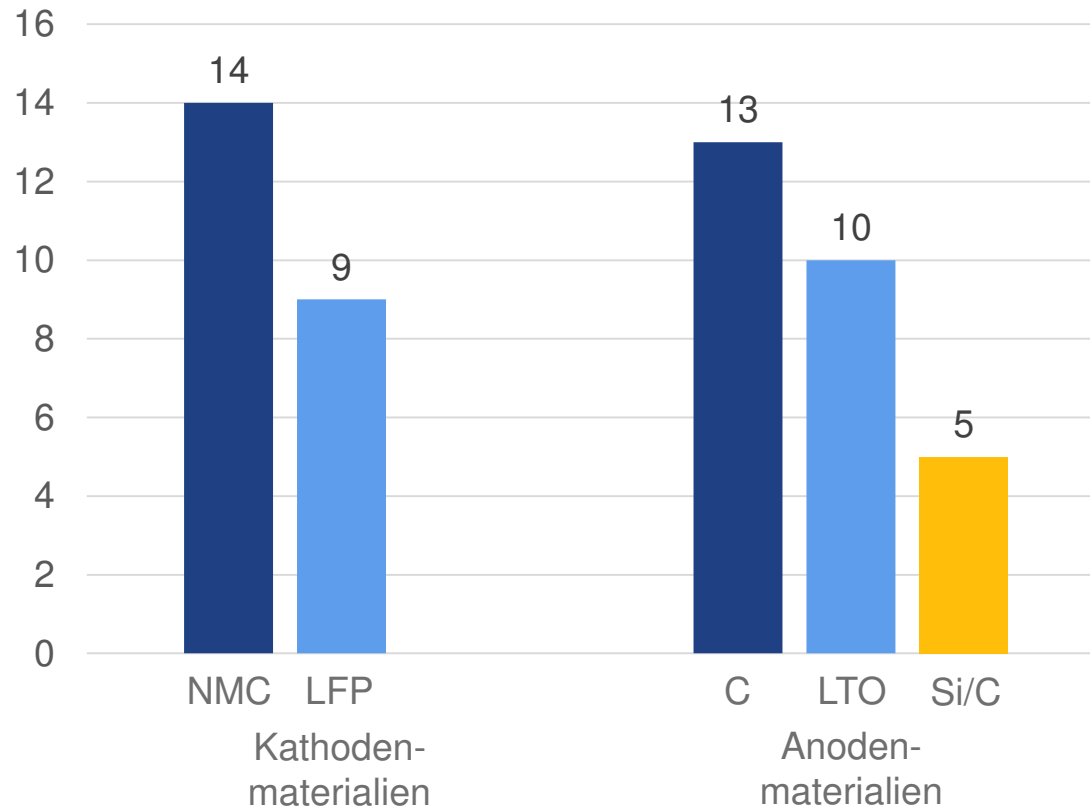
Erwartete Weiterentwicklungen der Lithium-Ionen-Technologie:

- Feststoffelektrolyte
- 5V Materialien
- Li-Metall Anoden

Aussagen

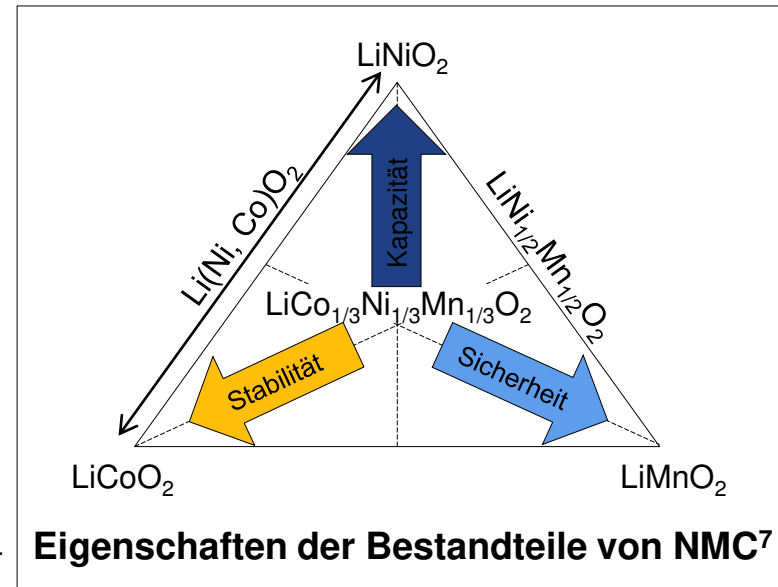
- Es wird eine Steigerung der spezifischen Energie von Lithium-Ionen-Batterien auf ca. 300 Wh/kg erwartet.
- Die Einschätzung zum Zeitraum bis zur Erreichung der spezifischen Energie liegt im Mittel bei etwa 7 Jahren.
- Als bedeutende zukünftige Entwicklungen wurden Feststoffelektrolyte, 5V-Materialien und Li-Metall Anoden genannt.

Welche Kathoden-/Anodenmaterialien halten Sie für besonders gut geeignet, um die Anforderungen von Hybridantrieben zu erfüllen (jeweils bis zu 3 Anoden- und Kathodenmaterialien, Häufigkeit absolut)?¹



¹ Zu beachten ist, dass die Elektrodenmaterialien nicht beliebig kombinierbar sind, da unerwünschte Wechselwirkungen auftreten können (vgl. Ketterer et al. (2009), S. 13).

- Als **Kathodenmaterial** wurde **NMC** am häufigsten genannt. Ziel der Verwendung von $\text{Li}(\text{Ni}, \text{Co}, \text{Mn})\text{O}_2$ -Mischkristallen ist es, die Vorteile der Legierungsmetalle zu vereinigen.¹ Zum Teil wurden konkrete Zusammensetzungen angegeben. Insbesondere NMC 622 wurde mehrfach genannt. Neben NMC wurde auch **LFP** häufig genannt. Das Material verfügt über eine etwas geringere Kapazität und Zellspannung als NMC.² Vorteile sind eine hohe chemische und thermische Beständigkeit sowie eine hohe Zyklenfestigkeit und Sicherheit.



- Als **Anodenmaterialien** wurden Graphit, LTO und siliziumhaltige Materialien genannt. Heute ist besonders **Graphit** als Anodenmaterial verbreitet.³ Neben Graphit wurde häufig **LTO** vorgeschlagen. Das Material verfügt über eine geringe Kapazität und ein hohes Potential gegenüber Li/Li^+ . Es ist jedoch thermisch und zyklisch sehr stabil und ermöglicht eine hohe spezifische Leistung.⁴ Darüber hinaus ist es zur Verwendung bei niedrigen Temperaturen geeignet und verfügt über eine hohe intrinsische Sicherheit. Gegenstand der Forschung sind derzeit Anoden aus **Si/C-Kompositen**. Eine Legierung von Lithium und Silizium verfügt über eine sehr hohe theoretische Kapazität, weist jedoch nur eine geringe Lebensdauer auf.⁵ Durch die Verwendung von Kompositen wird versucht, die hohe Kapazität von Silizium mit der hohen Stabilität von Graphit zu vereinigen.⁶

¹ Vgl. Ketterer et al. (2009), S. 10

³ Vgl. Ketterer et al. (2009), S. 7

⁵ Vgl. Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 177

⁷ Quelle: Ketterer et al. (2009), S. 10

² Vgl. Nitta et al. (2015), S. 254

⁴ Vgl. Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 175 f.

⁶ Vgl. Terranova et al. (2014), S. 176

Eigenschaften verschiedener Anoden und Kathodenmaterialien:

Material	Kathode /Anode	Spez. Kapazität	Spez. Energie	Spez. Leistung	Zykl. Lebensdauer	Sicherheit	Preis	Entwicklungsstand
NMC	K	+	++	o	-	o	-	Produkt
LFP	K	o	-	o	++	++	o	Produkt
Graphit	A	+	/	o	+	++	+	Produkt
LTO	A	-	/	++	++	++	o	Produkt
Si/C	A	++	/	+	-	-	++	For- schung

Legende:

A = Anode

K = Kathode

++ = Sehr gut

+ = Gut

o = Neutral

- = Schlecht

-- = Sehr schlecht

/ = Keine Bewertung

Quelle: Verfasser in Anlehnung an Blomgren (2017), S. A5021; Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 169, 183

- Für die Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien werden verschiedene seltene Metalle benötigt. In den Medien wird derzeit häufig die mögliche Knappheit dieser Bestandteile von Lithium-Ionen-Batterien thematisiert. Dabei ist zunächst Grundsätzlich die Unterscheidung zwischen Reserven und Ressourcen zu beachten:
 - Reserven sind derzeit wirtschaftlich förderbar
 - Ressourcen bekannt, aber derzeit nicht wirtschaftlich förderbar
- Von Bedeutung ist im Wesentlichen die Verfügbarkeit der Elemente **Mangan, Kobalt, Nickel und Lithium**:
 - Mangan, Kobalt und Nickel sind in häufig verwendeten Kathodenmaterialien enthalten.¹ In einigen Anwendungsfällen ist eine Substitution durch andere Kathodenmaterialien möglich. Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften der Materialien² muss jedoch je nach Anwendungsfall eine Prüfung erfolgen. Die Verfügbarkeit von Mangan und Nickel ist als unproblematisch anzusehen.³
 - Lithium wird für alle Lithium-Ionen-Batterien sowie für Zukunftstechnologien wie die Lithium-Schwefel-Technologie und Hybridkondensatoren auf Lithium-Basis benötigt. Eine Substitution durch andere Materialien ist derzeit nicht möglich.
- Der Rohstoffbedarf wird wesentlich durch den Verbreitungsgrad von Elektrofahrzeugen bestimmt. Prognosen sind somit mit einer hohen Unsicherheit behaftet.⁴

¹ Vgl. Ketterer et al. (2009), S. 8 ff.

² Vgl. Blomgren (2017), S. A5021; Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 183

³ Vgl. Gopalakrishnan et al. (2017), S. 17 f.

⁴ Vgl. Konietzko/Gernuks (2011), S. 28

- Im Fall von Lithium kommen verschiedene Autoren zu der Einschätzung, dass keine Erschöpfung der Lithiumressourcen zu befürchten ist. Dabei gehen Konietzko und Gernuks (2011) davon aus, dass die Lithium-Reserven in jedem Fall ausreichend sind. Thielmann et al. (2015) hingegen erwarten im Extremszenario, dass der Bedarf bis 2050 die Reserven übersteigen wird. Er wird jedoch deutlich unterhalb der Lithium-Ressourcen liegen.¹
- Im Fall von Kobalt besteht hingegen die Gefahr von Versorgungsengpässen² und es wird voraussichtlich zu einer Erschöpfung der derzeitigen Reserven kommen.³ Verschärft wird die Situation durch die geographische Verteilung der Reserven. Nahezu die Hälfte dieser befindet sich im Kongo⁴ und die politische Situation dort ist derzeit instabil.⁵ Die Ressourcen sind bei Einbeziehung des technischen Fortschritts in F&E, Produktion und Recycling hingegen voraussichtlich ausreichend.⁶ Die Erschließung dieser dürfte jedoch mit steigenden Kobaltpreisen einhergehen.

Aus der dargestellten Versorgungssituation wird deutlich, dass die Verbreitung von Lithium-Ionen-Batterien voraussichtlich nicht an einer Knappheit der benötigten Rohstoffe scheitern wird. Ein effektives Recycling von Lithium-Ionen-Batterien ist zur Sicherstellung einer nachhaltigen und wirtschaftlichen Versorgung mit Rohstoffen dennoch von großer Wichtigkeit.

¹ Vgl. Konietzko/Gernuks (2011), S. 28; Thielmann et al. (2015), S. 37 f.

³ Vgl. Konietzko/Gernuks (2011), S. 28; Thielmann et al. (2015), S. 38 f.

⁵ Stand 11.03.2018 besteht eine Teilreisewarnung des Auswärtigen Amtes für die Demokratische Republik Kongo sowie eine Reisewarnung für verschiedene Landesteile (vgl. Auswärtiges Amt (2018)).

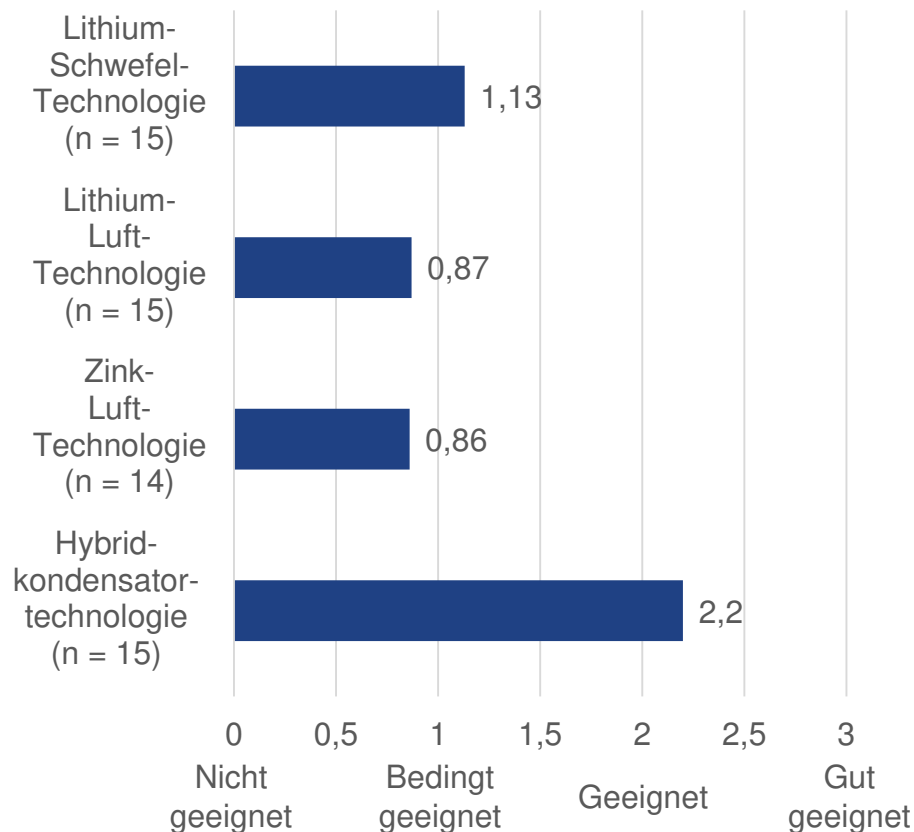
² Vgl. Olivetti et al. (2017), S. 238

⁴ Vgl. U.S. Department of the Interior (2018), S. 51

⁶ Vgl. Konietzko/Gernuks (2011), S. 28; Thielmann et al. (2015), S. 38 f.

Ergebnis

Wie beurteilen Sie die Technologien bezüglich Ihrer Eignung als Speichertechnologie für Hybridantriebe (Mittelwerte)?



Aussagen

- Den Befragungsteilnehmern wurden verschiedene neue Technologien zur Bewertung vorgegeben. Zudem bestand die Möglichkeit weitere Technologien zu ergänzen.
- Von den neuen Technologien wird speziell die Hybridkondensator-technologie als geeignet für den Einsatz in Hybridantrieben eingeschätzt.
- Die anderen Technologien werden lediglich als bedingt geeignet eingeschätzt. Die Lithium-Schwefel-Technologie schneidet dabei leicht besser ab als die Lithium-Luft- und die Zink-Luft-Technologie.

Ergebnis

Wann erwarten Sie die Verfügbarkeit der Technologien in Produkten (Häufigkeit absolut)?

	Lithium-Schwefel-Technologie	Lithium-Luft-Technologie	Zink-Luft-Technologie	Hybridkondensator-technologie
Aktuell bereits verfügbar	0	0	1	1
Kurzfristig (bis 2 Jahre)	1	0	1	4
Mittelfristig (2 bis 5 Jahre)	4	0	1	5
Langfristig (mehr als 5 Jahre)	9	7	6	2
Verfügbarkeit nicht absehbar	3	9	4	0

Häufigkeit der Nennung keine häufig

Aussagen

- Kurz- bis mittelfristig ist mit der Verfügbarkeit von Hybridkondensatoren zu rechnen. Bereits heute sind erste (kleinformatige) Speicher erhältlich.
- Mittel- bis langfristig ist mit Produkten auf Basis der Lithium-Schwefel-Technologie zu rechnen. Erste Unternehmen befassen sich mit der Kommerzialisierung.¹
- Mit (wiederaufladbaren) Lithium- oder Zink-Luft-Speichern ist erst langfristig bzw. in noch nicht absehbarer Zukunft zu rechnen.

¹ Vgl. z.B. <https://oxisenergy.com/> (zugegriffen 15.05.2018)

- Die **Hybridkondensator-Technologie** wird von den neuen Technologien als am geeignetsten für den Einsatz in Hybridantrieben eingeschätzt. Hybridkondensatoren stellen eine neue Technologie in der Klasse der Superkondensatoren dar.¹
- Hybridkondensatoren bestehen aus einer batterieartigen Elektrode und einer kondensatorartigen Elektrode. Die Speicherfähigkeit der batterieartigen Elektrode beruht auf Pseudokapazität oder auf einer Insertionsreaktion, wie sie in Lithium-Ionen-Elektroden auftritt. Die Speicherfähigkeit der kondensatorartigen Elektrode beruht auf der Doppelschichtkapazität, wie sie in Superkondensatoren auftritt. Die hohe Leistungsfähigkeit von Hybridkondensatoren beruht auf der kondensatorartigen Elektrode. Die batterieartige Elektrode ist für die im Vergleich zu herkömmlichen Superkondensatoren deutlich erhöhte spezifische Energie und Energiedichte verantwortlich.²
- Mit der Verfügbarkeit der Technologie in Produkten ist innerhalb der nächsten fünf Jahre zu rechnen. Erste (kleinformatige) Hybridkondensatoren sind bereits heute erhältlich.
- Stärken weist die Technologie insbesondere bei den für Hybridantriebe wichtigen Parametern
 - Spezifische Leistung und Leistungsdichte,
 - Zyklische und kalendarische Lebensdauer sowie
 - Sicherheit auf.³
- Aufgrund der Eigenschaften hat die Technologie grundsätzlich ein großes Potential zur Anwendung in Hybridantrieben. Für die Anwendung in Hybridrangierlokomotiven ist jedoch eine weitere Steigerung von spezifischer Energie und Energiedichte notwendig.

¹ Vgl. Fuchs et al. (2012), S. 26

² Vgl. Simon/Gogotsi (2008), S. 850 f.

³ Vgl. Jeevarajan/Martinez (2014), S. 3 f.

- Die **Lithium-Schwefel-Technologie** basiert auf der Materialkombination aus Lithium und Schwefel. Die Anode besteht aus metallischem Lithium und die Kathode aus einem porösen, elektrisch leitenden Wirtsmaterial. Das Wirtsmaterial wird benötigt, da es sich bei Schwefel um einen Isolator handelt. Es werden zwei Arten von Lithium-Schwefel-Zellen unterschieden. In einem Fall ist der Schwefel zum größten Teil in der Kathode enthalten („Contained Li-S“). Im anderen Fall ist er zum größten Teil in Form von Reaktionsprodukten im Elektrolyt gelöst („Catholyte Li-S“).¹
- Die Technologie befindet sich in einem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium. Erste Unternehmen arbeiten an der Kommerzialisierung der Technologie.² Die befragten Experten erwarten die Marktverfügbarkeit von Lithium-Schwefel-Batterien langfristig (> 5 Jahre). Für die großproduktionstechnische Umsetzung und die Integration in Anwendungen ist anschließend mit einer weiteren Verzögerung zu rechnen.³ Der Einsatz von Lithium-Schwefel-Batterien im Mobilitätsbereich ist daher erst nach dem Jahr 2030 zu erwarten.
- Die Technologie ist für den Einsatz in Hybridantrieben bedingt geeignet. Stärken der Technologie sind die hohe spezifische Energie und Energiedichte sowie der Preis.⁴ Problematisch ist die geringe zyklische Lebensdauer und die geringe spezifische Leistung und Leistungsdichte.⁵ Die geringe Leistung könnte durch die Nutzung als hybrider Speicher in Verbindung mit Superkondensatoren kompensiert werden. Eine Steigerung der Lebensdauer ist jedoch vor einem Einsatz in Hybridantrieben zwingend erforderlich.

¹ Vgl. Nazar et al. (2014), S. 437

³ Vgl. Thielmann et al. (2015), S.6

³ Vgl. Fotouhi et al. (2017), S. 9

² Vgl. <https://oxisenergy.com/> (zugegriffen: 06.05.2018)

⁴ Vgl. Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 308, Hagen et al. (2013), S. 268

- Die **Lithium-Luft-Technologie** hat das Potential, eine sehr hohe spezifische Energie sowie Energiedichte zu erreichen. Sie ist jedoch noch weit von einer kommerziellen Nutzung entfernt. Bislang wurde noch kein vollständiges Verständnis der Prozesse innerhalb der Zelle erlangt.¹ Zudem bestehen bezüglich der erreichbaren spezifischen Leistung und Leistungsdichte² sowie der Lebensdauer erhebliche Schwachpunkte.³
- Eine für Rangierlokomotiven vorteilhafte Eigenschaft der Technologie ist, dass nicht alle Batteriesystemkomponenten⁴ linear mit der Batteriegröße wachsen. Dies macht die Technologie für größere Fahrzeuge, wie Rangierlokomotiven, attraktiver als für kleine Fahrzeuge.⁵
- Mit einem Einsatz der Technologie in Hybridantrieben ist allenfalls langfristig zu rechnen. Wie bei der Lithium-Schwefel-Technologie könnten hybride Speicher genutzt werden um die geringe Leistung zu kompensieren.
- Die Eignung der **Zink-Luft-Technologie** wird ähnlich bewertet wie die der Lithium-Luft-Technologie. Die befragten Experten erwarten nicht, dass die Technologie in Zukunft für Hybridantriebe relevant wird.

¹ Vgl. Kraysberg/Ein-Eli (2011), S. 892

³ Vgl. Kurzweil/Dietlmeier (2015), S. 294

⁵ Vgl. Grande et al. (2015), S. 796

² Vgl. Kraysberg/Ein-Eli (2011), S. 892

⁴ Vgl. zu Komponenten von Lithium-Luft-Systemen Gallagher et al. (2014), S. 1557 f.

IV. Produkt- und Technologie-Roadmap

1. Erläuterungen zur Roadmap
2. Darstellung der Roadmap

V. Quellen

VI. Anhang

- Technologie-Roadmaps sind eine grafische Darstellung von Technologien sowie deren Verknüpfungen über die Zeit.¹ Zur Darstellung der Entwicklungen von Speichertechnologien für Hybridantriebe wurde eine **Produkt-Technologie-Roadmap** erstellt. Diese enthält neben der Technologie-Ebene auch eine Produkt-Ebene.
- Auf der Abszisse der Roadmap ist der Zeitverlauf dargestellt. Dieser ist gegliedert in:
 - Aktuell 2018
 - Kurzfristig bis 2020
 - Mittelfristig bis 2023
 - Langfristig ~2025+
 - Ferne Zukunft 2030
 - Ferne Zukunft 20??
- Auf der Ordinate der Roadmap sind die Technologien (Folie 1) sowie die Produkte auf Basis der Technologien (Folie 2) aufgetragen. Verknüpfungen zwischen den Objekten zeigen die Zusammenhänge zwischen den Produkten und Technologien auf.
- Die in der Technologie-Ebene dargestellten Entwicklungen sind allgemeiner Natur. Auf der Produktebene sind die dargestellten Entwicklungen zum Teil konkret auf die Anwendung in Hybridrangierlokomotiven bezogen.

¹ Vgl. Möhrle/Isenmann (2017), S. 3 f.

- Die bedeutendsten Weiterentwicklungen wird es in den nächsten Jahren im Bereich der Lithium-Ionen-Technologie geben. Dabei wird es einerseits zu vielen inkrementellen Verbesserungen kommen. Andererseits sind auch bedeutendere Weiterentwicklungen in Form von Si/C-Anoden, Festkörperelektrolyten sowie langfristig 5V-Zellen zu erwarten. Feststoffelektrolyte könnten zukünftig nicht nur in Lithium-Ionen-Zellen zum Einsatz kommen, sondern auch in Lithium-Schwefel und Lithium-Luft-Zellen genutzt werden.
Begleitet werden diese Weiterentwicklungen von stetig sinkenden Preisen für Lithium-Ionen-Zellen. Bis 2030 werden Preise im Bereich von etwa 100 €/kWh erwartet. Durch die sinkenden Preise wird die Verbreitung der Lithium-Ionen-Technologie weiter gefördert.
- Die Forschungsaktivitäten zur NiCd-/NiMH-Technologie werden in Zukunft abnehmen. Es ist eine zunehmende Verdrängung von NiCd- und NiMH-Speichern durch Lithium-Ionen-Speicher zu erwarten.
Da aktuelle Hybridrangierlokomotiven zum Teil noch mit NiCd-Speichern ausgestattet werden,¹ wird die Technologie jedoch für die Instandhaltung noch mehrere Jahrzehnte relevant sein.
- Heute sind bereits erste Produkte auf Basis der Hybridkondensator-Technologie am Markt erhältlich. Vor einem Einsatz in Hybridrangierlokomotiven (und allgemein im Bereich Mobilität) sind jedoch noch Weiterentwicklungen notwendig. Themen sind beispielsweise die Steigerung der spezifischen Energie und die Entwicklung großformatiger Zellen. Langfristig ist ein Einsatz in Hybridrangierlokomotiven möglich. Denkbar ist eine Entwicklung vom Einsatz in Power Tools über die Nutzung in Fahrzeugen mit geringen Anforderungen an den Energiegehalt, wie zum Beispiel Straßenbahnen, hin zu einer Verwendung in Hybridrangierlokomotiven.

¹ Vgl. Alstom SA (2016)

- Die Entwicklung zur Lithium-Schwefel-Technologie befindet sich im Bereich der anwendungsorientierten Forschung und Entwicklung mit ersten Unternehmen, die an einer Kommerziellen Nutzung arbeiten. Produktionsreife Produkte sind ab dem Jahr 2030 zu erwarten. Aufgrund der derzeit geringen spez. Leistung bzw. Leistungsdichte sind zwei Entwicklungspfade denkbar:
 - Wenn eine ausreichende Steigerung der Leistung gelingt können Lithium-Schwefel-Speicher zukünftig als alleiniger Speicher für Hybridfahrzeuge dienen.
 - Sollte dies nicht gelingen ist eine gemeinsame Verwendung mit Superkondensatoren in hybriden Speichern denkbar. Dabei muss sich zeigen, ob so Vorteile erzielt werden können, die den erhöhten Integrationsaufwand von zwei Speichern aufwiegen.
- Mit der Verfügbarkeit von Produkten auf Basis der Lithium-Luft-Technologie ist allenfalls in ferner Zukunft (2040-50) zu rechnen. Derzeit findet zur Technologie Grundlagenforschung statt und es wurde noch kein vollständiges Verständnis der Prozesse innerhalb der Zellen erlangt.

¹ Vgl. Alstom SA (2016)

IV. Produkt- und Technologie-Roadmap

Darstellung der Roadmap: Technologien

Technologien	Aktuell 2018	Kurzfristig bis 2020	Mittelfristig bis 2023	Langfristig ~2025+	Ferne Zukunft	
					2030	20??
Li-Luft	Grundlagen F&E	Grundlagen F&E, Anwendungsreife mglw. ab 2040-50				
Li-Schwefel	Beginn anwendungsorientierter F&E	Entwicklung zur Anwendungsreife			Weitere Verbesserung	
Hybridkondensatoren	F&E → Produkt	Steigerung der spez. Energie, Entwicklung großformatiger Zellen, ...				
Superkondensatoren	Seit 90er Jahren viel F&E					
Li-Ionen	Schwerpunkt Batterie-F&E	Bessere Materialien; Si/C; ~270 Wh/kg	F&E	5 V LIB		
		Entwicklung von Festkörperelektrolyten				
NiCd/NiMH	Wenig F&E	Abnahme der F&E Aktivitäten			(*)	

IV. Produkt- und Technologie-Roadmap

Darstellung der Roadmap: Produkte

Produkte	Aktuell 2018	Kurzfristig bis 2020	Mittelfristig bis 2023	Langfristig ~2025+	Ferne Zukunft	
					2030	20??
Li-Luft	Grundlagen F&E					Mglw. Einsatz ab 2040-50
Li-Schwefel	Anwendungsorientierte F&E				Produktionsreife, ggf. geeignet	Pfad A: Verwendung als Speicher
Hybridkondensatoren	Beginn der Produkteinführung	Kleinformatige Zellen z.B. in Werkzeugen		Einsatz in Fahrzeugen, z.B. Trams	Eingier-Preis?	Einsatz in Ranglokomotiven, Energie?
Superkond.	Produkt					
Hybride Speicher	Derzeit nicht relevant					Pfad B: Hyb. Speicher
Li-Ionen	Produkt, im Mobilitätsbereich bewährt	Kontinuierliche inkrementelle Verbesserungen		Produktion Si/C + Kath. ~270 Wh/kg	Li-Feststoff 2025-30	Einsatz 2030+ (*) 5V 2030+
NiCd/NiMH	Produkt, bewährt	Bedeutungsabnahme				

IV. Produkt- und Technologie-Roadmap

1. Erläuterungen zur Roadmap
2. Darstellung der Roadmap

V. Quellen

VI. Anhang

- Alstom SA (2016a): Prima H3 Shunting Locomotives, URL: <http://www.alstom.com/Global/Transport/Resources/Documents/brochure2014/Prima%20H3%20-%20Product%20sheet%20-%20English.pdf?epslanguage=en-GB> (zugegriffen: 16.02.2018).
- Auswärtiges Amt (2018): Auswärtiges Amt - Demokratische Republik Kongo: Reise- und Sicherheitshinweise, Auswärtiges Amt DE, URL: <https://www.auswaertiges-amt.de/de/aussenpolitik/laender/kongodemokratischerepublik-node/kongodemokratischerepubliksicherheit/203202> (zugegriffen: 11.03.2018).
- Blomgren, G. E. (2017): The Development and Future of Lithium Ion Batteries, in: Journal of The Electrochemical Society, 164 (1), S. A5019–A5025.
- Budde-Meiwes, H./Drillkens, J./Lunz, B./Muennix, J./Rothgang, S./Kowal, J./Sauer, D. U. (2013): A Review of Current Automotive Battery Technology and Future Prospects, in: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 227 (5), S. 761–776.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (1985): Akkumulatoren; Galvanische Sekundärelemente; Grundbegriffe, Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Fotouhi, A./Auger, D./O'Neill, L./Cleaver, T./Walus, S. (2017): Lithium-Sulfur Battery Technology Readiness and Applications—A Review, in: Energies, 10 (12), S. 1937.
- Fuchs, G./Lunz, B./Leuthold, M./Sauer, D. U. (2012): Technology Overview on Electricity Storage, URL: http://www.sefep.eu/activities/projects-studies/120628_Technology_Overview_Electricity_Storage_SEFEP_ISEA.pdf (zugegriffen: 09.02.2018).
- Gallagher, K. G./Goebel, S./Greszler, T./Mathias, M./Oelerich, W./Eroglu, D./Srinivasan, V. (2014): Quantifying the Promise of Lithium–air Batteries for Electric Vehicles, in: Energy & Environmental Science, 7 (5), S. 1555.
- Geschka, H. (1995): Methoden der Technologiefrühaufklärung und der Technologievorhersage, in: Zahn, E. (Hrsg.): Handbuch Technologiemanagement, Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag, S. 623–644.
- Girard, H./Oostra, J./Neubauer, J. (2008): Hybrid Shunter Locomotive, URL: <http://www.railway-research.org/IMG/pdf/r.2.2.3.1.pdf> (zugegriffen: 07.01.2018).

Gopalakrishnan, R./Goutam, S./Miguel Oliveira, L./Timmermans, J.-M./Omar, N./Messagie, M./Van den Bossche, P./van Mierlo, J. (2017): A Comprehensive Study on Re-chargeable Energy Storage Technologies, in: Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage, 13 (4), S. 040801.

Grande, L./Paillard, E./Hassoun, J./Park, J.-B./Lee, Y.-J./Sun, Y.-K./Passerini, S./Scrosati, B. (2015): The Lithium/Air Battery: Still an Emerging System or a Practical Reality?, in: Advanced Materials, 27 (5), S. 784–800.

Hagen, M./Dörfler, S./Fanz, P./Berger, T./Speck, R./Tübke, J./Althues, H./Hoffmann, M. J./Scherr, C./Kaskel, S. (2013): Development and Costs Calculation of Lithium–sulfur Cells with High Sulfur Load and Binder Free Electrodes, in: Journal of Power Sources, 224 , S. 260–268.

Hofmann, P. (2014): Hybridfahrzeuge, Vienna: Springer Vienna.

Huggins, R. A. (2016): Energy Storage - Fundamentals, Materials and Applications, Cham: Springer International Publishing.

Jeevarajan, J. A./Martinez, M. D. (2014): Performance and Safety of Lithium-ion Capacitors, Präsentiert auf: 46th Power Sources Conference, 9. Juni 2014, Orlando, Florida.

Kache, M. (2014): Hybridlokomotive – Ein globaler Überblick, in: Eisenbahntechnische Rundschau, (10), S. 32–36.

Ketterer, B./Karl, U./Möst, D./Ulrich, S. (2009): Lithium-Ionen Batterien: Stand der Technik und Anwendungspotential in Hybrid-, Plug-In Hybrid- und Elektrofahrzeugen, FZKA-7503, Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH.

Konietzko, S./Gernuks, M. (2011): Ressourcenverfügbarkeit von sekundären Rohstoffen - Potenzialanalyse für Lithium und Kobalt, URL: https://www.erneuerbar-mo-bil.de/sites/default/files/2016-09/2011_Endbericht_Umbrella_final.pdf (zugegriffen: 10.03.2018).

Kraytsberg, A./Ein-Eli, Y. (2011): Review on Li–air Batteries—Opportunities, Limitations and Perspective, in: Journal of Power Sources, 196 (3), S. 886–893.

Kurzweil, P. (2015): Chemie, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Kurzweil, P./Dietlmeier, O. (2015): Elektrochemische Speicher: Superkondensatoren, Batterien, Elektrolyse-Wasserstoff, rechtliche Grundlagen, Wiesbaden: Springer Vieweg.

Lu, S./Meegahawatte, D. H./Guo, S./Hillmansen, S./Roberts, C./Goodman, C. J. (2008): Analysis of Energy Storage Devices in Hybrid Railway Vehicles, Präsentiert auf: International Conference on Railway Engineering, 2008, 2008 International Conference on Railway Engineering - Challenges for Railway Transportation in Information Age, Hong Kong: IET, S. 1–6.

Möhrle, M. G./Isenmann, R. (2017): Grundlagen des Technologie-Roadmapping, in: Möhrle, M. G./Isenmann, R. (Hrsg.): Technologie-Roadmapping, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 1–16.

Nazar, L. F./Cuisinier, M./Pang, Q. (2014): Lithium-Sulfur Batteries, in: MRS Bulletin, 39 (05), S. 436–442.

Nitta, N./Wu, F./Lee, J. T./Yushin, G. (2015): Li-Ion Battery Materials: Present and Future, in: Materials Today, 18 (5), S. 252–264.

Olivetti, E. A./Ceder, G./Gaustad, G. G./Fu, X. (2017): Lithium-Ion Battery Supply Chain Considerations: Analysis of Potential Bottlenecks in Critical Metals, in: Joule, 1 (2), S. 229–243.

Roper, A. T./Cunningham, S. W./Porter, A. L./Mason, T. W./Rossini, F. A./Banks, J. (2011): Forecasting and management of technology, 2nd ed, Hoboken, N.J: John Wiley & Sons.

Simon, P./Gogotsi, Y. (2008): Materials for Electrochemical Capacitors, in: Nature Materials, 7 (11), S. 845–854.

Soeda, T. (2012): Type HD300 Hybrid Shunting Locomotive, in: Japanese Railway Engineering, (176), S. 1–4.

Terranova, M. L./Orlanducci, S./Tamburri, E./Guglielmotti, V./Rossi, M. (2014): Si/C Hybrid Nanostructures for Li-Ion Anodes: An Overview, in: Journal of Power Sources, 246 , S. 167–177.

Thielmann, A./Sauer, A./Wietschel, M. (2015b): Gesamt-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030, URL: <http://www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/t/de/publikationen/GRM-LIB.pdf> (zugegriffen: 18.02.2018)

United Nations (2005): Agreement concerning the adoption of uniform technical prescriptions for wheeled vehicles, equipment and parts which can be fitted and/or be used on wheeled vehicles and the conditions for reciprocal recognition of approvals granted on the basis of these prescriptions, URL: <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/main/wp29/wp29regs/r101r2e.pdf> (zugegriffen: 27.11.2017).

United States Environmental Protection Agency (1998): Locomotive Emission Standards - Regulatory Support Document, URL: <https://ne-pis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P100F9QT.PDF?Dockey=P100F9QT.PDF> (zugegriffen: 28.11.2017).

U.S. Department of the Interior (2018): Mineral Commodity Summaries 2018, URL: <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2018/mcs2018.pdf> (zugegriffen: 10.03.2018).

Lehrstuhlleitung



Univ.-Prof. Dr. habil.
Herwig Winkler

Projektansprechpartner



M.Sc.
Christian Kaucher

T: +49 (0)175 1430526
E: christiankaucher@gmail.com



Dipl.-Ing.
Martin Kunath

T: +49 (0)355 69 4102
E: martin.kunath@b-tu.de

Kontakt:

BTU Cottbus-Senftenberg
Lehrstuhl für Produktionswirtschaft
Siemens-Halske-Ring 6
03046 Cottbus

T: +49 (0)355 69-4089
F: +49 (0)355 69-4091
E: fg-produktionswirtschaft@b-tu.de
I: www.b-tu.de/fg-produktionswirtschaft

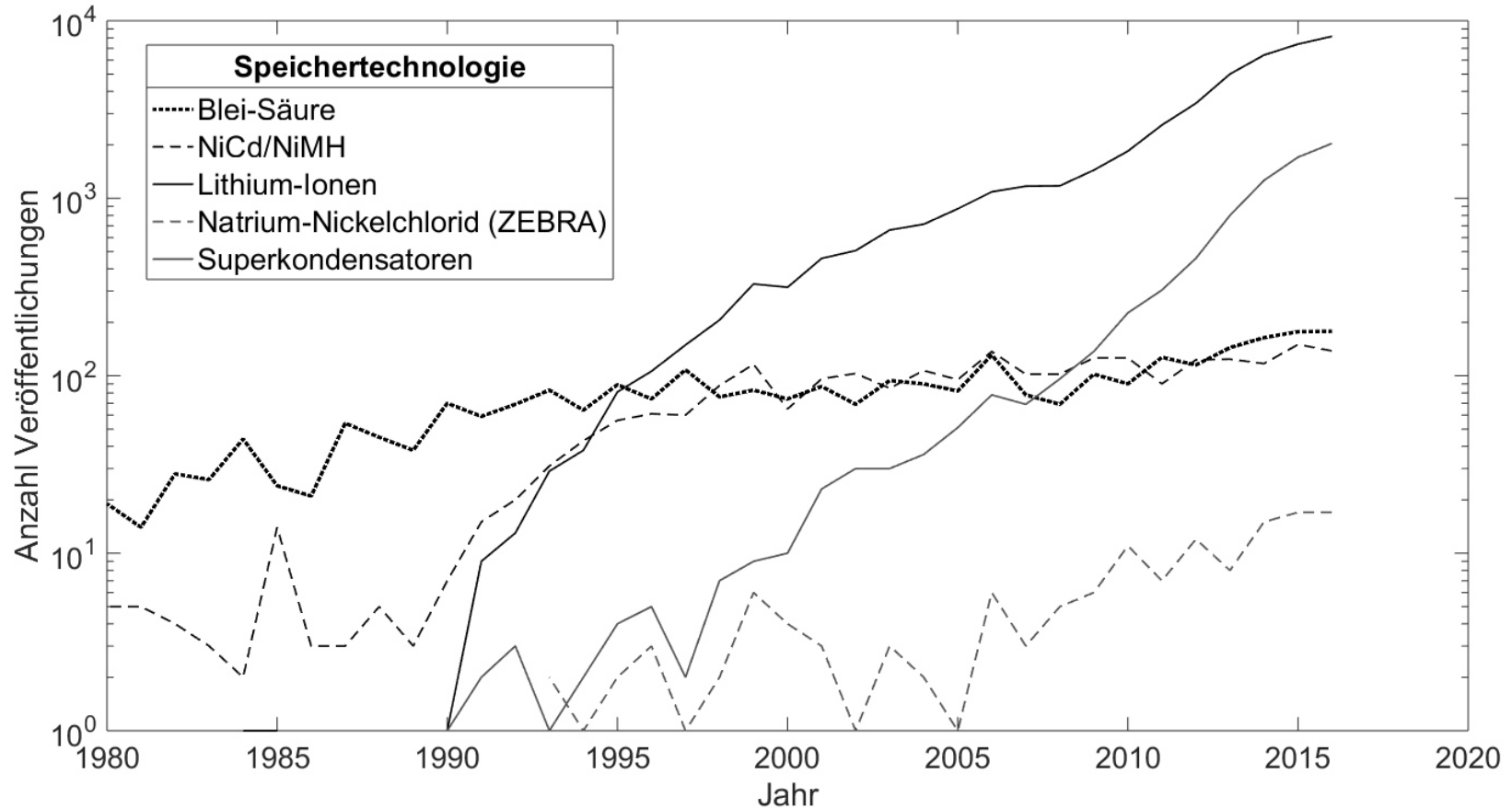
IV. Produkt- und Technologie-Roadmap

1. Erläuterungen zur Roadmap
2. Darstellung der Roadmap

V. Quellen

VI. Anhang

Darstellung der Anzahl an Veröffentlichungen zu verschiedenen Speichertechnologien bei der Literaturdatenbank Web of Science im Zeitraum von 1980 bis 2016:¹



¹ Suchdatum: 24.11.2017, zu den Suchwortkombinationen vgl. nächste Folie

Suchwortkombinationen der Abfrage bei Web of Science:

Suchplattform: Web of Science

Suchdatum: 24.11.2018

Zeitraum: 1980 - 2016

Technologie	Gesamtanzahl an Veröffentlichungen	Suchwortkombination
Blei-Säure-Technologie	2959	TS = ((lead-acid OR VRLA OR AGM) AND battery)
NiCd-/NiMH-Technologie	2430	TS = ((nickel-cadmium OR NiCd OR NiCad OR nickel-metal hydride OR nickel metal hydride OR NiMH OR Ni-MH) AND battery)
Natrium-Nickelchlorid-Technologie	141	TS = ((sodium nickel chloride OR sodium-nickel chloride OR sodium-nickel-chloride OR ZEBRA) AND battery)
Superkondensator-technologie	7389	TS = ((supercap OR supercapacitor OR electric double-layer capacitor OR ultracapacitor) AND (battery OR energy storage))
Lithium-Ionen-Technologie	44193	TS = ((li-ion OR lithium-ion OR LIB) AND battery)

Jahr	Blei-Säure	NiCd / NiMH	ZEBRA	Superkond.	Li-Ion
2016	178	138	17	2037	8171
2015	177	150	17	1704	7385
2014	164	117	15	1260	6409
2013	144	124	8	801	5008
2012	115	123	12	459	3427
2011	127	90	7	304	2585
2010	90	126	11	226	1843
2009	102	126	6	137	1441
2008	69	102	5	96	1175
2007	78	102	3	69	1170
2006	131	137	6	78	1087
2005	82	95	1	51	872
2004	90	107	2	36	714
2003	94	85	3	30	662
2002	69	103	1	30	507
2001	87	96	3	23	458
2000	74	65	4	10	315
1999	83	116	6	9	329
1998	76	88	2	7	206
1997	108	60	1	2	149
1996	74	61	3	5	106
1995	89	56	2	4	81
1994	64	43	1	2	38
1993	83	31	2	1	29
1992	69	20	0	3	13
1991	59	15	2	2	9
1990	70	7	0	1	1

Jahr	Blei-Säure	NiCd / NiMH	ZEBRA	Superkond.	Li-Ion
1989	38	3	1	0	0
1988	45	5	0	0	1
1987	54	3	0	0	0
1986	21	3	0	0	0
1985	24	14	0	2	1
1984	44	2	0	0	1
1983	26	3	0	0	0
1982	28	4	0	0	0
1981	14	5	0	0	0
1980	19	5	0	0	0