

**Vernetzte Ladedienste für die Elektromobilität:
Die modulare Multilevel-Batterie (M2B) als disruptiver Ansatz
zur technischen Befähigung des Elektrofahrzeugs**

Johannes Glück

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

Doktor-Ingenieurs
(Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Gutachter:

1. Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Weyh
2. Prof. Dr.-Ing. Christian Endisch

Die Dissertation wurde am 11. Oktober 2019 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 16. Mai 2020 angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 03. Juni 2020 statt.

Kurzfassung

Die Elektromobilität stellt bisherige Geschäftsmodelle der Automobilindustrie zunehmend in Frage. Neue Schnittstellen, wie die zur Energiewirtschaft, manifestieren sich und müssen für den Erfolg der Technologie effizient gestaltet werden. Hierfür ist das Produkt ‚Mobilität‘ zusammen mit seinen Dienstleistungskomponenten neu zu denken, denn bislang existiert kein durchgängiges Konzept zur wirtschaftlichen und technischen Integration von Elektrofahrzeugflotten in das Energieversorgungssystem.

Intelligente Produkte und Services rund um das Laden von Elektrofahrzeugen, sogenannte vernetzte Ladedienste sind ein vielversprechender Ansatz, um ein Anreizmodell zur Einflussnahme auf das Ladeverhalten zu etablieren. Es herrscht jedoch Unklarheit darüber, auf welche Art und Weise Fahrzeuge einen möglichst großen Beitrag innerhalb künftiger Energieversorgungsstrukturen leisten können. Die vorliegende Forschungsarbeit stellt sich daher zunächst die Frage, welche vernetzten Ladedienste in der Lage sind, mit Hilfe des Lastverschiebungspotenzials von Elektrofahrzeugen sinnstiftend zur Dezentralisierung des deutschen Energieversorgungssystems beizutragen. Mittelfristig leisten zunächst diejenigen Energiemanagementprodukte einen Mehrwert, welche die Belange des lokalen Ökosystems des Kunden adressieren („lokales Energiemanagement“). Zu einem späteren Zeitpunkt und mit zunehmender Marktdurchdringung der Elektromobilität haben auch großskaligere Anwendungen, die ganze Fahrzeugflotten aggregieren, hohes Marktpotenzial.

Heutige Elektrofahrzeuge sind mit ihrer Lade- und Kommunikationsinfrastruktur nur mit Einschränkungen in der Lage, gezielt an oben genannten Anreizsystemen und Marktmechanismen des Energiemarktes zu partizipieren. Daher erscheint es aus Sicht der Automobilindustrie sinnvoll, in einem ersten Schritt die konsequente technische Befähigung künftiger Fahrzeuggenerationen für ein Angebot vernetzter Ladedienste sicherzustellen. Dabei muss der strategische Schwerpunkt ihrer Anstrengungen auf dem Fahrzeug selbst und seiner Integrationsfähigkeit in das Energiesystem liegen. Weitere Kompetenzen, wie die des Energiemanagements, sind für sie zweitrangig.

Aus diesem Grund sucht die vorliegende Arbeit nach einer technischen Grundlage zur Gestaltung dieser Transformation. Die modulare Multilevel-Batterie (M2B), die auf der in der Leistungselektronik viel diskutierten Multileveltechnologie basiert, scheint ein vielversprechender Ansatz zu sein. Durch Aufbrechen bislang statischer Batteriestrukturen und durch Hochintegration von Batteriespeicher und Leistungselektronik bildet sie die Grundlage für eine Neugestaltung der Lade- und Antriebsarchitektur von Elektrofahrzeugen. Zusätzliche systemimmanente Freiheitsgrade wirken sich sowohl auf das Ladesystem als auch das Antriebssystem positiv aus. Im Hinblick auf vernetzte Ladedienste sind insbesondere höhere Systemwirkungsgrade, die inhärent bidirektionale und leistungsstarke Ladeschnittstelle sowie die Interoperabilität mit verschiedenen Ladestandards ausschlaggebend. Die Auswirkungen reichen aber deutlich über einen positiven Einfluss auf das energiewirtschaftliche Potenzial eines Elektrofahrzeuges hinaus. Genau dieser Zusammenhang stellt die Chance der modularen Multilevel-Batterie dar. Die Summe der Systemvorteile kann den Einsatz eines im Vergleich zum Stand der Technik komplexeren M2B-Systems rechtfertigen.

Abstract

Electromobility is increasingly calling existing business models into question. New interfaces such as to the energy industry are developing and need to be designed efficiently for the success of the technology. Therefore the product ‘mobility’, together with its service components, must be re-examined, because, as of today, there is no consistent concept for integrating fleets of electric vehicles (EVs) into the energy supply system – neither economically nor technically.

Smart products and services in the field of EV charging, generally referred to as connected charging services, are a promising approach for incentivizing beneficial charging behavior. By utilizing the electric vehicles’ load shifting potential, they might be able to harmonize customer and industry needs. However, there is uncertainty how electric cars can maximize their specific contribution within Germany’s future energy structures. Initially this research project identifies future charging strategies for EVs in distributed energy systems and derives an approach to successfully bring them to market. Energy management products that are addressing the concerns of the customer’s local ecosystem (“local energy management”) are adding most value in the medium term. Long term, and with the increasing market penetration of electromobility, large-scale applications that are aggregating fleets of EVs will offer significant market potential.

Today’s electric vehicles with their charging and communication infrastructure have only limited access to the aforementioned incentive systems and market specific mechanisms used by the energy industry. Therefore – as a first step – it seems reasonable for the automotive industry to consistently prepare future vehicle generations to offer connected charging services. The EV itself and its ability to integrate into the energy system must be of the highest strategic importance to the OEM. Other competencies, like sound energy industry skills, are second-rate.

This rapidly changing landscape is the reason why this thesis is looking for a technical basis that is capable of shaping this transformation. The modular multilevel battery (M2B), which is based on widely researched multilevel technology, seems to be a promising approach. Through restructuring of current static battery architecture and further integration of battery storage and power electronics the groundwork can be laid for new concepts in charging and powertrain architecture for electrical vehicles. A novel modular multilevel parallel converter-based split battery system for electric vehicles, enabling dynamic switching of battery cells in parallel and in series is presented. Each individual battery cell may be interconnected to its neighbors according to operational needs, e.g. to provide optimum source resistance, lowest state-of-charge (SOC) cycling, and balanced aging, rendering separate battery management systems (BMS) unnecessary. Applying the proposed technology in EVs may fundamentally change existing powertrain architectures and charger topologies, as it merges the battery storage system and the power converter. This forms the basis for a highly integrated power electronics unit that includes traction converter, battery charger, and BMS. Higher system efficiency, inherent bi-directional fast charging capability and interoperability with different charging modes are included. These technological advantages as well as the M2B’s contribution to the energy system can justify employing this technology, even though it is more complex than the current state of the art.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Motivation	1
1.1 Herausforderungen vernetzter Ladedienste	1
1.1.1 Exogene und endogene Herausforderungen für den OEM	2
1.1.2 Energiewirtschaftliche Rahmenbedingungen	6
1.1.3 Wettbewerbssituation und unternehmerische Praxis	9
1.2 Zielsetzung und forschungsleitende Fragestellung	13
1.2.1 Identifikation vernetzter Ladedienste	14
1.2.2 Anforderungen an OEM und Fahrzeug	14
1.2.3 Lösungsraum zur technischen Fahrzeugbefähigung und dessen Bewertung	15
1.3 Aufbau, Beitrag und Abgrenzung der vorliegenden Arbeit	16
2. Beitrag vernetzter Ladedienste zur Dezentralisierung des deutschen Energieversorgungssystems	19
2.1 Einleitung	19
2.2 Forschungsdesign und Methoden	19
2.2.1 Theoriebasierte Exploration	21
2.2.2 Empirisch-qualitative Exploration	21
2.2.3 Validierung der Untersuchungsergebnisse	22
2.3 Stand der Technik	24
2.3.1 Integration von Elektromobilität in Energie- und IKT-System	24
2.3.2 Gegenüberstellung bestehender Modellierungsansätze	28
2.3.3 Auswirkungen ungesteuerten Ladens auf das Energieversorgungssystem	31
2.3.4 Beitrag der Elektromobilität in dezentralen Energieversorgungssystemen	33
2.4 Stakeholder-Analyse zur Identifikation vernetzter Ladedienste und Erfolgsfaktoren	38
2.4.1 Stakeholder und Zusammenarbeitsmodelle	39
2.4.2 Identifikation vernetzter Ladedienste	41
2.4.3 Kritische Erfolgsfaktoren	43
2.4.4 Handlungsbedarfe für OEMs	45
2.5 Diskussion	47
3. Vernetzte Ladedienste als Produkt-Service-System	48
3.1 PSS Schichtmodell als technologiebasiertes Rahmenkonzept	48
3.2 Definition erforderlicher PSS Infrastruktur	52
3.2.1 Servicekomponenten vernetzter Ladedienste	52
3.2.2 Produktkomponenten vernetzter Ladedienste	56
3.3 Synthese des PSS	58

4. Potenziale der modularen Multilevel-Batterie (M2B) im Elektrofahrzeug	60
4.1 Grundlagen der HV-Systemarchitektur im Elektrofahrzeug	61
4.1.1 Batteriespeichersysteme	62
4.1.2 Ladesystem und HV-Busstrukturen	63
4.1.3 Antriebskomponenten	65
4.1.4 Leistungselektronik und Peripherie	66
4.2 Technologierestriktionen	68
4.3 Die modulare Multilevel-Batterie im Elektrofahrzeug	69
4.3.1 Mikrotopologie	71
4.3.2 Makrotopologie	73
4.3.3 Eigenschaften	77
4.3.4 Auswirkungen auf Systemarchitektur und Fahrzeugeigenschaften	85
4.4 Modellierung und Simulation	88
4.4.1 Prämissen zur Systemdimensionierung	88
4.4.2 Aufbau und Struktur des Simulationsmodells	89
4.4.3 Modulbalancing	90
4.4.4 Ladesystem	92
4.4.5 Antriebsstrang	96
4.4.6 DC-Zwischenkreisaukopplung zur Versorgung des Niederspannungsbordnetzes	98
4.5 Ergebnisse	100
4.6 Diskussion	102
5. Schlussfolgerungen	104
6. Resümee	107
Abbildungsverzeichnis	109
Tabellenverzeichnis	113
Literaturverzeichnis	114
Anhang	123

1. Einleitung und Motivation

Die Elektromobilität konfrontiert Automobilhersteller (OEMs¹) mit neuen Anforderungen, die deutlich über die Grenzen ihrer bisherigen Kernkompetenzen hinausreichen. An der Schnittstelle zur Energiewirtschaft werden neue Zusammenarbeitsmodelle und Technologien zur Gestaltung durchgängiger Produktangebote sowie zur Entwicklung kundenwerter Fahrzeugkonzepte zwingend erforderlich.

Nicht zuletzt die aktuelle Medienberichterstattung warnt schon heute – trotz einer bislang vergleichsweise geringen Marktpenetration der Elektromobilität – vor großen Problemen im Hinblick auf Stromnetz und Ladeinfrastruktur sowie der „Dimension der Aufgabe ‚Elektromobilität‘“ (Frankfurter Allgemeine Zeitung, 2017). Das Energieversorgungssystem muss künftig insbesondere den erhöhten Energiebedarf einer elektrifizierten Fahrzeugflotte decken. Gleichzeitig ist mit höheren temporären Spitzenlasten zu rechnen.

Intelligente und vernetzte Ladedienste bieten durch Nutzung des Lastverschiebungspotenzials von Elektrofahrzeugen (EVs) die Chance, Kundennutzen und energieversorgungssystemseitige Interessen in Einklang zu bringen. Bislang sind EVs hierfür zusammen mit ihrer Lade- und Kommunikationsinfrastruktur nur rudimentär befähigt. Einheitliche Standards fehlen weitestgehend. Dennoch drängen erste proprietäre Produktangebote kleineren Maßstabs, etwa zur Energieverbrauchsoptimierung dezentraler Energieerzeugungsanlagen mit Hilfe des EVs, in den Markt. Kommerziell verfügbare Anwendungen zur Nutzung des energiewirtschaftlichen Potenzials größerer EV-Flotten auf Übertragungs- oder Verteilnetzebene existieren derzeit noch nicht (Glück, Brandt, & Weyh, 2017).

Kapitel 1 beschreibt das Spannungsfeld aus automobil- und energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen für die Elektromobilität und ordnet den potenziellen Beitrag vernetzter Ladedienste in dieses ein. Daraus werden die Ziele der vorliegenden Arbeit abgeleitet, forschungsleitende Fragestellungen identifiziert sowie deren jeweiliger wissenschaftlicher Beitrag diskutiert.

1.1 Herausforderungen vernetzter Ladedienste

Die Fahrzeugvernetzung spielt für die Produktentwicklung in der Fahrzeugindustrie eine immer größere Rolle. Drahtlose Breitband-Technologien ermöglichen neue mobile Online-Dienste und stellen bereits heute ein wichtiges Differenzierungsmerkmal in der Automobilindustrie dar (Albers, Kurrle, & Moeser, 2014). Moderne Fahrzeuge sind dabei zunehmend nur noch ein Teil eines größeren System-of-Systems (SoS) (Maier, 1998). Die Herausforderungen liegen hier nicht mehr nur in der Herstellung eines physischen Produkts, sondern auch in der Einbettung von IT-Systemen und der Koordination von Informationsflüssen (Haverkort, 2013).

Diese Entwicklung spiegelt sich auch in den Produktentstehungsprozessen im Kontext der Elektromobilität wieder. Neben zahlreichen physischen Produktbestandteilen – hierzu zählen neben dem EV nun auch verschiedene öffentliche oder private Energieversorgungssystemkomponenten sowie die Ladeinfrastruktur – sind auch Backend-Komponenten Bestandteil des Produktangebots. Auch wenn es bislang

¹ Automobilhersteller werden aus dem Englischen abgeleitet auch als OEM (Original Equipment Manufacturer) bezeichnet (Wallentowitz, Freialdenhoven, & Olschewski, 2009). Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die Begriffe „Automobilhersteller“ und „OEM“ synonym verwendet.

in vielen Fällen das Ziel der OEMs war, den exklusiven Zugang zu Fahrer- und Fahrzeugdaten zu verteidigen, ist es in zunehmendem Maße erforderlich, auch Systeme von Energieversorgungsunternehmen oder verschiedenen Drittanbietern miteinzubinden. Dabei ist ein System-of-Systems als Zusammenschluss von Einzelsystemen und Komponenten zu verstehen, welches sich durch zwei Kerneigenschaften auszeichnet: Zum einen müssen die nicht verbundenen Komponenten auch unabhängig voneinander sinnvolle Arbeit verrichten können („Operational Independence“), zum anderen können diese auch unabhängig voneinander arbeiten („Managerial Independence“) (Maier, 1998).

Der im Weiteren verwendete Begriff „vernetzte Ladedienste“ umfasst die Summe der Produkt- und Serviceangebote im Kontext des Ladens von EVs. Ziel ist es, durch Orchestrierung des Zusammenspiels von physischen Komponenten und IT-Systemen dem EV-Kunden einen monetären oder ideellen Wert zu stiften. Das unmittelbare Angebot eines vernetzten Ladedienstes an den Kunden kann direkt durch den OEM erfolgen, regelmäßig besetzen aber auch Energieversorgungsunternehmen oder Drittanbieter diese Schnittstelle.

Um den technischen und wirtschaftlichen Beitrag von EVs zu maximieren, ist die gezielte Abbildung von sowohl kunden- als auch energieverorgungssystemseitigen Anforderungen im Angebot vernetzter Ladedienste notwendig. Diese Anforderungen hängen stark vom konkreten Anwendungsfall und weiteren Rahmenbedingungen ab. Letztere werden im Folgenden näher erläutert.

1.1.1 Exogene und endogene Herausforderungen für den OEM

Ein Großteil der Wertschöpfung in der Automobilindustrie liegt bisher bei OEMs und deren Zulieferern. Dabei ist der Stand der Technik konventioneller Antriebskonzepte zusammen mit seiner Infrastruktur über Jahrzehnte gewachsen und entspricht in weiten Teilen dem Kundenwunsch. Gleichzeitig jedoch sind die bestehenden Technologien ausgereizt und Optimierungspotenziale weitestgehend ausgeschöpft.

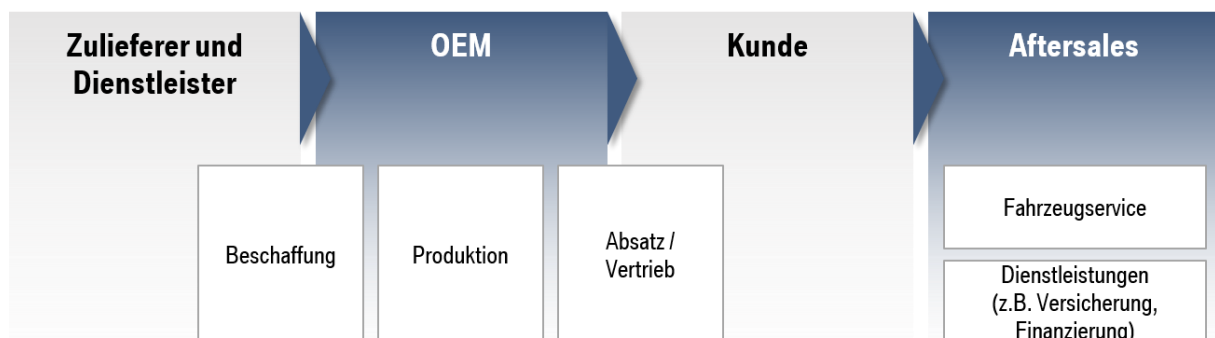


Abbildung 1-1: Herkömmliche Wertschöpfungskette in der Automobilindustrie (in Anlehnung an Kley, Lerch, & Dallinger, 2011)

Der OEM selbst hat in der herkömmlichen Wertschöpfungskette maßgeblichen Einfluss auf alle wesentlichen Wertschöpfungsstufen sowie auf ihre zugehörigen und etablierten Akteure (vgl. Abbildung 1-1). Zulieferer werden neben der Erbringung von Entwicklungsdienstleistungen insbesondere zur Teilebeschaffung herangezogen, wobei die Fertigungstiefen der Zulieferer je nach Komponente stark variieren können. Die klassische Fahrzeugproduktion (lackierte Karosserie, Montage, Qualitätssicherung) übernimmt typischerweise der OEM selbst, während der Absatz und Vertrieb ebenso wie der spätere Fahrzeugservice entweder durch unternehmenseigene Händlerorganisationen, Vertragshändler oder auch

freie Händler erfolgt. Immer mehr OEMs setzen darüber hinaus auch auf ein Angebot von Finanzierungsdienstleistungen und weiteren Services für den Endkunden.

Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs wird die Wertschöpfungsanteile aus ihrem bisherigen Zentrum in vor- und nachgelagerte Wertschöpfungsstufen verschieben. Dabei geht die Restrukturierung der Wertschöpfungskette weit über die bloße Veränderung ihrer bereits bestehenden Komponenten hinaus. Es wird sich langfristig eine neuartige Industriestruktur ergeben. Allerdings ist die Bedeutung der einzelnen Akteure noch offen. (Kampker, Vallée, & Schnettler, 2013)



Abbildung 1-2: Veränderungen in der automobilen Wertschöpfungskette durch Elektromobilität (in Anlehnung an Kley, Lerch, & Dallinger, 2011)

In der klassischen Wertschöpfungskette haben viele OEMs ihre Kompetenzen auf Produkt- und Produktionstechnologien für herkömmliche Antriebssysteme mit Verbrennungsmotoren konzentriert. Im Bereich elektrischer Antriebe und zugehöriger Systemarchitekturen von EVs haben sie hingegen kaum Know-how. Anders die Zulieferer: Da diese u.a. verstärkt im Bereich der (Fahrzeug-) Elektronik tätig sind – einem Bereich der Wertschöpfung, der von OEMs bislang oft ausgelagert wurde – kann es ihnen gelingen, sich als Systemlieferant für elektrische Antriebe und Antriebskomponenten zu etablieren. Ein prominentes Beispiel für derartige Produktangebote ist die „eAchse“ des Business Sektors „Mobility Solutions“ der Firma Bosch. Hierbei handelt es sich um eine Komplettlösung eines hochintegrierten und modularen elektrischen Achsantriebs für verschiedenste Anwendungen (Bosch Mobility Solutions, 2017). Gleichzeitig werden aber auch branchenfremde Unternehmen – etwa aus den Bereichen Unterhaltungselektronik, Energieversorgung, Anlagentechnik, Leistungselektronik und Batteriespeichersysteme – zunehmend Teil der neuen Wertschöpfungskette für EVs (siehe Abbildung 1-2). Insbesondere die deutsche Automobilindustrie, die in den wichtigen Schlüsseltechnologien der Elektromobilität kaum wettbewerbsdifferenzierende Kompetenzen besitzt, steht unter erheblichem Druck, diese aufzubauen (Canzler, Wentland, & Simon, 2011).

Mittelfristig werden sich verschiedene Zusammenarbeitsmodelle zur Entwicklung und Produktion von EVs formieren. Neben horizontalen Kooperationen, die sich zwischen Organisationen bilden, die sich auf unterschiedliche Wertschöpfungsschritte spezialisiert haben, sind auch vertikale Kooperationen denkbar. Bei letzteren haben sich die kooperierenden Unternehmen auf denselben Wertschöpfungsschritt spezialisiert und treten im Markt als Konkurrenten auf. Zusätzlich treten neben den aus der klassischen Wertschöpfungskette bekannten Unternehmen nun vermehrt auch (kleinere) Startups und Organisationen in Erscheinung, die ihre Geschäftstätigkeiten ausschließlich auf die Elektromobilität ausgelegt haben und gezielt in den Markt drängen.

Zunehmende Herausforderungen zeigen sich auch im Bereich Aftersales, also den nachgelagerten Bereichen der Wertschöpfungskette. Für den Betrieb eines jeden Elektrofahrzeuges bzw. einer Elektrofahrzeugflotte ist eine geeignete Ladeinfrastruktur zwingend erforderlich. Hierbei kommt besonders der Energiewirtschaft eine wichtige Rolle zu. Energieversorger und Unternehmen aus der Elektronikbranche etablieren sich zunehmend als Hersteller und Betreiber von Ladeinfrastruktur. So verdichten sich die Beziehungen zwischen zwei Branchen, die bislang nur wenige Berührungspunkte hatten.

Eine weitere, wichtige Herausforderung stellen neue Vertriebsmodelle und Vermarktungsstrategien für EVs dar. Die traditionell produktorientierten Verkaufsstrategien der OEMs lassen sich nicht unmittelbar auf EVs übertragen, deren Charakteristika eine andere Nutzung der Fahrzeuge impliziert. Innovative Mobilitätsdienstleistungen zielen einerseits auf eine veränderte Form der Nutzung (z.B. Carsharing oder gewerblich genutzte Fahrzeugflotten), andererseits auf die Reduzierung der Mehrkosten und Unsicherheiten (z.B. Lebensdauer) ab. Die Elektromobilität verlangt eine nutzungsorientierte Ausrichtung der Vertriebs- und Aftersales-Strategien der OEMs. Dies führt dazu, dass über die klassischen Geschäftsmodelle hinaus vermehrt auch dienstleistungsorientierte Angebote in den Markt drängen (vgl. Abbildung 1-3). Produkte werden durch zusätzliche Dienstleistungen so konzipiert, dass ein erhöhter Nutzen für den Kunden und folglich ein Wettbewerbsvorteil für das Produkt des Anbieters entsteht (Kley, 2011).

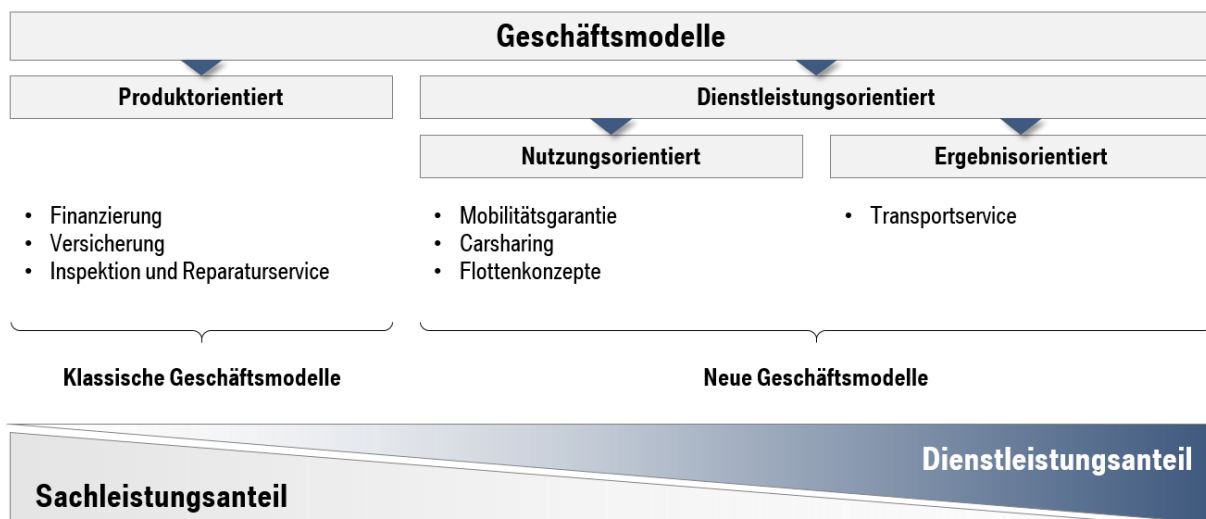


Abbildung 1-3: Adaption der Typologie von Tukker (2004) auf Geschäftsmodelle für Mobilitätskonzepte (Kley, 2011)

Der Trend zur Elektromobilität ist in erster Linie nicht aus intrinsischer Motivation der OEMs heraus entstanden und stellt diese nicht zuletzt im Bereich der Forschung und Entwicklung (F&E) vor neue Herausforderungen. Die erforderlichen Handlungspfade können nicht vollumfänglich im Rahmen bestehender Entwicklungsprozesse beschränkt werden, da für eine erfolgreiche Marktpositionierung zahlreiche neue Erfolgsfaktoren und Interdependenzen abseits der klassischen automobilen Wertschöpfungskette vorhanden sind.

Die vordergründigen Treiber für nachhaltige Mobilitätskonzepte sind politisch-rechtliche Faktoren. Eine immer strikter werdende Emissionsgesetzgebung erhöht den Innovationsdruck auf die Automobilindustrie und begünstigt den technischen Fortschritt im Bereich der Elektromobilität. Auch die sich ständig weiterentwickelnden politischen Rahmenbedingungen in immer mehr Ländern zahlen hierauf ein. Steuervergünstigungen, Elektrofahrzeug-Quoten oder Kaufprämien tragen zu einer wachsenden Marktdurchdringung bei (vgl. Abbildung 1-4).

Exogene Rahmenbedingungen, die einer schnelleren Verbreitung von BEVs (Battery Electric Vehicles) oder PHEVs (Plug-In Hybrid Electric Vehicles) entgegenwirken, sind insbesondere durch den Kunden bedingt. Bislang fehlt die breite Akzeptanz für die am Markt befindlichen Fahrzeug- und Mobilitätskonzepte, da sich das Kundenverhalten nicht in allen Aspekten mit diesen deckt. Der Kundenwunsch beschränkt sich dabei nicht nur auf höhere Reichweiten. Auch Infrastrukturbedarfe sind ein wesentlicher Bestandteil eines kundenwertigen Produktangebotes. Unabhängig von der zur Verfügung stehenden Ladeleistung ist die Verfügbarkeit öffentlicher, halb-öffentlicher und privater Ladestationen bislang nur unzureichend. Eine herstellerübergreifende Standardisierung zur Sicherstellung der Interoperabilität verschiedener technischer Lösungskonzepte wurde bis dato nicht in ausreichendem Maße etabliert. Nicht zuletzt stehen auch vergleichsweise hohe Herstellungskosten (v.a. von Batteriespeichersystemen) und entsprechend hohe Endkundenpreise einem wirtschaftlichen Betrieb einer elektromobilen Fahrzeugflotte entgegen.

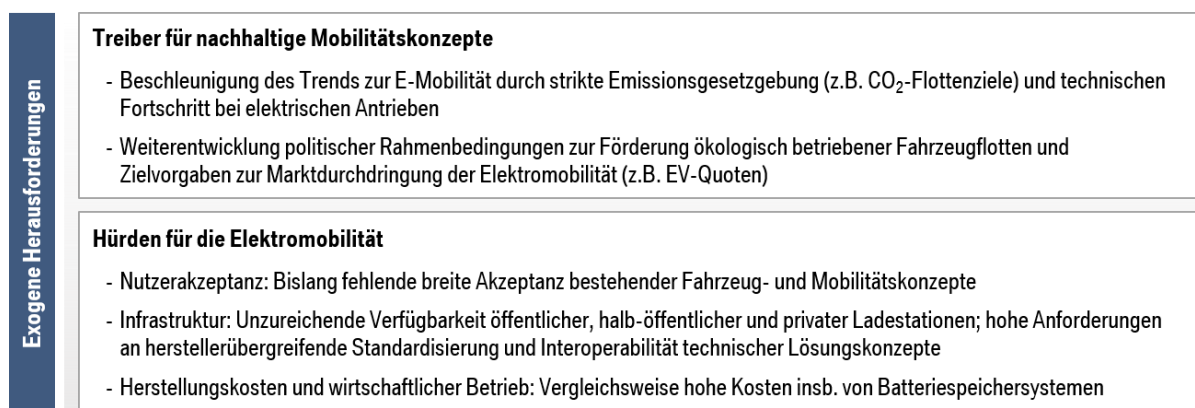


Abbildung 1-4: Übersicht über exogene und endogene Herausforderungen für die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten der OEMs im Bereich Elektromobilität (eigene Darstellung)

Aus oben genannten exogenen Herausforderungen resultieren unmittelbare endogene Herausforderungen für den OEM. Er hat im Hinblick auf die Gestaltung eines kundenwertigen BEV-Angebotes technologische Hürden zu überwinden. Dazu gehören neben innovativen Speichertechnologien, neuen Antriebsstrangkonzepthen und Ladesystemen auch Maßnahmen zur Effizienzsteigerung. Insbesondere in diesen Handlungsfeldern ist der OEM gefordert, Know-how zu generieren oder zu akquirieren und so auf den Strukturwandel und das Wegbrechen bisheriger Wertschöpfungsquellen zu reagieren. Im direkten Vergleich zu neuen Marktteilnehmern – Startup-Unternehmen wurden bereits eingangs als Beispiel hierfür genannt – kann immer mehr auch die erforderliche Serienbetreuung und Weiterentwicklung bereits im Markt befindlicher Produkte (konventionelle Fahrzeuge) als Wettbewerbsnachteil angesehen werden, der erhebliche Aufwände für die etablierten OEMs bedeutet.

Die Antwort der OEMs muss neben der bloßen Investition in Forschung und Entwicklung auch eine aktive Gestaltung des beschriebenen Strukturwandels sein. Nur so kann eine nachhaltige Wertschöpfungssicherung erreicht werden. Dies hat sowohl technologische Implikationen – bislang wettbewerbsdifferenzierende Kompetenzen sind nicht länger kundenrelevant – als auch Auswirkungen auf die Gestaltung künftiger Produktangebote. Neben dem Fahrzeug als Kernprodukt werden Dienstleistungen als Produktbestandteil immer wichtiger und das Etablieren neuer vertikaler und horizontaler Kooperationsmodelle zwingend erforderlich.

Die Elektromobilität kann sich nicht ausschließlich aus einem bestehenden ‚Automotive-Baukasten‘ bedienen und auf etablierte Zusammenarbeitsmodelle zurückgreifen. Diverse exogene Einflüsse treiben die OEMs, zeitnah nachhaltige Mobilitätsangebote auf den Markt zu bringen. Dies geht mit hohen Anforderungen an eingesetzte Technologien und Antriebskonzepte einher. Ein wesentlicher Produktbestandteil sind nun aber auch mobilitätsnahe Dienstleistungen, die bislang branchenfremden Unternehmen einen Markteintritt in Aussicht stellen.

1.1.2 Energiewirtschaftliche Rahmenbedingungen

Zahlreiche Länder und nicht zuletzt Deutschland haben in den vergangenen Jahren und Jahrzehnten einen signifikanten Wandel der bestehenden Energieversorgungsstrukturen vollzogen. Seit der Deregulierung und Liberalisierung des Energiemarktes werden konventionelle, fossile Energieträger in zunehmendem Maße durch erneuerbare Energien ersetzt. Gleichzeitig befinden sich intelligente, verteilte Energieversorgungssysteme auf dem Vormarsch. Ein Haupttreiber dieses Wandels ist der Bedarf an zuverlässiger und umweltfreundlicher Energieerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen. Unterstützt wird dieser Trend durch nationale und europäische Ziele zur Energieeffizienzsteigerung und CO₂-Reduktion (Blaabjerg & Ionel, 2015).

Es wurden enorme Anstrengungen unternommen, um eine Abkehr von bestehenden energiewirtschaftlichen Paradigmen hin zu erneuerbaren Energiequellen wie Windkraft, Photovoltaik (PV), Wasserkraft oder Energie aus Biomasse einzuleiten. Die vielversprechendsten Energieträger unter ihnen sind weiterhin Windkraft sowie Photovoltaik – schon heute leisten sie den größten Beitrag bei der Erzeugung erneuerbarer Energien (Blaabjerg & Ma, 2013) und es gilt als wahrscheinlich, dass ihr Anteil weiter wächst. Diese Entwicklung geht jedoch mit zwei vordergründigen Herausforderungen einher. Eine davon ist die erforderliche Transition bestehender Energieversorgungsstrukturen. Eine immer größer werdende Anzahl verteilter, erneuerbarer Energiequellen verdrängt konventionelle, zentrale und fossile Energieerzeugungsanlagen und muss in das Energieversorgungssystem eingegliedert werden, sowohl technisch als auch ökonomisch. Andererseits wird die Energieproduktion in Summe zunehmend wetterabhängig und dadurch in ihrem Verlauf deutlich volatil.

Jedoch gefährdet nicht nur der fortschreitende Ausbau erneuerbarer und dezentraler Energieerzeugungsanlagen die künftige Versorgungsqualität. Mit zunehmender Verbreitung von EVs verändern sich Anforderungen an die Betriebsführung elektrischer Energieversorgungsnetze. Die Auswirkungen des Betriebs einer umfassenden Ladeinfrastruktur und die Herausforderung, den resultierenden Leistungsbedarf intelligent zu verteilen, werden in der aktuellen wissenschaftlichen Literatur diskutiert (Probst & Tenbohlen, 2010). Hohe Ladeleistungen, die zumeist zeitsynchron auftreten, belasten die jeweiligen

Netzanschlusspunkte stark. Davon betroffen sind sowohl öffentliche, semi-öffentliche als auch private Ladestationen für EVs. In Abhängigkeit der spezifischen Netzgegebenheiten ist mit diversen Netzzrückwirkungen und Restriktionen zu rechnen (vgl. Kapitel 2.3.3). Wo nötig, wird diesen Problemen bislang vor allem mit Investitionen in den Ausbau von Verteilnetzen und Netzanschlusspunkten begegnet.

Bestehende Energiestrukturen, deren Ziel es ist, die Energieproduktion mit dem Verbrauch in Balance zu halten, stoßen nach und nach an ihre Grenzen. Ein verstärkter Ausbau von Energiespeichermöglichkeiten ist zwingend erforderlich. Aktuelle wissenschaftliche Literatur konstatiert, dass intelligente dezentrale Energieversorgungssysteme ein vielversprechender Ansatz sind, um den genannten Herausforderungen zu begegnen. Hierbei wird weniger die Optimierung ihrer Einzelkomponenten, als vielmehr das Zusammenspiel von Energieproduktion, Energiespeicherung und Energieverbrauch als Chance für künftige Energieversorgungsstrukturen verstanden (Pathmaperuma & Schippl, 2012). Die vordergründigen Optimierungsziele solcher Konzepte sind in Abbildung 1-5 dargestellt (Bitsch, 2006).



Abbildung 1-5: Strukturwandel in der Energieversorgung - Intelligente dezentrale Systeme setzen sich durch (eigene Darstellung)

Studien präzisieren, dass sich im Zuge dieses Wandels auch das bisherige Rollenverständnis der Energieversorgungsunternehmen maßgeblich verändert (Deloitte, 2017) (Wyman, 2017) (PWC, 2010). Insbesondere im Kontext der Elektromobilität eröffnen sich ihnen nicht nur direkte Gewinnmöglichkeiten durch wachsenden Stromabsatz, sondern auch der Markteintritt in völlig neue Geschäftsfelder (Kampker, Vallée, & Schnettler, 2013).

Luther (2011) beschreibt im Rahmen seiner Arbeit:

„Die Lösung für die Gestaltung intelligenter und nachhaltiger Energiesysteme liegt in der Vernetzung von Komponenten und Anwendungen der Energie- und Informationstechnik sowie in der interdisziplinären Zusammenarbeit.“

Eine zentrale Fragestellung für die Elektromobilität ist, wie Elektrofahrzeugflotten als mobile Speicher den Strukturwandel im deutschen Energieversorgungssystem unterstützen und bestehende Hürden über-

winden können. Sicherlich stellt die Integration von Elektrofahrzeugflotten (= Komponenten) zusammen mit einem Angebot vernetzter Ladedienste (= Anwendungen) in dezentrale Energieversorgungssysteme eine große Chance dar, um dieses Ziel zu erreichen (vgl. Abbildung 1-6).

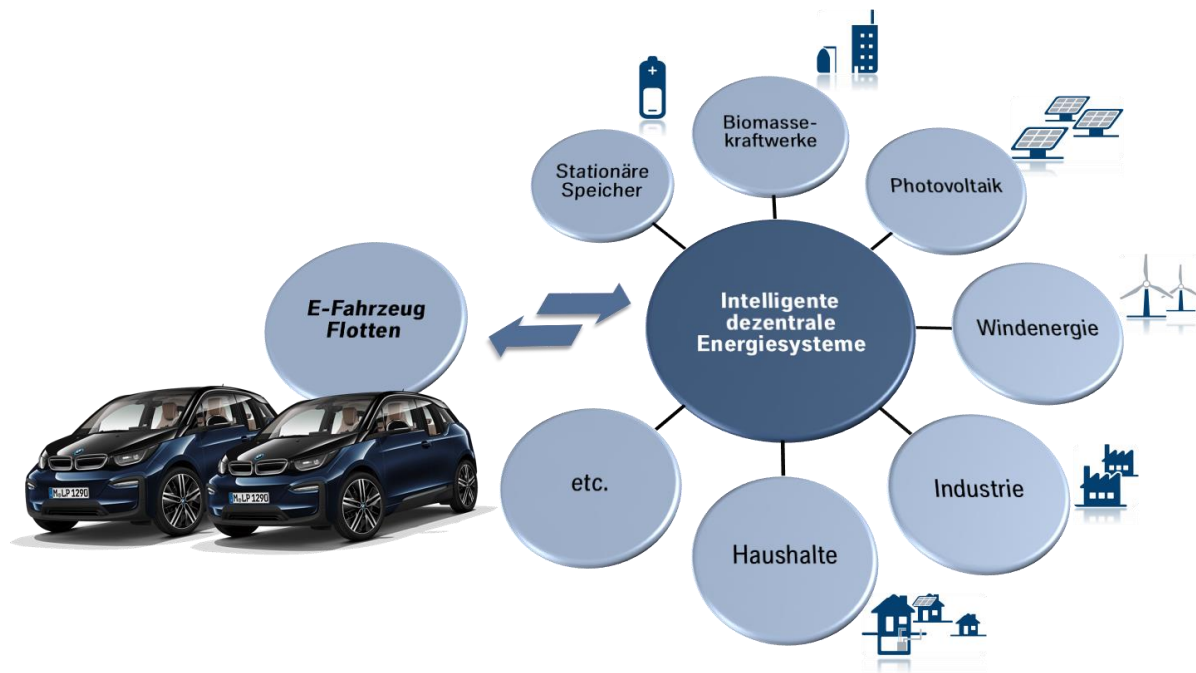


Abbildung 1-6: Integration von Elektrofahrzeugflotten als Beitrag zur erfolgreichen Dezentralisierung des Energieversorgungssystems (eigene Darstellung)

EVs parken in der Regel deutlich länger als sie benötigen, um vollständig geladen zu werden. Daher zeichnen sie sich durch ein gewisses Lastverschiebungs- und Energiespeicherpotenzial aus, welches stark vom individuellen Nutzungsverhalten jedes einzelnen Kunden abhängt (z.B. öffentliches vs. privates Laden, tägliche Fahrstrecken, Abfahrts- und Ankunftszeit). Ein optimierter, vernetzter Betrieb der Ladeinfrastruktur bietet bei Nutzung des Lastverschiebungspotenzials einer Elektrofahrzeugflotte zahlreiche Chancen, um auf die o.g. Herausforderungen zu reagieren. Durch ein gezieltes Angebot intelligenter Ladedienste ist es möglich, dem Kunden (B2C) ein stimmiges Funktionsportfolio anzubieten, während auch energiewirtschaftliche Interessen (B2B) ihre Berücksichtigung finden.

Der zunehmende Ausbau erneuerbarer Energien und der hohe Leistungsbedarf einer umfassenden Flotte von Elektrofahrzeugen stellt das bestehende Energieversorgungssystem vor große Herausforderungen. Intelligente dezentrale Energieversorgungssysteme sind ein vielversprechender Ansatz, diesen zu begegnen. Potenziell stiften auch Elektrofahrzeugflotten mit ihrem Lastverschiebungspotenzial und durch das Angebot vernetzter Ladedienste einen Mehrwert innerhalb künftiger Energiestrukturen.

1.1.3 Wettbewerbssituation und unternehmerische Praxis

In Deutschland gibt es aktuell nur eine geringe Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen, welche das Ziel der Bundesregierung von einer Million EVs (inkl. PHEVs) bis 2020 in weite Ferne rücken lässt (Bundesregierung, 2017). Nur ca. 55.000 BEVs und PHEVs waren bis einschließlich Dezember 2016 in Deutschland zugelassen. Laut Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) wurden in 2016 mit 11.410 BEVs und 13.744 PHEVs aber bereits deutlich mehr EVs angemeldet als im Vorjahreszeitraum (Kraftfahrt-Bundesamt, 2017). Dieser Trend verstärkte sich in den darauffolgenden Jahren 2017 bis 2019 nicht zuletzt aufgrund zusätzlicher staatlicher Förderungsmaßnahmen nochmals deutlich (vgl. Abbildung 1-7). Er bleibt jedoch weiterhin hinter den Erwartungen der Bundesregierung zurück.

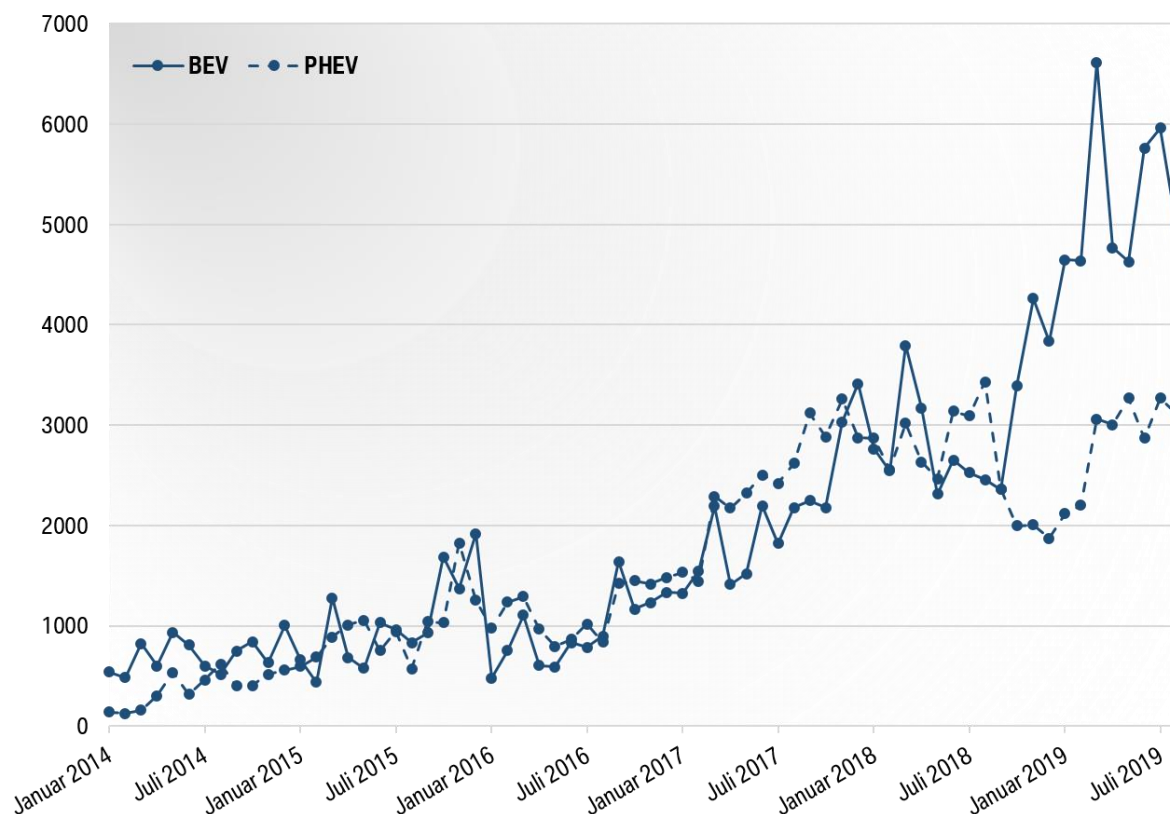


Abbildung 1-7: Zulassungszahlen von BEVs und PHEVs in Deutschland (GoingElectric, 2019)

Mit steigender Anzahl der im Feld befindlichen EVs steigt auch das Bedürfnis der Kunden nach individuellen und intelligenten Ladelösungen. Schon heute haben sich daher verschiedene Anbieter im Markt positioniert, welcher sich aufgrund technologischer und betriebswirtschaftlicher Unsicherheiten durch eine hohe Dynamik auszeichnet. Während etablierte Unternehmen versuchen, den Markt für sich zu entdecken, positionieren sich auch zahlreiche neue Player. Entsprechend sind das Marktumfeld und das Produktangebot sehr dynamisch, hochinnovativ sowie in Teilen kurzzyklisch.

Die im Folgenden beschriebenen Ladedienste stellen eine Auswahl des derzeit in Deutschland verfügbaren Produktangebotes vernetzter Ladedienste dar und geben Rückschlüsse auf die aktuelle Wettbewerbssituation (vgl. Abbildung 1-8).



Abbildung 1-8: Exemplarischer Auszug aus dem aktuellen Angebot vernetzter Ladedienste: Dargestellt sind (a) Kiwigrid mit „Das situative Auto“ (Kiwigrid, 2017), (b) LichtBlick mit „Fahrstrom“ (LichtBlick, 2017), (c) Greencom mit „Energy IoT Platform“ (Greencom, 2017), (d) The Mobility House mit „Vehicle-to-Grid (V2G)“ (The Mobility House, 2017) sowie (e) BMW mit „BMW Digital Charging Service“ (BMW Group, 2017)

(a) KIWIGRID – „DAS SITUATIVE AUTO“: Die 2011 gegründete Kiwigrid GmbH beschäftigt über 140 Mitarbeiter und betreut über 70 Projekte im Kontext des intelligenten Energiemanagements. Seit Februar 2017 ist das Technologieunternehmen auf der Liste der Global Cleantech 100 vertreten. Das Produktportfolio umfasst auch Ladelösungen für Elektrofahrzeuge – sowohl für Privat- als auch für Geschäftskunden – mit dem Ziel, Kosteneinsparungen zu erzielen und Solarenergie effizienter zu nutzen. Darüber hinaus wird es Netzbetreibern nach eigener Angabe ermöglicht, Elektrofahrzeuge netzverträglich und netzdienlich in Verteilnetze zu integrieren. Die Lösung „Das situative Auto“ stellt dem Kunden eine flexible Applikation für intelligentes Lademanagement zur Verfügung, die eine anreizbasierte und netzdienliche Ladesteuerung von EVs mittels dynamischer Tarifstrukturen ermöglicht. Auch eine „Vehicle-to-Home“-Ladesteuerung ist Produktbestandteil und hat zum Ziel, die PV-Eigenversorgung zu optimieren. Nicht zuletzt bietet Kiwigrid auch ein System zur Überwachung und zur intelligenten Steuerung von EV-Flotteninfrastrukturen. (Kiwigrid, 2017)

(b) LICHTBLICK – „FAHRSTROM“: Die 1998 gegründete LichtBlick SE versteht sich als Pionier und Innovator im Energiemarkt und ist mittlerweile der führende Anbieter für Ökostrom und Ökogas in Deutschland. Das Energie- und IT-Unternehmen entwickelt auch intelligente Lösungen für eine dezentrale und vernetzte Energieversorgung. Mit dem Konzept der „SchwarmEnergie“ versucht LichtBlick verteilte Energieerzeugungsanlagen und Verbraucher nach und nach zu vernetzen und intelligent zu steuern. Ihr „SchwarmDirigent“ stellt die dafür benötigte IT-Infrastruktur zur Verfügung, an welche auch Kundenprodukte wie z.B. der „Fahrstrom“ angegliedert werden. Dem Kunden ist es damit möglich, sein EV ausschließlich mit Ökostrom zu laden. Über einen Ladechip ist zudem ein Zugang zu zahlreichen Ladesäulen verschiedener Infrastrukturbetreiber in Europa sowie eine bequeme Kostenabrechnung im Produkt mit enthalten. LichtBlick kommuniziert bereits heute die Absicht, mit einer umfangreichen EV Flotte auch einen Beitrag zur Stabilisierung der Stromnetze und

zur Integration erneuerbarer Energiequellen leisten zu wollen. Ein konkretes Produkt ist für den Kunden jedoch noch nicht zugänglich. (LichtBlick, 2017)

- (c) **GREENCOM – „ENERGY IOT PLATFORM“²**: GreenCom Networks ist eine Software-as-a-Service-Gesellschaft, die White-Label-Lösungen für die Energieversorger sowie für Energiedienstleistungsunternehmen (B2B) anbieten. Dadurch ermöglicht sie das Management von Energienachfrage und -angebot sowie Speicherkapazität im Rahmen virtueller Kraftwerke für neu entstehende Energiemärkte. Das Unternehmen bezeichnet seine „Energy IoT Platform“ als den Grundstein für zukünftige Services von Energieunternehmen. Dabei wird ein umfassendes und leistungsfähiges Konzept verfolgt: GreenCom versteht das IoT als Vernetzung von Komponenten, Verarbeitung und Analyse großer Datenmengen, aktive Steuerung aller Devices sowie der Provisionierung³ der relevanten Applikationen. Sie befähigen so die Integration und den optimierten Betrieb von Photovoltaik-Anlagen, Batteriespeichersystemen und Wärmepumpen – aber eben auch von EVs. Das Unternehmen ist Plattform-Provider für zahlreiche neue, serviceorientierte Geschäftsmodelle wie etwa Energie- oder Mobilitäts-Flatrates oder auch verschiedener Peer-to-Peer Energiemodelle. (Greencom, 2017)
- (d) **THE MOBILITY HOUSE – „VEHICLE-TO-GRID (V2G)“**: The Mobility House (TMH) wurde 2009 gegründet und betreut ausgehend von den Standorten München, Zürich und San Francisco zahlreiche Automobilhersteller in über zehn Ländern. Das Unternehmen ist Anbieter von Lade- und Energiespeicher-Lösungen. Diese Technologien ermöglichen die Integration von Elektrofahrzeugen in das Stromnetz als aggregierter Schwarm Speicher fahrender EVs oder als stationäre Speicher aus Fahrzeugbatterien. Das Produktangebot von TMH fußt dabei auf drei Säulen: Dazu gehören kundenspezifische Ladelösungen (z.B. Lastmanagement, solaroptimiertes Laden, Installation von privaten Ladestationen, Abrechnungsservices), Batteriespeicherlösungen im industriellen Bereich (insb. Second Life Batteriespeichersysteme) und V2G Lösungen zur Stabilisierung des Stromnetzes. Vor allem letztere ist hierbei hervorzuheben. TMH ist der aktuell einzige Anbieter vernetzter Ladedienste, der basierend auf CHAdeMO⁴ auch rückspeisefähige EVs in das Smart Home des Kunden und somit in das Energieversorgungssystem integriert. (The Mobility House, 2017)
- (e) **BMW – „BMW DIGITAL CHARGING SERVICE“**: Mit ihrem „360° Electric“ Produktportfolio besetzt auch die BMW Group als einer der ersten OEMs den Markt für innovative Ladelösungen. Dem Kunden werden hier Hardware für den Heimpladebereich sowie Abrechnungsservices („ChargeNow“) für die öffentliche Ladeinfrastruktur zur Verfügung gestellt. Gleichzeitig kann sich der Kunde eines BMW BEVs oder PHEVs auch das Lastverschiebungspotenzial seines Fahrzeuges zu Nutze machen. Der BMW Digital Charging Service bietet neben einer Tarifoptimierung auch die Option, das EV entsprechend lokaler Gegebenheiten (z.B. eigene Solarstromverfügbarkeit) zu laden. Dafür werden Ladepläne, die auf dem individuellen Energiebedarf des Fahrzeuges und der berechneten

² Das Internet der Dinge (englisch: Internet of Things; Kurzform: IoT) bezeichnet die Vision einer globalen Infrastruktur der Informationsgesellschaften, die es ermöglicht, physische und virtuelle Gegenstände miteinander zu vernetzen und sie durch Informations- und Kommunikationstechniken zusammenarbeiten zu lassen (ITU-T, 2012).

³ Die Provisionierung ist ein wichtiger Bestandteil des IT-Betriebsmanagements und befasst sich mit der Verwaltung von Benutzern, deren Rechten und Ressourcen, der Bereitstellung von Verbindungen, von Hardware, Software, Diensten, Anwendungen und Speicherplatz.

⁴ CHAdeMO („Charge de Move“) ist die Bezeichnung des japanischen Schnellladesystems, das vom Energiekonzern Tepco und den Automobilherstellern Nissan, Mitsubishi, Toyota und Subaru entwickelt wurde.

Wetterprognose basieren, ermittelt. Der Ladevorgang erfolgt ausschließlich unidirektional. (BMW Group, 2017)

Die aktuelle Wettbewerbssituation zeigt, dass der Markt vernetzter Ladedienste aktuell insbesondere durch kleinere Energiemanagementdienstleister besetzt wird. Ebenso sind erste Produkte von OEMs verfügbar. Die klassischen Energieversorgungsunternehmen treten insbesondere als Infrastrukturanbieter (Wallboxen, Installationsdienstleistungen, Betreiber öffentlicher Ladestationen) für die Elektromobilität auf – ein relevantes Produktangebot vernetzter Ladedienste bieten sie dem Kunden insbesondere in Deutschland zum jetzigen Zeitpunkt nicht.

Da in der Automobilindustrie neben dem ausschließlichen Mobilitätsbedürfnis nach und nach auch energiewirtschaftliche Aspekte zu berücksichtigen sind, positionieren sich bisher branchenfremde Marktteilnehmer in der elektromobilen Wertschöpfungskette. Haupttreiber hierfür sind die technologischen Koordinationsanforderungen an größere Elektrofahrzeugflotten. Dabei ist das Angebot vernetzter Ladedienste heterogen. Es existieren zahlreiche Anbieter proprietärer Konzepte und Lösungsansätze. Auch eine Durchgängigkeit in der Positionierung der Anbieter in den Marktsegmenten fehlt bislang völlig. Erfolgreiche Zusammenarbeitsmodelle zwischen OEMs, Energieversorgungsunternehmen und den Energiemanagementdienstleistern müssen sich entwickeln und etablieren. Auch wenn der Markt für Elektrofahrzeuge weiterhin vorwiegend durch das Mobilitätsbedürfnis der Fahrzeugkunden geprägt sein wird, ist es langfristig sogar möglich, dass sich trotz hoher Markteintrittsbarrieren neue Player in den Vordergrund drängen (Kampker, Vallée, & Schnettler, 2013).

Oben genannte Beispiele sind ein Indiz dafür, dass für den Kunden Energieautarkie, lokale Energieoptimierung, Nachhaltigkeit sowie Kostenersparnis die vordergründigen Motivationen zur Nutzung intelligenter Ladefunktionen sind. Energieversorgungsunternehmen profitieren hingegen vom Lastverschiebungspotenzial (Vermeidung von Lastspitzen) der EV-Flotten sowie einem möglichen Angebot von Systemdienstleistungen (Regelleistung). Hieraus ergeben sich technische Anforderungen an das Elektrofahrzeug sowie an dessen Schnittstelle zur Lade- und Kommunikationsinfrastruktur, welche im weiteren Verlauf der Arbeit näher erläutert werden (vgl. Kapitel 3.3). Es kann jedoch vorweggenommen werden, dass der bisherige Produktentstehungsprozess von EVs das Mobilitätsbedürfnis des Kunden in den Mittelpunkt stellt, nicht aber die energiewirtschaftlichen Anforderungen an das Fahrzeugkonzept. Als Folge sieht man im Feld heute eine mangelnde sowie heterogene technische Befähigung von EVs und ihrer Ladeinfrastruktur. Es existieren zahlreiche Varianten zwischen sowie innerhalb der OEMs.

Zusammen mit einer wachsenden Elektrofahrzeugflotte entwickelt sich auch das Produktangebot vernetzter Ladedienste. Es drängen verschiedene Player – u.a. aus bislang branchenfremden Bereichen – in den Markt. Sie bieten vordergründig Kundenlösungen kleineren Maßstabs, etwa zur Energieverbrauchsoptimierung dezentraler Energieerzeugungsanlagen, an. Kommerziell verfügbare Anwendungen zur Nutzung des energiewirtschaftlichen Potenzials größerer EV-Flotten auf Übertragungs- oder Verteilnetzebene existieren derzeit nicht. Bislang sind die Fahrzeuge mit ihrer Infrastruktur nur rudimentär dafür befähigt. Zusammenarbeitsmodelle haben sich noch nicht etabliert.

1.2 Zielsetzung und forschungsleitende Fragestellung

Kapitel 1.1 zeigt, dass die Elektromobilität im Allgemeinen, sowie die energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen im Besonderen, die Automobilindustrie vor neue Herausforderungen stellen. Bisherige Vorgehensmodelle im Rahmen der Forschung und Entwicklung werden zunehmend in Frage gestellt. Das Produkt „Mobilität“ wird zusammen mit seinen Dienstleistungskomponenten neu gedacht. Aktuell gibt es aber noch kein durchgängiges Konzept zur wirtschaftlichen und technischen Integration von Elektrofahrzeugflotten in das Energieversorgungssystem – weder in der Praxis, noch in der Wissenschaft.

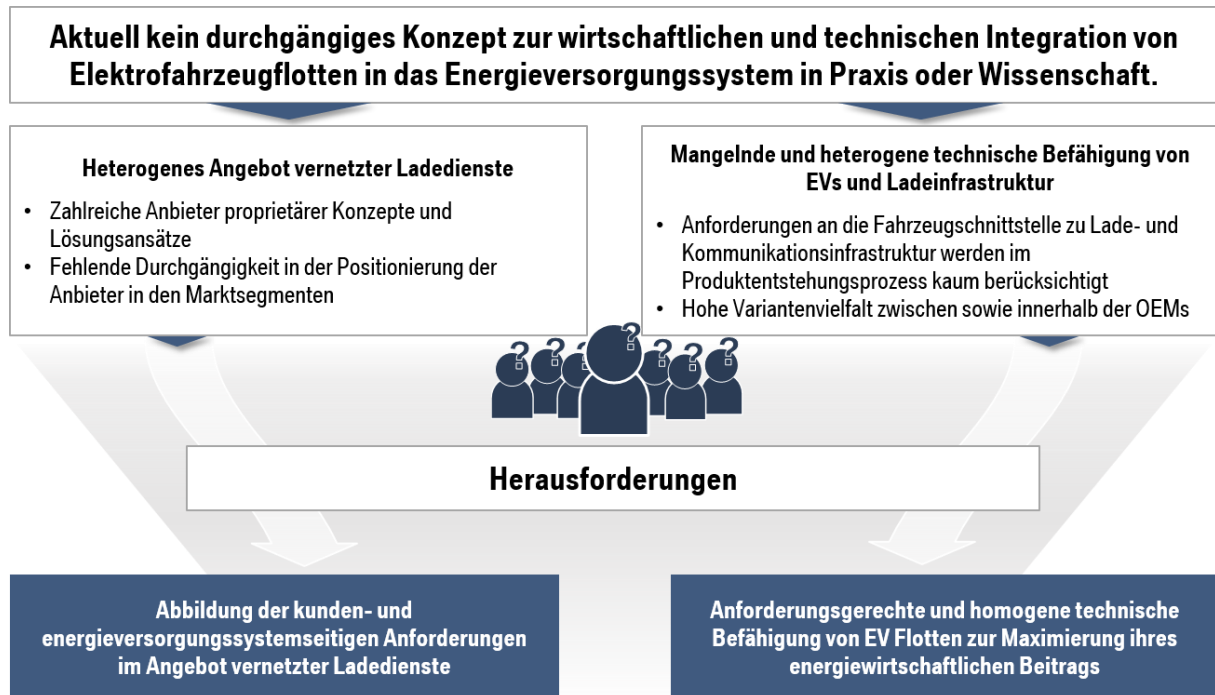


Abbildung 1-9: Zentrale Herausforderungen bei der Integration von EV-Flotten in dezentrale Energieversorgungssysteme (eigene Darstellung)

Abbildung 1-9 fasst wesentliche Charakteristika der derzeitigen Marktsituation zusammen. Sowohl die mangelnden technischen Voraussetzungen als auch die fehlende Interoperabilität zwischen den derzeit proprietären Kundenangeboten vernetzter Ladedienste verhindern, dass das energiewirtschaftliche Potenzial bestehender und künftiger EV-Flotten in vollem Umfang ausgeschöpft werden kann. Langfristig sind die kunden- und energieverorgungssystemseitigen Anforderungen konsequent im Angebot vernetzter Ladedienste abzubilden. Eine ebenso anforderungsgerechte und homogene technische Befähigung von EVs zur Maximierung ihres energiewirtschaftlichen Beitrags leistet ihren Beitrag dazu.

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, einen möglichen Lösungsraum zur Effizienzsteigerung im Verteilnetz aufzuzeigen, ohne den Fahrzeugnutzer hierfür in seinem präferierten Mobilitätsverhalten einzuschränken. Hieraus leitet sich ein Handlungsbedarf für die Angebotsgestaltung und die Fahrzeugbefähigung ab. Die forschungsleitenden Fragestellungen, die zum einen den Fokus des Forschungsvorhabens schärfen und zum anderen dessen Grobstruktur vorgeben, werden im Folgenden detailliert.

1.2.1 Identifikation vernetzter Ladedienste

Die technischen Anforderungen eines vernetzten Ladedienstes an das Elektrofahrzeug hängen stark vom jeweiligen Anwendungsfall ab. Bestimmte Ausprägungen lokaler Energiemanagementprodukte zum Beispiel sind zumeist auch ohne spezifische Befähigung des EVs darstellbar. Für die in Kapitel 1.1.3 beschriebenen Ladedienste reicht eine rudimentäre Ladeinfrastruktur (insb. unidirektionales Laden, geringe Ladeleistungen) zunächst aus. Sie setzen auf bestehende Fahrzeugarchitekturen auf. Spätestens aber mit dem Angebot von Energiemarktprodukten (z.B. Regelleistung) ergibt sich ein striktes Anforderungsset an das EV zusammen mit seiner Ladeinfrastruktur (z.B. Verfügbarkeit, bereitzustellende Leistung und Kapazität, bidirektionale Ladeschnittstelle, etc.) (vgl. Kapitel 2.3.4).

An dieser Stelle sei angemerkt, dass sich die im Rahmen der vorliegenden Arbeit beschriebenen Fragestellungen, Herangehensweisen und Ergebnisse ausschließlich auf den deutschen Markt beziehen. Aufgrund der hohen Varianz zwischen den Elektromobilitätsmärkten ist eine sinnvolle Abgrenzung des Forschungsgegenstandes erforderlich. Insbesondere der deutsche Markt ist aufgrund seines eigenen Anspruchs, eine Vorreiterrolle für die Elektromobilität einzunehmen, ein gutes Beispiel. In einem liberalisierten Energiemarkt mit einer hohen Durchdringung erneuerbarer Energiequellen findet man vorbildhafte Bedingungen für einen sich entwickelnden Markt vernetzter Ladedienste vor. Möglichkeiten des Übertrags der Ergebnisse dieser Arbeit auf weitere EV-Märkte sind im Einzelfall zu bewerten.

Die derzeit im Markt befindlichen vernetzten Ladedienste versuchen, die vorhandenen Möglichkeiten bestehender Fahrzeugkonzepte zu nutzen, da sie als nachgelagerte Dienstleistung (Aftersales) keine direkte Einflussmöglichkeit auf diese haben. Für ein künftiges Produktangebot, das attraktiv ist und dem Privatkunden sowie der Energiewirtschaft einen möglichst hohen Mehrwert bietet, ist diese Querverwirkung in künftigen Produktentstehungsprozessen konsequent zu berücksichtigen. Um das Anforderungsset an die technische Fahrzeugbefähigung ableiten zu können, ist es in einem ersten Schritt erforderlich, den konkreten Anwendungsfall zu kennen. Hieraus lässt sich folgende forschungsleitende Fragestellung ableiten:

Forschungsfrage 1:

Welche vernetzten Ladedienste leisten durch Nutzung des Lastverschiebungspotenzials von Elektrofahrzeugflotten einen wirtschaftlichen und technischen Beitrag zur Dezentralisierung des deutschen Energieversorgungssystems?

1.2.2 Anforderungen an OEM und Fahrzeug

Ist der darzustellende vernetzte Ladedienst oder die Kombination mehrerer vernetzter Ladedienste bekannt, können daraus die Implikationen auf die notwendige technische Befähigung des EVs abgeleitet werden. Hierfür ist die beabsichtigte strategische Positionierung des OEMs mit zu berücksichtigen. Ziel muss es sein, den vernetzten Ladedienst als Service mit den für seine Erbringung erforderlichen (technischen) Systemkomponenten und ihrer zugrundeliegenden Technologie in Zusammenhang zu bringen.

Sogenannte Systemmodelle sind gut dafür geeignet, solch komplexe Zusammenhänge besser verstehen, steuern und gestalten zu können. Je nach Situation und Erkenntnisinteresse gibt es verschiedene Möglichkeiten, ein Systemmodell zu verwenden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit scheinen sie insbesondere dafür geeignet, ein Ordnungsmuster zur Strukturierung des Problems zu beschreiben sowie die

Systemleistung unter Einbeziehung der Systemstruktur zu untersuchen (vgl. Kapitel 3). Daraus ist abzuleiten, welche technischen Stellhebel für den OEM existieren, um den energiewirtschaftlichen Beitrag seiner EV-Flotte zu maximieren und bestehende Restriktionen zu überwinden. Zusammengefasst lässt sich hieraus folgende Forschungsfrage formulieren:

Forschungsfrage 2:

Wie sieht ein Systemmodell aus, das identifizierte Ladedienste, strategische Positionierung eines OEMs sowie Anforderungen an die Fahrzeugschnittstelle zur Lade- und Kommunikationsinfrastruktur beschreibt?

1.2.3 Lösungsraum zur technischen Fahrzeugbefähigung und dessen Bewertung

Es ist vorwegzunehmen, dass im Ergebnis insbesondere das Ladesystem des EVs zusammen mit seiner Umrichter-Topologie einen signifikanten Einfluss auf das energiewirtschaftliche Potenzial der Elektromobilität hat. Es ist der vielversprechendste Gestaltungsparameter für den OEM (vgl. Kapitel 3).

Bestehende Batteriespeichertechnologien erfüllen die steigenden Anforderungen von EV-Kunden und der Energiewirtschaft nur auf Kosten eines höheren Bauteil- und Entwicklungsaufwandes sowie steigender Systemkomplexität. In der wissenschaftlichen Literatur werden Ansätze diskutiert, wie neuartige Batteriespeichersysteme (BSS) – basierend auf Multilevel-Umrichtertopologien – sowohl für stationäre Anwendungen (Singer, Helling, Weyh, Jungbauer, & Pfisterer, 2017) als auch für den Einsatz in EVs (Helling, Glück, Singer, & Weyh, 2016) einen Mehrwert stiften können. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit betrachtete modulare Multilevel-Batterie (M2B) verspricht viele bestehende technische Restriktionen überwinden zu können. Bedingt durch ihre Grundeigenschaften wird sie den genannten Anforderungen in vollem Umfang und ohne zusätzlichen Investitionsaufwand – bei gleichzeitig verbesserten Systemeigenschaften – gerecht.

Die der M2B zugrundeliegende Idee ist eine Hochintegration von Batteriespeicher und Leistungselektronik sowie ihr modularer Aufbau. Aufgrund ihrer Neuartigkeit ist für den erfolgreichen Einsatz dieser Technologie eine disruptive Neugestaltung der bestehenden Antriebsarchitektur von Elektrofahrzeugen erforderlich. Ihre Erarbeitung erfolgt im Rahmen der folgenden forschungsleitenden Fragestellung:

Forschungsfrage 3.1:

Wie ist eine mögliche M2B-basierte Makrotopologie für EVs vergleichend zu konventionellen Umrichter-Topologien zu gestalten?

In einem zweiten Schritt ist zu bewerten, inwiefern die Neugestaltung des Umrichter- und Batteriespeichersystems neue Kundenanwendungsfälle ermöglicht und ob bestehende Technologie- und Architekturrestriktionen dadurch überwunden werden können. Hieraus ergibt sich die abschließende Forschungsfrage:

Forschungsfrage 3.2:

Welche Implikationen hat die beschriebene Topologie im Hinblick auf identifizierte Anforderungen an die Fahrzeugschnittstelle sowie auf das energiewirtschaftliche Potenzial des EVs?

1.3 Aufbau, Beitrag und Abgrenzung der vorliegenden Arbeit

Nach der Darstellung bestehender Herausforderungen vernetzter Ladedienste und der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit werden nun Aufbau und Struktur des Forschungsvorhabens detailliert. Hierfür werden die Kapitelinhalte und ihr jeweiliger Ergebnisbeitrag erläutert (vgl. Abbildung 1-10).

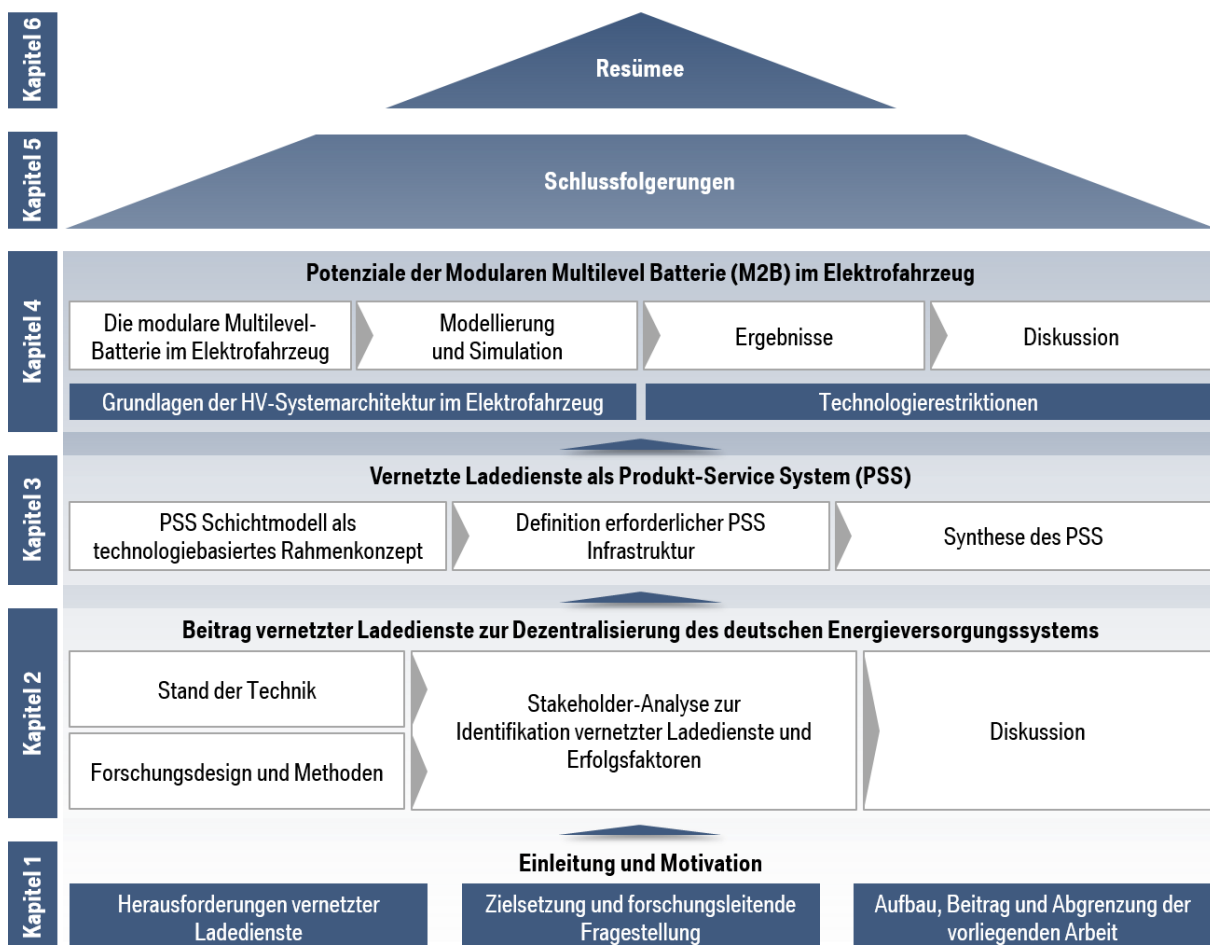


Abbildung 1-10: Aufbau und Struktur der Arbeit (eigene Darstellung)

KAPITEL 1 – EINLEITUNG UND MOTIVATION: Kapitel 1 stellt Hintergrund, Ziel und Rahmen der vorliegenden Arbeit dar. Hierfür werden zunächst die Herausforderungen vernetzter Ladedienste näher erläutert (vgl. Kapitel 1.1). Als erstes beschreibt Kapitel 1.1.1 exogene und endogene Herausforderungen aus der Perspektive des OEMs. In einem zweiten Schritt werden dann die vorherrschenden energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen skizziert, die schon heute eine zunehmende Verbreitung intelligenter Energiemanagementdienstleistungen begünstigen (vgl. Kapitel 1.1.2). Ergänzend analysiert Kapitel 1.1.3 die derzeitige Wettbewerbssituation im deutschen Markt und zeigt die unternehmerische Praxis anhand ausgewählter Beispiele auf. Aufbauend hierauf werden die Zielsetzung und forschungsleitenden Fragestellungen abgeleitet (vgl. Kapitel 1.2). Der Ergebnisbeitrag des Forschungsvorhabens gliedert

sich in die Identifikation vernetzter Ladedienste mit maximalem technischen und energiewirtschaftlichen Beitrag (vgl. Kapitel 1.2.1), die Ableitung der an den OEM und das Fahrzeug resultierenden Anforderungen (vgl. Kapitel 1.2.2) sowie die Erarbeitung eines Lösungsraums zur technischen Fahrzeugbefähigung und dessen Bewertung (vgl. Kapitel 1.2.3). Das vorliegende Kapitel beschreibt den Aufbau und wissenschaftlichen Beitrag der vorliegenden Arbeit und grenzt diesen ab.

KAPITEL 2 – BEITRAG VERNETZTER LADEDIENSTE ZUR DEZENTRALISIERUNG DES DEUTSCHEN ENERGIEVERSORGUNGSSYSTEMS: Gegenstand des Kapitels 2 ist die Beantwortung der ersten forschungsleitenden Fragestellung. Hierfür soll der mögliche Beitrag vernetzter Ladedienste zur Dezentralisierung des deutschen Energieversorgungssystems erarbeitet werden (vgl. Kapitel 2.1). Zunächst werden hierfür die forschungsmethodischen Grundlagen geschaffen (vgl. Kapitel 2.2). Im Detail fußen die Ergebnisse auf einer theoriebasierten (vgl. Kapitel 2.2.1) sowie empirisch-qualitativen Exploration (vgl. Kapitel 2.2.2). Validiert wird der erarbeitete Beitrag mittels der sogenannten Delphi-Methode (vgl. Kapitel 2.2.3). Die theoriebasierte Exploration fußt auf einer fundierten Erarbeitung des Stands der Technik (vgl. Kapitel 2.3). Hierfür wird zunächst diskutiert, wie sich die Elektromobilität in das bestehende und künftige Energie- sowie IKT⁵-System integrieren lässt (vgl. Kapitel 2.3.1) und welche Modellierungsansätze bislang verwendet wurden, um die Netzurückwirkungen einer umfassenden EV-Flotte zu quantifizieren (vgl. Kapitel 2.3.2). Mit welchen Auswirkungen auf das Energieversorgungssystem bei einer zunehmenden Verbreitung der Elektromobilität zu rechnen ist, beschreibt Kapitel 2.3.3. Gleichzeitig sind Elektrofahrzeuge potenziell auf vielfältige Weise dafür einsetzbar, einen Mehrwert in dezentralen Energieversorgungssystemen zu stiften. Kapitel 2.3.4 beschreibt, im Rahmen welcher konkreten Anwendungsfälle dies möglich ist – aber nicht jeder dieser Usecases ist aus technischer und energiewirtschaftlicher Sicht zugleich sinnvoll. Die im Rahmen des Forschungsvorhabens geführten Experteninterviews mit Vertretern aus Wissenschaft und Industrie selektieren daher die vielversprechendsten vernetzten Ladedienste (vgl. Kapitel 2.4). Konkret werden Szenarien für eine erfolgreiche Zusammenarbeit beteiligter Stakeholder entwickelt (vgl. Kapitel 2.4.1), Ladedienste entsprechend ihres Potenzials priorisiert (vgl. Kapitel 2.4.2), kritische Erfolgsfaktoren identifiziert (vgl. Kapitel 2.4.3) und Handlungsbedarfe für den OEM abgeleitet (vgl. Kapitel 2.4.4). Eine Diskussion ordnet die Ergebnisse im Kontext des Forschungsvorhabens ein (vgl. Kapitel 2.5).

KAPITEL 3 – VERNETZTE LADEDIENSTE ALS PRODUKT-SERVICE-SYSTEM: Kapitel 3 verfolgt das Ziel, vernetzte Ladedienste in ein technologiefokussiertes Framework einzubetten. Mit Hilfe eines sogenannten Produkt-Service-Systems sollen die Querwirkungen zwischen den in Kapitel 2 priorisierten Anwendungsfällen (Service) und den dafür erforderlichen technischen Lösungen (Produkt) erörtert werden. Hierfür wird zunächst der wissenschaftstheoretische Ansatz, das PSS Schichtmodell als technologiebasiertes Rahmenkonzept zu nutzen, erklärt (vgl. Kapitel 3.1). Für die Anwendung des Modells ist zunächst eine Definition seiner PSS Infrastruktur – diese umfasst sowohl die Service- als auch die Produktkomponenten – erforderlich (vgl. Kapitel 3.2). Hier wird beschrieben, aus welchen Subservices sich ein vernetzter Ladedienst zusammensetzt und wie sich diese in Relation zueinander verhalten (vgl. Kapitel 3.2.1). Gleichzeitig sind für ein funktionierendes Produktangebot zahlreiche Produktkomponenten (insbesondere das EV mit seiner Kommunikations- und Ladeinfrastruktur) erforderlich (vgl. Kapitel 3.2.2). Erst nach der Synthese der erarbeiteten Einzelkomponenten des Produkt-Service-Systems wird

⁵ IKT steht für Informations- und Kommunikationstechnik. Für den Informationsaustausch in intelligenten dezentralen Energiesystemen spielt sie eine zentrale Rolle.

ersichtlich, in welcher Beziehung die technische Lösung inklusive der eingesetzten Technologie mit der anzubietenden Dienstleistung steht (vgl. Kapitel 3.3).

KAPITEL 4 – POTENZIALE DER MODULAREN MULTILEVEL-BATTERIE (M2B) IM ELEKTROFAHRZEUG: Kapitel 4 diskutiert, ob und inwiefern M2B-Technologie bestehende Hürden für den Markt vernetzter Ladedienste überwinden kann. Hierfür wird zunächst der Stand der Technik im Hinblick auf die HV-Systemarchitektur im EV erörtert (vgl. Kapitel 4.1), wobei Batteriespeichersysteme (vgl. Kapitel 4.1.1), das Ladesystem und HV-Busstrukturen (vgl. Kapitel 4.1.2), Antriebskomponenten (vgl. Kapitel 4.1.3) sowie zugehörige Peripherie (vgl. Kapitel 4.1.4) der Betrachtungsgegenstand sind. Anschließend werden hieraus die bestehenden Technologierestriktionen abgeleitet (vgl. Kapitel 4.2). Der im Rahmen der vorliegenden Arbeit betrachtete Einsatz der modularen Multilevel-Batterie hat einen fundamentalen Einfluss auf die Architektur des Antriebsstranges sowie des Ladesystems im EV, da diese Umrichter und BSS zu einer hochintegrierten Komponente vereint (vgl. Kapitel 4.3). Daher sind zunächst die Mikro- (vgl. Kapitel 4.3.1) sowie die Makrotopologie (vgl. Kapitel 4.3.2) der M2B zu erarbeiten. Die resultierenden Systemeigenschaften (vgl. Kapitel 4.3.3) sind ein erstes Indiz für den technologischen Mehrwert, den der Einsatz des zu diskutierenden Batteriespeicher- und Umrichtersystems stiftet. Gleichzeitig sind die Auswirkungen auf die Systemarchitektur und Eigenschaften des Gesamtfahrzeuges (vgl. Kapitel 4.3.4) in die Betrachtung miteinzubeziehen. Kapitel 4.4 leistet einen Beitrag, das bislang qualitativ hergeleitete Potenzial des Einsatzes der M2B im Elektrofahrzeug zu quantifizieren. Nach der Dimensionierung des zu betrachtenden Systems (vgl. Kapitel 4.4.1) wird dafür ein Simulationsmodell erstellt (vgl. Kapitel 4.4.2), das sowohl das Modulbalancing gesamthaft (vgl. Kapitel 4.4.3), das Ladesystem im Speziellen (vgl. Kapitel 4.4.4), die Einbindung von Antriebskomponenten des Fahrzeugs (vgl. Kapitel 4.4.5) sowie auch die im ‚Automotive-Umfeld‘ erforderliche und übliche DC-Zwischenkreisauskopplung (12 V) berücksichtigt. Basierend auf den erarbeiteten qualitativen sowie quantitativen Forschungsergebnissen beschreibt Kapitel 4.5, inwiefern ein Einsatz der beschriebenen Technologie den im Rahmen der Kapitel 2 und 3 hergeleiteten Anforderungen genügt. Das Kapitel schließt mit einer Diskussion (vgl. Kapitel 4.6).

KAPITEL 5 – DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNGEN: Kapitel 5 diskutiert die erarbeiteten Ergebnisse im Hinblick auf ihre Relevanz für Forschung und Praxis. Hierfür werden diese zusammen mit ihren Limitationen und den angewendeten Methoden kritisch gewürdigt und in Relation zu bisherigen wissenschaftlichen Beiträgen gesetzt. Basierend auf den Erkenntnissen der Eigenleistungskapitel 2, 3 und 4 ist es nun möglich, eine strategische Handlungsempfehlung für den OEM zur Angebotsgestaltung vernetzter Ladedienste auszusprechen. Ferner wird ein Ausblick auf weiteren Forschungsbedarf gegeben.

KAPITEL 6 – RESÜMEE: Der Beitrag der vorliegenden Arbeit ist der wissenschaftliche Erkenntnisgewinn im Hinblick auf die Angebotsgestaltung vernetzter Ladedienste und die strategische Positionierung des OEMs. Mit der Adaption bestehender Multilevel-Umrichtertechnologien für die Automotive-Anwendung eröffnet sie ein neues Vorgehen für eine anforderungsgerechte technische Fahrzeugbefähigung. Kapitel 6 schließt die Arbeit mit einem Rückblick auf die erarbeiteten Lösungsvorschläge zur Beantwortung der insgesamt vier forschungsleitenden Fragestellungen.

2. Beitrag vernetzter Ladedienste zur Dezentralisierung des deutschen Energieversorgungssystems

2.1 Einleitung

Wie in Kapitel 1.2.1 beschrieben, besteht die wissenschaftliche Zielsetzung des Forschungsvorhabens zunächst darin, vernetzte Ladedienste zu identifizieren, die durch Nutzung des Lastverschiebungspotenzials von Elektrofahrzeugflotten einen wirtschaftlichen und technischen Beitrag zur Dezentralisierung des deutschen Energieversorgungssystems leisten. Innerhalb des Ökosystems vernetzter Ladedienste gibt es große Unsicherheitsfaktoren. Beispiele hierfür, wie etwa das vorherrschende heterogene Produktangebot, das dynamische Marktumfeld und eine fehlende breite Kundenakzeptanz, wurden in Kapitel 1 im Detail erläutert. Gleichzeitig zeichnet sich der Untersuchungsgegenstand aufgrund seiner Komplexität durch eine gewisse Unschärfe aus. Die unzureichende Existenz relevanter wissenschaftlicher Erkenntnisse und Dokumentationen verlangt Flexibilität und Offenheit bei der Auswahl der Forschungsmethode.

Mit Hilfe einer strukturierten Theoriebildung soll der folgende Abschnitt zunächst zu einer systematischen Eingrenzung des weiteren Forschungsgegenstandes beitragen. Die hieraus abgeleiteten Hypothesen sind zu überprüfen und dienen als Grundlage für die darauf folgende weitere Forschungsarbeit.

2.2 Forschungsdesign und Methoden

Zur Beantwortung von Forschungsfrage 1 wird im ersten Schritt die Exploration als Forschungsmethode herangezogen, die auch als erkundende Forschung bezeichnet wird. Die Exploration bildet eine von drei Untersuchungsmethoden der empirischen Forschung⁶, die sich besonders für die Bildung wissenschaftlicher und technologischer Theorien in der angewandten Forschung eignet. Sie sammelt Informationen über einen gering erforschten Untersuchungsgegenstand mit starkem Praxisbezug und lässt dabei dem Untersuchenden relativ große Freiräume (Bortz & Döring, 2006). Eine Prüfung der gebildeten Hypothesen findet innerhalb der explorativen Forschung nicht statt (Ulrich, 1981).

Die Explorationsphase stellt einen unverzichtbaren Teil des wissenschaftlichen Erkenntnisprozesses dar, ohne den das Aufstellen und Prüfen von Hypothesen nicht möglich ist. In der Regel ist sie im Arbeitsprozess einer explanativen Untersuchung vorgeschaltet (Bortz & Döring, 2006). Im vorliegenden Fall ist das theoretische Vorverständnis des Forschungsgegenstandes noch nicht ausreichend elaboriert und fokussiert. Durch systematisches Sammeln von Informationen wird zunächst eine Wissensbasis geschaffen, um entsprechende wissenschaftliche und technologische Theorien sowie Hypothesen bilden zu können (Töpfer, 2010). Folgende vier Vorgehensweisen sind zu unterscheiden:

⁶ Die empirische Forschung lässt sich prinzipiell in drei Untersuchungstypen unterteilen: explorative (Bildung von Theorien und Hypothesen), explanative (Prüfung von Theorien und Hypothesen) und deskriptive Forschung (beschreibende Forschung) (Bortz & Döring, 2006).

- **THEORIEBASIERTE EXPLORATION:** Neue Theorien und Hypothesen knüpfen in der Regel an bereits in der Fachliteratur vorhandene Konzepte und Modelle an. Die theoriebasierte Exploration leitet im Zuge einer systematischen Durchsicht, Analyse und Synthese vorhandener wissenschaftlicher Theorien neue Erkenntnismodelle ab (vgl. Kapitel 2.2.1). (Bortz & Döring, 2006)
- **METHODENBASIERTE EXPLORATION:** Das übliche Vorgehen in der empirischen Wissenschaft ist die Überprüfung inhaltlicher Hypothesen mit einer angemessenen Methode. Weniger geläufig hingegen ist das Reflektieren methodischer Vorgehensweisen zur Exploration neuer Hypothesen. Die methodenbasierte Exploration versucht, den Zusammenhang von verwendeter Methode und erzieltm Erkenntnisgewinn durch Vergleich und Variation existierender Methoden im Anwendungskontext transparent zu machen. (Bortz & Döring, 2006)
- **EMPIRISCH-QUANTITATIVE EXPLORATION:** Empirisch-quantitative Explorationsstrategien nutzen quantitative Daten unterschiedlicher Herkunft, um aus ihnen neue Ideen und Hypothesen abzuleiten. Sie tragen durch eine besondere Darstellung und Aufbereitung dazu bei, bislang unberücksichtigte bzw. unentdeckte Muster und Zusammenhänge in Messwerten sichtbar zu machen. (Bortz & Döring, 2006)
- **EMPIRISCH-QUALITATIVE EXPLORATION:** Empirisch-qualitative Explorationsstrategien nutzen qualitative Daten, um daraus Hypothesen und Theorien zu gewinnen. Dies geschieht insbesondere durch Identifikation, Darstellung und Erläuterung von Zusammenhängen und Handlungsanforderungen. Dabei erhöhen sie aufgrund ihrer offenen Form die Wahrscheinlichkeit auf neue Aspekte eines Themas zu stoßen und sind somit bestens dafür geeignet, unzureichend erforschte Untersuchungsgegenstände zu beleuchten. Auf Grundlage des erhobenen Datenmaterials wird ein Beitrag zum Verständnis von Sachverhalten und Zusammenhängen erarbeitet (vgl. Kapitel 2.2.2). (Bortz & Döring, 2006)

Bislang existiert kein abgestimmtes Vorgehensmodell für eine erfolgreiche Angebotsgestaltung vernetzter Ladedienste – weder in der Wissenschaft, noch in der Praxis. Aus diesem Grund erscheint ein theoriebildender Ansatz zur Beantwortung der Forschungsfrage als der richtige. Auch wenn ein Forschungsvorhaben mit explorativem Charakter nicht zwingend an dedizierte Methoden gebunden sein muss (Myers, 1997), werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit im Schwerpunkt eine theoriebasierte sowie eine empirisch-qualitative Exploration angewendet (vgl. Abbildung 2-1). Sie hat zum Ziel, einen systemischen Ansatz zur Gestaltung vernetzter Ladedienste zu finden, der zunächst alle beteiligten Stakeholder identifiziert und sie dann in den Produktentstehungsprozess miteinbezieht. Dies geschieht durch zielorientierte Analyse des Stands der Technik und der relevanten wissenschaftlichen Literatur. Zusätzlich wird ein qualitativer Datensatz erhoben, der auf die Erarbeitung des oben genannten Vorgehensmodells abzielt.

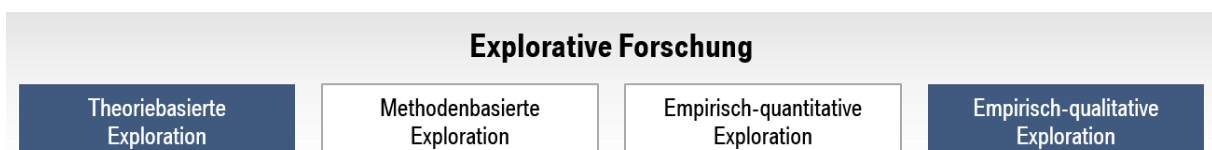


Abbildung 2-1: Mögliche Vorgehensweisen explorativer Forschung (eigene Darstellung in Anlehnung an Bortz & Döring (2006))

In einem zweiten Schritt ist das erarbeitete Vorgehensmodell zu validieren. Da dieses im Ergebnis weniger ein allgemeingültiges Modell als eine Prognose für ein erfolgreiches Vorgehen zur Angebotsgestaltung vernetzter Ladedienste ist, wird hierfür die Delphi-Befragung als Verfahren gewählt. Dabei handelt es sich um einen vergleichsweise stark strukturierten Gruppenkommunikationsprozess, in dessen Verlauf Sachverhalte, über die naturgemäß unsicheres und unvollständiges Wissen existiert, von Experten beurteilt werden (Häder & Häder, 1995) (vgl. Kapitel 2.2.3).

2.2.1 Theoriebasierte Exploration

Um eine systematische Durchsicht, Analyse und Synthese vorhandener wissenschaftlicher Theorien zu ermöglichen, ist zunächst eine Auswahl geeigneter Theoriequellen erforderlich. Die zunehmende Anzahl wissenschaftlicher Publikationen – nicht zuletzt auch im Bereich Elektromobilität – führt zu gesteigerten Anforderungen an die Recherche- und Beschaffungsstrategien sowie eine sachgerechte Auswahl und Reduktion des zu betrachtenden Stoffes (Bortz & Döring, 2006). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden bevorzugt Theorien herangezogen, die in wissenschaftlichen Fachzeitschriften (Journals) veröffentlicht wurden. Da sie das wichtigste Medium zur Veröffentlichung von neuen Methoden und Ergebnissen aus Forschung und Wissenschaft sind, ist dies ein geeignetes Qualitätskriterium bei der Auswahl der zu berücksichtigenden Literatur. Es sind nun Bewertungskriterien zu definieren, die einen Vergleich der wissenschaftlichen Beiträge ermöglichen und diese in ein gegenseitiges Verhältnis setzen. Der gewünschte Erkenntnisgewinn resultiert aus einer ausreichend formalisierten Theorieanalyse, die oft auf Basis grafischer und tabellarischer Auswertungsmethoden erstellt wird (Bortz & Döring, 2006).

Im vorliegenden Fall wird zunächst der Stand der Technik analysiert und bewertet. Er lässt erste Rückschlüsse auf das Ökosystem zu, in dem sich vernetzte Ladedienste derzeit befinden und offenbart Handlungsbedarfe und Technologierestriktionen. Es ist zu beschreiben, welche Standards sich in der unternehmerischen Praxis zunehmend etablieren, welche Akzente der bisherige wissenschaftliche Diskurs gesetzt hat und welche Rückschlüsse sich daraus ziehen lassen. Im Besonderen werden hierfür mögliche Auswirkungen einer signifikanten Verbreitung der Elektromobilität auf das Energieversorgungssystem näher betrachtet. Ebenso erfolgt eine Gegenüberstellung, welche vernetzten Ladedienste in der wissenschaftlichen Literatur bereits Berücksichtigung gefunden haben.

2.2.2 Empirisch-qualitative Exploration

Die empirisch-qualitative Exploration trägt durch besondere Darstellung und Aufbereitung von qualitativen Daten dazu bei, bislang vernachlässigte Wirkungszusammenhänge erkennbar zu machen, und wird im Rahmen des Forschungsvorhabens ergänzend zur theoriebasierten Exploration eingesetzt. Aufgrund ihrer offenen Form erhöhen qualitative Datenerhebungen die Wahrscheinlichkeit, auf neue Aspekte eines Themas zu stoßen (Bortz & Döring, 2006). Hierfür können verschiedene Datenquellen herangezogen werden. Möglich sind etwa die Nutzung bereits vorhandener Daten oder die Datenbeschaffung durch Dritte. Im vorliegenden Fall aber wurde auf eine eigene Datenerhebung in Form von semistrukturierten, problemzentrierten Interviews (mündliche Einzelbefragung) zurückgegriffen. Dabei wird mit offenen Fragen gearbeitet, die den Befragten viel Spielraum beim Beantworten lassen und die Interaktion zwischen Befragtem und Interviewers sowie die Eindrücke und Deutungen des Interviewers als Informationsquelle berücksichtigen (Bortz & Döring, 2006).

Bei der inhaltlichen Gestaltung des Gesprächsleitfadens, dem das spätere semistrukturierte, problemzentrierte Interview folgt, hat der Interviewer (Forscher) bestimmte Freiheitsgrade. Er kann je nach Situation und Klärungsbedarf Fragen oder Themen frei formulieren, ergänzen, weglassen oder in der Diskussion hervorheben (Mayring, 2002). Sowohl die inhaltliche Abfolge als auch der zeitliche Rahmen der gestellten Fragen liegen im Ermessen des Interviewers (Diekmann, 2007).

Die Zusammensetzung des Expertenkollektivs und der Gesprächsleitfaden im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden in Kapitel 2.4 näher beschrieben. Alle Interviews wurden telefonisch geführt und mit Hilfe eines Diktiergerätes aufgezeichnet. Dies resultierte in insgesamt 14 Stunden Primärdatenmaterial (Tonaufzeichnungen), das für die weitere Analyse wörtlich transkribiert wurde. Zur Auswertung wurde die qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring (1993) herangezogen, die sich insbesondere dafür eignet, umfangreiches Textmaterial intersubjektiv nachvollziehbar durchzuarbeiten. Sie zielt auf ein elaboriertes Kategoriensystem ab, das die Basis einer zusammenfassenden Deutung des Materials bildet. Das Auswertungskonzept von Mayring umfasst drei Schritte (Mayring, 1993):

- **ZUSAMMENFASSENDE INHALTSANALYSE:** Der Ausgangstext wird mittels Paraphrasierung, Generalisierung und Reduktion auf eine zusammenfassende Kurzversion kondensiert.
- **EXPLIZIERENDE INHALTSANALYSE:** Sofern Bestandteile des erhobenen Datenmaterials unklar oder uneindeutig sind, werden zusätzliche Informationsquellen herangezogen, um diese verständlich zu machen. Dies können zum Beispiel weitere Interviewpassagen sein. Oft werden hierzu auch Informationen über den Befragten herangezogen.
- **STRUKTURIERENDE INHALTSANALYSE:** Das Datenmaterial wird anhand theoretischer Fragestellungen geordnet und gegliedert. Hierzu wird ein Kategorienschema definiert und im Verlauf der Auswertung weiter verfeinert. Die Strukturierung kann inhaltlich (Herausarbeiten bestimmter Themen und Inhalte), typisierend (Identifikation von häufig besetzten Merkmalsausprägungen) oder skalierend (Merkmalsausprägungen werden auf Ordinalniveau eingeschätzt) erfolgen.

Da aufgrund der sehr fokussierten Durchführung der Gespräche, die insbesondere aufgrund des hohen Fachwissens des Expertenkollektivs möglich war, keine zusammenfassende Inhaltsanalyse erforderlich war, konzentrierte sich die Auswertung auf eine vereinzelt Explikation sowie eine ausführliche Strukturierung. Die qualitative Datenanalyse und insbesondere die Kodierung⁷ des Datenmaterials erfolgte computergestützt mit Hilfe der Software MaxQDA (Verbi GmbH, Berlin, Deutschland).

2.2.3 Validierung der Untersuchungsergebnisse

Sogenannte Delphi-Studien fanden bislang vor allem im Bereich der Vorhersage von Entwicklungen in Wissenschaft und Technologie Beachtung (Häder M., 2009). Aufbauend auf den Ergebnissen der vorangegangenen explorativen Analyse wird sie auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit zur Validierung des erarbeiteten Vorgehensmodells verwendet. Cuhls et al. beschreiben die Delphi-Untersuchung als das bestmögliche heute verfügbare Instrumentarium zur übergreifenden, langfristigen Technikvorschau (Cuhls, Breiner, & Grupp, 1995). Sie ist ein vergleichsweise stark strukturierter Gruppenkommunikationsprozess, in dessen Verlauf Sachverhalte, über die naturgemäß unsicheres und unvollständiges

⁷ Unter Kodierung versteht man die Zuordnung von Textteilen zu Kategorien. Die Qualität der Kodierung hängt wesentlich von einer zielführenden Definition der Kategorien ab. (Bortz & Döring, 2006)

Wissen existiert, von Experten beurteilt werden (Häder & Häder, 1995). Diese Definition verweist gleichzeitig auf zwei Grundeigenschaften der Delphi-Analyse. Zum einen zielt sie auf eine Synthese mit Hilfe der Gruppenkommunikation ab, zum anderen möchte sie unsicheres Wissen strukturieren.

Das methodische Profil einer Delphi-Befragung hängt stark vom Ziel der jeweiligen Studie ab. Es wird zwischen Delphi-Befragungen zur Ideenaggregation (Typ 1), zur Vorhersage bestimmter diffuser Sachverhalte (Typ 2), zur Ermittlung und Qualifikation von Expertenmeinungen über einen speziellen Gegenstand (Typ 3) sowie zur Konsensfindung (Typ 4) unterschieden (Häder & Häder, 1995). Im vorliegenden Fall ist die aktuelle Zukunfts- oder Problemsicht von kompetenten Experten zu erfassen und weiter zu qualifizieren, um daraus entsprechende Schlussfolgerungen für Handlungsstrategien zu ziehen. Dies entspricht dem Befragungstyp 3. Im Unterschied zu rein qualitativen Delphi-Studien werden hier die verschiedenen Expertenmeinungen auch einer quantifizierenden Bewertung unterzogen. Das bedeutet, dass ihre Mehrheitsfähigkeit dargestellt und geprüft wird.

Es existieren zahlreiche Vorgehensweisen für Delphi-Befragungen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird sie aber in ihrer klassischen Form eingesetzt. Hierfür muss zunächst die allgemeine Frage- bzw. Problemstellung mit dem Ziel operationalisiert werden, konkrete Kriterien abzuleiten, die den Experten im Rahmen einer quantifizierenden Befragung für eine Beurteilung vorgelegt werden können. Dieser erste Schritt kann durch den Forschenden oder das Forscherteam erfolgen, das die Delphi-Befragung durchführt. Dieses wird oft als Monitoring-Team bezeichnet. Im vorliegenden Fall wird hierfür aber eine qualitative Befragung von externen Experten bevorzugt (vgl. Datenerhebung im Rahmen der empirisch-qualitativen Exploration). Nun wird auf dieser Datenbasis ein standardisiertes Frageprogramm ausgearbeitet, das dazu dient, Experten anonym nach ihren Meinungen zu den interessierenden Sachverhalten zu befragen. Nachdem die Befragungsergebnisse aufbereitet wurden, erfolgt eine Rückmeldung der bis dahin vorliegenden Ergebnisse an das Expertenkollektiv. Durch diese Rückinformation sollen die Befragten (neue) Erkenntnisse gewinnen. Die Befragung wird nun so oft wiederholt, bis ein festgelegtes Abbruchkriterium erreicht ist (Häder M. , 2009).

Zusammenfassend sind die Verwendung eines formalisierten Fragebogens, die Befragung von Experten, die Anonymität der Einzelantworten sowie die Ermittlung einer statistischen Gruppenantwort charakteristisch für das klassische Design von Delphi-Befragungen. Auf eine Information der Teilnehmer über die statistische Gruppenantwort (Feedback) im Rahmen einer zweiten Iterationsschleife wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit verzichtet. Die Ergebnisqualität erforderte keine erneute Befragung.

Der Erkenntnisgewinn der Delphi-Analyse gegenüber der einmaligen Expertenbefragung im Rahmen der empirisch-qualitativen Exploration beruht auf der gezielten Auslösung kognitiver Prozesse bei den Befragten und der damit verbundenen Verbesserung der Expertenurteile. Ein gewisser Nachteil ergibt sich hingegen aus dem höheren Zeitbedarf, der für die Durchführung der Befragungsrunden erforderlich ist. Dieser wird jedoch durch die gute methodische Absicherung des Verfahrens aufgewogen. Während bei Expertenbefragungen die Meinungen lediglich ermittelt werden können, werden diese im Rahmen einer Delphi-Analyse auch qualifiziert. Erst so ist der angestrebte Konsens erreichbar.

Auch hier sei angemerkt, dass die Inhalte der Delphi-Befragung in Kapitel 2.4 näher beschrieben werden. Dort werden neben dem Fragebogendesign auch die aus den Rückmeldungen zu ermittelnden Kenngrößen erarbeitet.

2.3 Stand der Technik

Im Folgenden werden zunächst die technischen Rahmenbedingungen für die Integration der Elektromobilität in das bestehende Energie- und IKT-System beschrieben. Hierfür ist zu detaillieren, inwiefern sich die Energieversorgungssysteme den neuen Anforderungen bereits angepasst haben und in welche Referenzarchitektur eines intelligenten dezentralen Energieversorgungssystems ein künftiges Angebot vernetzter Ladedienste einzubetten ist. In einem zweiten Schritt wird diskutiert, ob bei zunehmender Verbreitung von Elektrofahrzeugen mit beschränkenden Faktoren innerhalb des Energiesystems (z.B. Netzzrückwirkungen) zu rechnen ist und ob diese einen Einfluss auf oben genannte Angebotsgestaltung haben. Eine vergleichende Betrachtung wissenschaftlicher Beiträge und ihrer methodischen Herangehensweisen bilden die Basis hierfür. Abschließend erfolgt eine weiterführende Literaturanalyse, die bestehende Beiträge über vernetzte Ladedienste identifiziert und ihre Ergebnisse diskutiert.

2.3.1 Integration von Elektromobilität in Energie- und IKT-System

Energieversorgungssysteme waren in der Vergangenheit von zentralen Erzeugungs- und Netzsteuerungsstrukturen geprägt. Eine Kommunikationsinfrastruktur war nur für zentrale Erzeugungsanlagen sowie für Übertragungs- und Verteilnetze bis hin zu den Trafostationen im Mittelspannungsbereich etabliert. Marktpartner waren vorrangig im Rahmen regulierter Prozesse und über den Großhandelsmarkt verbunden. Vor dem Ausbau dezentraler und erneuerbarer Energieerzeugungsanlagen bestand kaum Regelungsbedarf im Niederspannungsbereich. Dies führte dazu, dass es einen nur geringen Bedarf an fernauslesbaren digitalen Messeinrichtungen und fernsteuerbaren Stelleinrichtungen gab. Die Einbeziehung von elektrischen Lasten in die Betriebsführung des Energiesystems war nicht nötig. Außerdem sind dezentrale Energieerzeugungsanlagen insbesondere für Wind- und Solarenergie noch heute kaum in Marktmechanismen eingebunden. Insoweit bestand bisher eine nur rudimentäre Vernetzung von Elementen des Energieversorgungssystems mit Elementen der Kommunikations- und Automatisierungstechnik. Dies wandelt sich zunehmend mit dem Paradigmenwechsel von zentralen Erzeugungsstrukturen zu verteilten Erzeugungs-, Verbrauchs- und Speicherstrukturen (vgl. Abbildung 2-2) (Benze, Hübner, & Kießling, 2011).



Abbildung 2-2: Paradigmenwechsel im Energieversorgungssystem: Insbesondere die Strukturen in den unteren Spannungsebenen wandeln sich zu aktiven, kleinteiligen Systemen (3M, 2018)

Die bislang vorrangig passiven Energieversorgungsstrukturen in den unteren Spannungsebenen wandeln sich mit der zunehmenden Anzahl dezentraler Energiequellen zu aktiven Strukturen, die zu regeln sind. Das bisher passive Energieversorgungssystem ist mit einem Energieinformationssystem zu verbinden, sodass ein intelligentes dezentrales Energieversorgungssystem entsteht.

Die klassische Architektur, die sich in Energieerzeugung, Energietransport, Energieverteilung und den letztlichsten Energieverbrauch untergliedert, wird sich aufgrund der dezentralen Erzeugungsanlagen und Speicher zunehmend in eine Peer-to-Peer Architektur wandeln. Dies bedeutet nicht, dass bestehende Strukturen abgelöst werden. Sie werden vielmehr durch neue Systembestandteile ergänzt.

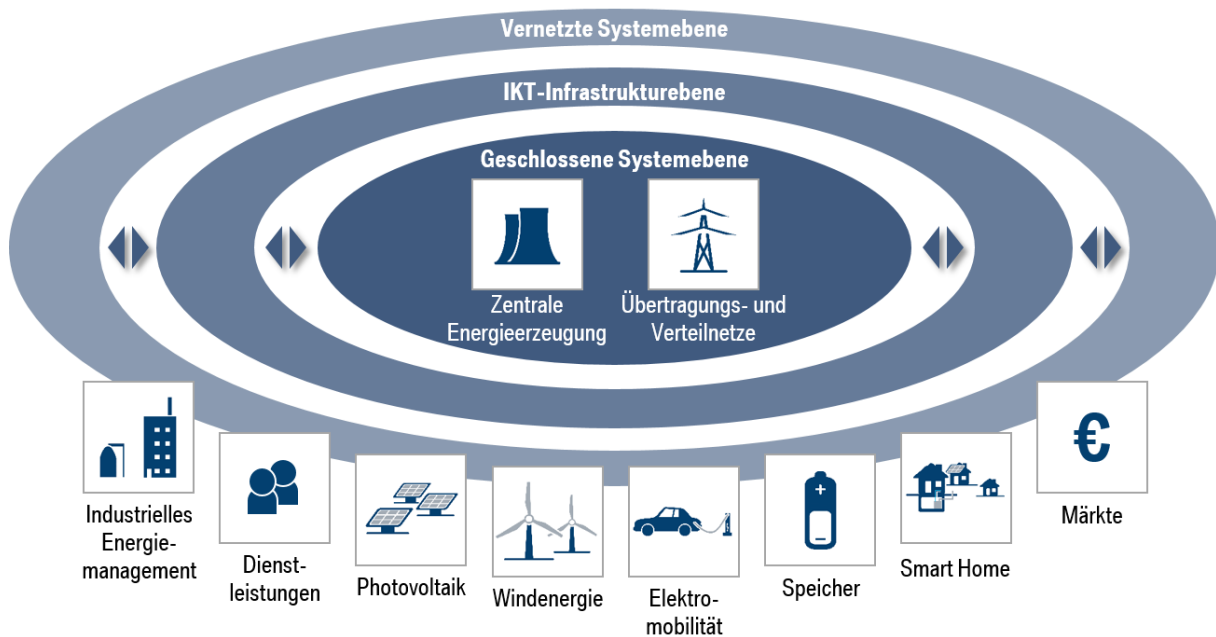


Abbildung 2-3: Abstraktes Modell einer IKT-basierten Architektur künftiger Energieversorgungsstrukturen inklusive exemplarischer Anwendungsbereiche und Funktionalitäten innerhalb ihrer Ebenen (eigene Darstellung in Anlehnung an Appelrath, Kagermann, & Mayer (2012))

Abbildung 2-3 visualisiert den Übergang von zentralen Energieversorgungsstrukturen hin zu dezentralen und vernetzten Systemen mit Hilfe eines vereinfachten Schalenmodells. Diesem liegt die Annahme zugrunde, dass für den Aufbau künftiger Energieversorgungssysteme der Austausch von Informationen ein elementarer Bestandteil ist. Die dargestellten Systemebenen unterscheiden sich im Hinblick auf ihre Architektur, IKT-Anwendungen, Zugänglichkeit, Intensität des Informationsaustausches sowie weitere Merkmale und können wie folgt charakterisiert werden (Appelrath, Kagermann, & Mayer, 2012):

- **GESCHLOSSENE SYSTEMEBENE:** Die geschlossene Systemebene besteht vorrangig aus systemkritischen Elementen, die voraussichtlich dauerhaft in Verantwortung des Netzbetreibers oder eines äquivalenten Akteurs bleiben. Hierfür sprechen hohe Anforderungen an die Servicequalität. Zugriff und Steuerung durch externe Akteure sind limitiert und nur unter definierten Voraussetzungen legitim. Dennoch kann die geschlossene Systemebene im Betrieb auch von Informationen anderer Systemebenen profitieren (z.B. prognostizierte Erzeugungsmengen erneuerbarer Energieanlagen).
- **IKT-INFRASTRUKTUREBENE:** Diese Infrastrukturebene stellt das Bindeglied zwischen geschlossener und offener Systemebene dar. Um eine Kommunikation zwischen diesen beiden

Ebenen zu etablieren, sind Komponenten mit dedizierter Schnittstellenfunktion erforderlich. Diese (insb. Kommunikationsnetze) werden in der IKT-Infrastrukturebene angesiedelt.

- **VERNETZTE SYSTEMEBENE:** Die vernetzte Systemebene zeichnet sich durch einen hohen Vernetzungsgrad einer großen Anzahl heterogener Komponenten aus. Heterogen sind diese sowohl im Hinblick auf ihre Größe, ihre Kommunikations-, Sicherheits- und Echtzeitanforderungen, als auch hinsichtlich der von ihnen bereitgestellten Informationsqualität. Mit ihrem fortschreitenden Ausbau wird diese Ebene zusammen mit ihren Bestandteilen zunehmend systemkritisch.

Evolutionär wird sich ein netzwerkartiges System entwickeln, dessen Elemente sich insbesondere auf der vernetzten Systemebene zu Knoten (sog. Netznutzer im elektrischen Netz) aggregieren. Diese können sich aus Energieerzeugungsanlagen, Energieverbrauchern, Speichersystemen oder einer Kombination dieser zusammensetzen. Mehrere Knoten wiederum stehen in gegenseitiger Beziehung für einen Informations- und Energieaustausch.

In ihrer Summe bezeichnet man alle physischen Komponenten eines intelligenten dezentralen Energieversorgungssystems als Smart Grid – diese umfassen das passive Energieversorgungssystem sowie sein zugehöriges Energieinformationssystem. Erst über eine adäquate IKT-Plattform, die zumeist IP-basierte Vermittlungstechnologien nutzt, können virtuelle Energiedienste („Energy Services“) angeboten werden. Sie vermitteln Energie aus Erzeugungs-, Nutzungs- und Speicheranlagen über definierte Marktinstrumente und können in der Verantwortlichkeit verschiedener Marktakteure liegen. Konkret ist zwischen zwei verschiedenen Arten von Diensten zu unterscheiden: Marktdienste für einen liberalisierten Energiemarkt und Netzdienste für eine intelligente Energienetzführung (vgl. Abbildung 2-4).

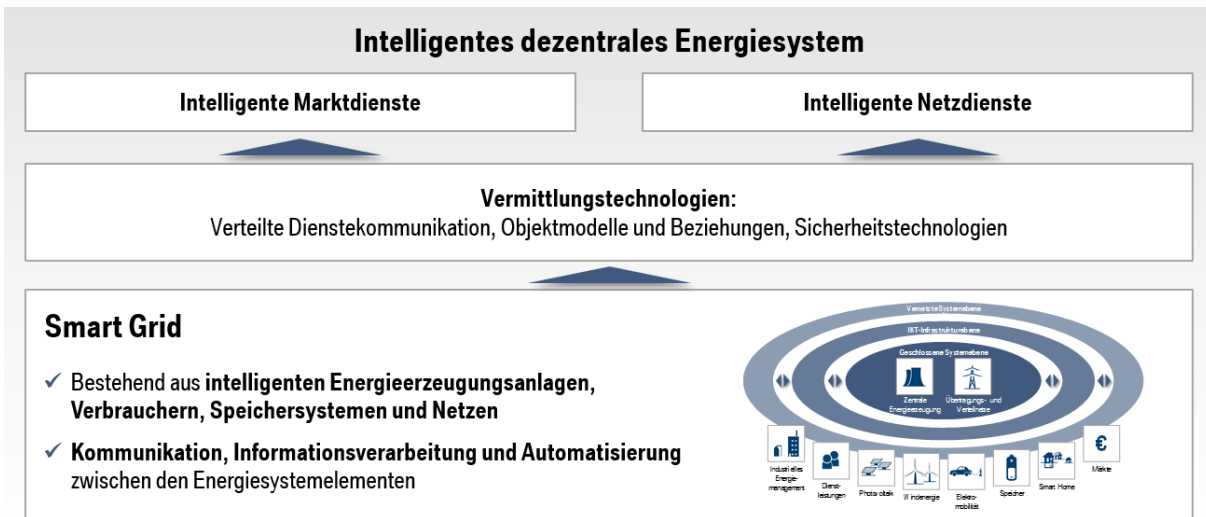


Abbildung 2-4: Intelligente dezentrale Energiesysteme ermöglichen durch Aggregation physischer Systemkomponenten und Vermittlungstechnologien ein Angebot intelligenter Markt- und Netzdienste (eigene Darstellung in Anlehnung an Appelrath, Kagermann, & Mayer (2012))

Weiterhin ist zu klären, inwiefern Elektrofahrzeuge sich in dieses System integrieren. Sie sind zunächst ein weitestgehend ungesteuerter Verbraucher innerhalb des Energiesystems, dessen Schnittstelle zur Ladeinfrastruktur verschiedene Gestalt annehmen kann. Abbildung 2-5 stellt eine aktuelle Übersicht von Ladestandards sowie marktüblicher Steckertypen zur Verfügung und zeigt, dass die technische Befähigung der im Feld befindlichen Fahrzeugflotte sehr heterogen ist. Neben unterschiedlichen Spannungstypen (AC- und DC-Laden) variieren auch die zur Verfügung stehenden Ladeleistungen deutlich.

Die Ladekommunikation erfolgt mit Ausnahme des CHAdeMO Standards in der Regel über zwei dedizierte pulsweitenmodulierte Signalkontakte – den Pilotkontakt CP (Control Pilot) und den Proximitykontakt PP (Proximity Pilot). Deren Funktion ist in IEC 61851⁸ spezifiziert. Ein weiterer vielversprechender Kommunikationsstandard, der auf Powerline-Kommunikation (PLC) basiert, befindet sich derzeit in Erarbeitung. Der internationale Standard ISO 15118 beschreibt ein Vehicle-to-grid Kommunikationsinterface, das künftig auch bidirektionales Laden und Entladen von EVs ermöglicht und zunehmend Verbreitung findet (ISO/IEC, 2017).





AC	Typ 1		Beim Typ 1-Stecker (IEC 62196 Typ1) handelt es sich um einen einphasigen Stecker, der vor allem bei asiatischen Automodellen verwendet wird. Er ist in Europa eher unüblich, weshalb es kaum Ladesäulen mit fest angebrachtem Typ 1-Ladekabel gibt.	Übliche Ladeleistungen: bis zu 7,4 kW (230 V, 32 A)
AC	Typ 2		Dieser dreiphasige Stecker (IEC 62196 Typ2) ist im europäischen Raum am weitesten verbreitet und ist als (EU-)Standard etabliert. Die meisten öffentlichen Ladestationen sind mit einer Typ 2-Steckdose ausgestattet. Daran kann jedes sogenannte Mode 3-Ladekabel angeschlossen werden. So können sowohl Elektrofahrzeuge mit Typ 1 als auch mit Typ 2-Stecker geladen werden.	Übliche Ladeleistungen: 22 kW (400 V, 32 A, privat); 43 kW (400 V, 63 A, öffentlich)
AC/DC	DC Combo		Das Combined Charging System (CCS) ergänzt mit seinem Stecker den Typ 2-Stecker um zwei zusätzliche Leistungskontakte. So ist auch eine Schnellladefunktion realisierbar. Es werden AC- und DC-Laden mit Ladeleistungen bis zu 350 kW unterstützt. In der hier dargestellten Variante sind die erforderlichen Pins für AC-Laden jedoch nicht bestückt. Sie sind optional.	Übliche Ladeleistungen: 50 kW
DC	CHAdeMO		Dieses Schnelladesystem wurde in Japan entwickelt und erlaubt Ladeleistungen von bis zu 150 kW. Es ist kompatibel mit Akkuspannungsniveaus von 300 – 500 V und Ladeströmen bis 350 A. Der CHAdeMO-Standard ist bereits heute für bidirektionales Laden spezifiziert.	Übliche Ladeleistungen: 50 kW
DC	Tesla Supercharger		Tesla verwendet als einziger Elektrofahrzeughersteller eine für seine sogenannten Supercharger modifizierte Version des Typ 2-Steckers für Ladeleistungen bis 135 kW. Tesla-Fahrzeuge benötigen daher sowohl für AC- als auch für DC-Ladungen nur eine Typ 2-Buchse. Eine Trennung des AC- und DC-Weges findet über elektronische Umschaltung im Fahrzeug statt.	Übliche Ladeleistungen: 120 kW

Abbildung 2-5: Marktübliche Ladestandards und Steckertypen für Elektrofahrzeuge (eigene Darstellung)

Schon heute ist eine äußere Einflussnahme auf das Ladeverhalten von Elektrofahrzeugen über die Ladeinfrastruktur möglich. Insbesondere die Steuerung der Ladeleistung mittels Vorgaben durch die Ladeinfrastruktur entspricht dem Stand der Technik (unidirektionale Ladekommunikation). Die genannten Standardisierungsbestrebungen haben zum Ziel, eine bidirektionale Ladekommunikation zu etablieren und das EV für das Rückspeisen in das Energienetz vorzubereiten. Auf welche Art und Weise künftige

⁸ Die International Electrotechnical Commission (IEC) ist eine internationale Normungsorganisation im Bereich der Elektrotechnik und Elektronik. Die Norm IEC 61851 beschreibt konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge. (IEC, 2017)

Fahrzeugflotten aggregiert und gesteuert werden können, ist hingegen noch offen. Eine markteinheitliche Lösung zeichnet sich bislang nicht ab.

Elektrofahrzeuge sind künftig gezielt in die vernetzte Systemebene des Energieversorgungssystems zu integrieren. Erst durch bidirektionalen Informations- und Energieaustausch zwischen dem EV und seiner Umwelt kann sein Lastverschiebungspotenzial optimal genutzt und monetarisiert werden. Auch wenn schon heute bei Bedarf Einfluss auf das Ladeverhalten einzelner EVs genommen werden kann, entwickeln sich die zugehörigen Mechanismen für den Informations- und Energieaustausch mit ihrer Umwelt kontinuierlich weiter.

2.3.2 Gegenüberstellung bestehender Modellierungsansätze

Im Folgenden soll untersucht werden, ob ein zwingender Bedarf an intelligenten Netzdiensten (vgl. Abbildung 2-4) besteht. Sollte bei zunehmender Verbreitung von Elektrofahrzeugen mit nennenswerten Netzzurückwirkungen zu rechnen sein, hat dies einen bedeutenden Einfluss auf die Angebotsgestaltung vernetzter Ladedienste. Erst wenn eine ausreichende Versorgungssicherheit gewährleistet werden kann, können zusätzlich auch Marktdienste in Betracht gezogen werden. Für eine entsprechende Prognose werden zunächst problemorientierte Forschungsansätze analysiert und gegenübergestellt.

Der überwiegende Anteil bestehender wissenschaftlicher Literatur, der sich mit EVs und deren Auswirkungen auf das elektrische Energieversorgungssystem beschäftigt, basiert auf Modellen und Simulationen. Grund hierfür ist bislang das Fehlen untersuchungsrelevanter sowie ausreichend großer EV-Flotten und Netzabschnitte im Feld. Auch wenn vereinzelte Studien einen Fähigkeitsnachweis von EVs für Vehicle-to-Grid (V2G) Konzepte erbringen (Brooks, 2002) (Kempton, et al., 2008) und auf Basis von Stichproben die Netzzurückwirkungen diversifizierter Fahrzeugflotten analysieren konnten (Mummel, Kurrat, & Karges, 2013), existieren bislang keine empirischen Untersuchungen größeren Umfangs auf Gesamtsystemebene (Richardson, 2013).

Die in wissenschaftlichen Beiträgen entwickelten und angewandten Modelle sind in zwei Kategorien zu unterteilen: Langfristige Netzplanungsmodelle sowie feingranulare Zeitreihenmodelle. Erstere skalieren regional oder national über einen Zeitraum von mehreren Jahren. Im Allgemeinen optimieren diese unter Berücksichtigung relevanter Netzkenngrößen sowie eines Sets an Nebenbedingungen – dieses beinhaltet auch verschiedene EV Integrationsszenarien – den Mix an zu integrierenden Energieerzeugungsanlagen (Heinrichs, 2014) (Miess & Schmelzer, 2014). Zeitreihenbasierte Modelle verwenden hingegen historische Daten von Energiebedarf und Energieerzeugung sowie bestehende Erkenntnisse zum Mobilitätsverhalten der Fahrzeugnutzer, um mögliche EV Marktdurchdringungsszenarien sowie die Bereitstellung des zugehörigen Leistungs- und Energiebedarfes zu untersuchen. Hierfür werden in der Regel Zeiträume von einer Woche bis hin zu einem Jahr berücksichtigt (Schill & Gerbaulet, 2015) (Hartmann & Özdemir, 2011).

Ebenso existieren Untersuchungen zu den Auswirkungen von EVs auf das elektrische Energieversorgungssystem, die nicht auf Modelle zurückgreifen. Ein Review sozio-technischer Barrieren einer flä-

chendeckenden Verbreitung von EVs (Sovacool & Hirsch, 2009), der Entwurf technischer Übergangsszenarien sowie eines V2G Konzeptes (Guille & Cross, 2009) und die Diskussion geeigneter Geschäftsmodelle und strategischer Vorgehensweisen zur Netzintegration (Andersen, Mathews, & Rask, 2009) sind Beispiele hierfür. Auch wenn diese Arbeiten einen Einblick in praktische Überlegungen für ein künftiges Zusammenspiel von Elektromobilität und Energiewirtschaft geben, ist die bislang dominierende Methode zur Vorhersage der Auswirkungen von EVs auf das Energieversorgungssystem die Modellierung und Simulation. Aus diesem Grund werden im Folgenden wichtige Inputparameter in der bestehenden Literatur sowie damit einhergehende Restriktionen dargelegt und diskutiert.

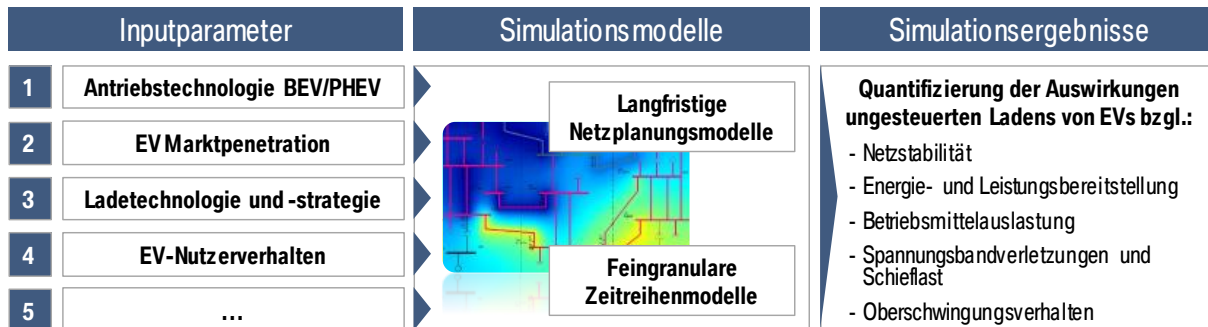


Abbildung 2-6: Divergierende Forschungsergebnisse zu Netzrückwirkungen von EVs aufgrund großer Bandbreite verwendeter Modellierungsansätze und Inputparameter (eigene Darstellung)

Aufgrund ihrer Relevanz für das elektrische Energieversorgungssystem wird in den hier betrachteten wissenschaftlichen Beiträgen zwischen Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs) und Battery Electric Vehicles (BEVs) als EV Antriebstechnologien unterschieden. Im Hinblick auf die Anzahl zugehöriger Veröffentlichungen ist keine Favorisierung einer der zwei Technologien erkennbar, hingegen berücksichtigen nur wenige Arbeiten beide simultan. Während PHEV Studien eine große Bandbreite an möglichen rein elektrischen Reichweiten als Inputparameter verwenden (Short & Denholm, 2006), wird im Rahmen der BEV Studien in der Regel auf Daten und Charakteristika von EVs zurückgegriffen, welche sich bereits in (Serien-)Produktion befinden (Kempton & Kubo, 2000) (Tomic & Kempton, 2007). In zwei der Studien, die sowohl PHEVs als auch BEVs miteinbeziehen (Turton & Moura, 2008) (Juil & Meibom, 2011), entscheidet sich das Simulationsmodell endogen auf Basis definierter Nebenbedingungen für eine Antriebstechnologie: In beiden Fällen werden PHEVs präferiert. Andere Studien gehen zudem bei BEV Nutzungsverhalten von deutlich geringeren täglichen Fahrleistungen aus (Kristofferson, Capion, & Meibom, 2011), weshalb zu beobachten ist, dass PHEVs insbesondere aufgrund geringerer Kosten der Batteriespeichersysteme und höherer Gesamtreichweiten geringfügig mehr Beachtung in wissenschaftlichen Beiträgen finden.

Die Marktdurchdringung von EVs wird in den hier gegenüberzustellenden Modellen auf verschiedene Arten bestimmt. Einige der Studien wählen lediglich eine einzige fixe Anzahl an EVs, die in das Energieversorgungssystem zu integrieren sind, und analysieren deren Netzrückwirkungen (Lund & Kempton, 2008) (Kiviluoma & Meibom, 2011). Andere untersuchen eine Bandbreite unterschiedlicher EV Penetrationsszenarien (Kristofferson, Capion, & Meibom, 2011) (Ekman, 2011). Die wissenschaftliche Literatur zur Vorhersage der künftigen Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen schlägt hier jedoch eine große Anzahl verschiedener Werte und Szenarien zur Auswahl vor, und erschwert somit den Forschenden die Wahl geeigneter Inputparameter im Hinblick auf die Verbreitung von EVs. Green

et al. (2011) empfehlen daher, jedes Modell auch bei einem EV Marktanteil von 0 % zu untersuchen und es als Baseline-Szenario zu definieren. Dieses sei im Folgenden verschiedensten Penetrationsgraden – diese entsprechen häufig politisch gesetzten Zielen – gegenüberzustellen, um so eine Sensitivitätsanalyse für die Auswirkungen von EVs auf das Energieversorgungssystem zu generieren.

Der Einfluss verschiedener Ladestrategien spiegelt sich auf unterschiedliche Art und Weise in wissenschaftlichen Beiträgen wieder. Während wenige Studien ausschließlich ungesteuertes Laden in ihren Fokus rücken (Hodge, Huang, Shukla, Pekny, & Reklaitis, 2010), vergleichen andere zumindest zwei verschiedene Ladestrategien miteinander, wie etwa ungesteuertes mit zeitverzögertem Laden (Leou, Su, & Lu, 2014). Der vorherrschende Modellierungsansatz hingegen bezieht eine Vielzahl unterschiedlicher Möglichkeiten in Betracht – ungesteuertes Laden, zeitverzögertes Laden, Laden außerhalb von Spitzenlastzeiten sowie intelligentes Laden mit und ohne Netzzurückspeisung sind Beispiele hierfür (Lund & Kempton, 2008) (Ekman, 2011) (Wang, Liu, Ton, Thou, & Vyas, 2011) (vgl. Kap. 2.3.4).

Nicht zuletzt stellt auch die Verfügbarkeit und Qualität detaillierter Daten zum Kundenfahrverhalten eine große Hürde für die Synthese aussagefähiger EV- und Netzmodelle dar (Green, Wang, & Alam, 2011). Für eine zuverlässige Bestimmung der EV Speicherkapazitäten sind folgende Parameter zwingend erforderlich (Richardson, 2013):

- Anzahl simultan im Stromnetz verfügbarer EVs
- Maximale Speicherkapazität je EV
- Ladezustand (State of Charge, SOC) je EV
- Ladeeffizienz je EV
- Speicherparameter zum Ladeverhalten und zur möglichen Ladeleistung

Mit Rücksichtnahme auf Rechenzeit und Handhabbarkeit der verwendeten Simulationsmodelle erscheint es wenig sinnvoll, diese Parameter für jedes EV individuell zu spezifizieren. Einige Arbeiten aggregieren daher die Gesamtheit aller zu integrierenden Fahrzeugspeicher und hinterlegen die dadurch entstehende Einheit mit historischen Daten zur Prädiktion ihrer Verfügbarkeit (Lund & Kempton, 2008) (Ekman, 2011). Kristofferson et al. (2011) mahnen an, dass dieses Vorgehen zahlreiche Unschärfen induziert, und konstruieren auf Basis empirischer Fahrzeugdaten ein Set von 30 Fahrprofilen, um das Verhalten realer Fahrzeugflotten realitätsnäher nachzubilden. Wang et al. (2011) wiederum aggregieren Fahrzeuge nach ihrer verfügbaren Speicherkapazität. Unabhängig davon, welche der Methoden Verwendung findet, ist der bestehende Zielkonflikt zwischen Handhabbarkeit und exakter Abbildung des realen Fahrzeug- und Nutzerverhaltens nur schwer aufzulösen.

In Simulationsmodellen werden nur diejenigen Merkmale eines realen, komplexen Systems modelliert, die für eine konkret zu lösende Fragestellung von Bedeutung sind. Nachrangige Merkmale werden in der Regel vernachlässigt. Die Ergebnisqualität jeder Simulation hängt davon ab, wie genau die modellierten Merkmale das reale System beschreiben.

Da bestehende wissenschaftliche Arbeiten zur Quantifizierung der Netzzurückwirkungen von EVs bei ungesteuertem Laden unterschiedlichste Modellierungsansätze, Systemmerkmale und Inputparameter heranziehen, besitzen diese zwar eine hohe interne Validität, ihre Vergleichbarkeit und Generalisierbarkeit hingegen ist äußerst limitiert.

2.3.3 Auswirkungen ungesteuerten Ladens auf das Energieversorgungssystem

Der in Kapitel 2.3.2 beschriebenen Bandbreite von Ansätzen und Inputparametern, die zur Modellierung von EV Flotten und deren Integration in das Energieversorgungssystem herangezogen werden, steht eine ebenso große Spanne möglicher Ergebnistypen gegenüber. Zusammengefasst können die bestehenden wissenschaftlichen Ergebnisse in ökonomische sowie ökologische Analysen der Auswirkungen von elektrifizierten Fahrzeugflotten kategorisiert werden. Auch Potenziale zur Integration erneuerbarer Energien sowie die Identifikation möglicher Netzzrückwirkungen von EVs im Energieversorgungssystem sind typische Untersuchungsgegenstände, wobei der Stand der Technik zu Letzteren nun im Detail diskutiert werden soll.

EVs beeinflussen Performance, Effizienz und den Bedarf an Übertragungskapazitäten im elektrischen Energieversorgungssystem insbesondere dann, wenn sie ungesteuert – also ohne externe Einflussnahme – laden. Zahlreiche Studien (Headley, 2006) (Heinrichs, 2014) (Gerbault, Schill, & Kasten, 2014) weisen eine erhöhte bereitzustellende Spitzenlast und den damit einhergehenden Investitionsbedarf in Erzeugungs- und Übertragungskapazitäten nach. Erst die Umsetzung intelligenter Ladepläne befähigt eine EV Flotte Lastgangkurven zu glätten, verfügbare Grundlastkapazitäten gezielt zu nutzen und den Bedarf an Kapazitätzubau zu vermeiden (Juil & Meibom, 2011) (Denholm & Short, 2006). Welcher EV Marktdurchdringungsgrad ohne den Zubau von Erzeugungs- und Netzinfrastruktur zu bewältigen ist, kann bisher nicht eindeutig ermittelt werden. Im Folgenden werden die Untersuchungsergebnisse zu Auswirkungen von EVs auf charakteristische Netzkenngößen gegenübergestellt:

- **NETZSTABILITÄT:** Da viele Netzstränge des heutigen elektrischen Energiesystems mit nur geringem Sicherheitspuffer dimensioniert wurden, sind Studien zur Untersuchung der Netzstabilität bei zunehmender Verbreitung von EVs zwingend erforderlich. Auf Grundlage bestehender Testsysteme konnte ein negativer Einfluss von EVs auf verschiedene Stabilitätsindizes nachgewiesen, jedoch nicht quantifiziert werden (Onar & Khaligh, 2010) (Das & Aliprantis, 2008). Dies legt in Abhängigkeit bestehender Netzkapazitäten auch bei moderaten EV Penetrationsgraden ein vermehrtes Auftreten von Stabilitätsproblemen nahe (Dharmakeerthi, Mithulananthan, & Saha, 2011) (Jochem, Kaschub, Paetz, & Fichtner, 2012).
- **ENERGIE- UND LEISTUNGSBEDARF:** Wissenschaftliche Beiträge zur Untersuchung des Energie- und Leistungsbedarfes von EV Flotten sind zahlreich. Der Energiebedarf der modellierten Fahrzeugflotten ist im Vergleich zum gesamten Stromverbrauch sehr gering (Gerbault, Schill, & Kasten, 2014). An privaten Netzanschlusspunkten werden Elektrofahrzeuge aber mit hoher Wahrscheinlichkeit zu bestehenden Spitzenlastzeiten – insbesondere in den Abendstunden – geladen. Um das simultane Auftreten dieser Leistungsbedarfe zu vermeiden, sind Kontrollmechanismen zu etablieren (McCarthy & Wolfs, 2010) (Putrus, Suwanapingkarl, Johnston, Bentley, & Narayana, 2009) (Mullen, 2009).
- **BETRIEBSMITTELAUSLASTUNG:** Die Fähigkeit des Energieversorgungssystems zur Bereitstellung des zunehmenden Energiebedarfes von EVs kann durch Engpassituationen im physischen Stromnetz im Einzelfall erheblich begrenzt werden. Dies schließt die Überschreitung von Übertragungskapazitäten sowie thermischer Grenzwerte der Betriebsmittel im Verteilnetz mit ein (Qian, Zhou, & Yuan, 2015). Da die Summe dieser Kapazitätsrestriktionen die Gesamtsystemperformance erheblich beeinflusst, wurden die Auswirkungen von EV Flotten auf beteiligte

Netzbetriebsmittel im Detail untersucht (Papadopoulos, et al., 2010) (Farmer, Hines, Dowds, & Blumsack, 2010) (Fernandez, Roman, Cossent, Domingo, & Frias, 2011) (Kelly, Rowe, & Wild, 2009). Im Ergebnis hängt die Betriebsmittelauslastung vor allem vom bestehenden Lastverhalten und der Auslegung der jeweiligen Netzstränge, von der Ladeleistung, dem Ladezeitpunkt und der Ladestrategie der EVs, sowie saisonalen Verbrauchsmustern ab. Insbesondere in Deutschland spielen diese Effekte aufgrund der vermehrten Integration von erneuerbaren Energieerzeugungsanlagen und des damit einhergehenden Investitionsbedarfes in die Netzinfrastruktur eine untergeordnete Rolle. Auch bei hoher EV Marktdurchdringung ist nur im Einzelfall mit überhöhten Betriebsmittelauslastungen zu rechnen (Richardson, 2013) (Schill & Gerbaulet, 2015).

- **SPANNUNGSBANDVERLETZUNGEN UND SCHIEFLAST:** Die Grenzwerte für das vom Verteilnetzbetreiber einzuhaltende Spannungsband werden in DIN EN 50160 definiert. Demnach sollen 95 % der 10-Minuten-Mittelwerte des Effektivwertes der Versorgungsspannung jedes Wochenintervalls im Bereich von ± 10 % der Versorgungsspannung liegen (DREWAG, 2015). Notwendige Maßnahmen zur Vermeidung von Schieflastszenarien werden hingegen in den technischen Anschlussbedingungen (TAB) jedes Verteilnetzbetreibers selbst spezifiziert. Mit zunehmender Anzahl und Ladeleistung von EVs steigt auch ihr Einfluss auf o.g. Netzkenngößen. Ein Grenzwert für die Anzahl integrierbarer EVs kann je nach Verteilnetzcharakteristika und Ladeverhalten ermittelt werden. Im Ergebnis divergieren wissenschaftliche Beiträge hier aber deutlich. Während Linssen et al. (2012) von einem kritischen EV Penetrationsgrad von nur 2 % der bestehenden Fahrzeugflotte ausgehen, rechnen Putrus et al. (2009) mit einer Aufnahmefähigkeit heutiger Netze von bis zu 30 %. Die Auswirkungen von EV Flotten auf die Spannungssymmetrie hingegen wird aufgrund bestehender TAB im Allgemeinen als unproblematisch erachtet (Linssen, et al., 2012).
- **OBERSCHWINGUNGSVERHALTEN:** Die von EVs in das Energieversorgungsnetz induzierten Oberschwingungen sind stark von der Leistungselektronik der verwendeten Ladegeräte abhängig, während Gleichzeitigkeitsfaktoren im Ladeverhalten hier eine untergeordnete Rolle spielen (Dharmakeerthi, Mithulananthan, & Saha, 2011). Somit ist das Oberschwingungsverhalten neben der Anzahl der ins Netz zu integrierenden EVs insbesondere auch von der eingesetzten Ladetechnologie abhängig. Insgesamt ist davon auszugehen, dass sich die induzierten Oberspannungen und zugehörige Ströme innerhalb der zulässigen Grenzwerte bewegen, solange die verwendeten Ladegeräte bestehende Standards erfüllen (Tovilovic & Rajakovic, 2015).

Im Ergebnis divergieren die betrachteten Studienergebnisse stark. Dennoch legen sie nahe, dass bei zunehmender Verbreitung von EVs mit zahlreichen Grenzwertverletzungen und Engpasssituationen im elektrischen Energieversorgungssystem zu rechnen ist. Insbesondere Spannungsbandverletzungen sowie Engpässe in der Leistungsbereitstellung an Netzanschlusspunkten erfordern zunehmenden Investitionsbedarf. Eine Quantifizierung des kritischen EV Penetrationsgrades ist auf Basis der dargestellten Arbeiten nicht möglich. Mittelfristig ist davon auszugehen, dass die Elektromobilität zwar Auswirkungen auf das deutsche Energiesystem hat, diese jedoch von anderen Effekten überlagert werden (Heinrichs, 2014).

2.3.4 Beitrag der Elektromobilität in dezentralen Energieversorgungssystemen

Intelligente Netzdienste sind dazu in der Lage, potenziellen Netzrestriktionen entgegenzuwirken. Die vorangegangene Betrachtung zeigt aber, dass Netzengpässe künftig nur vereinzelt und lokal beschränkt kompensiert werden müssen. Gleichzeitig muss dies nicht zwingend durch den netzdienlichen Einsatz von EVs erfolgen. Neben dem Angebot von Netzdiensten können sie daher auch für intelligente Marktdienste genutzt werden. Welche konkreten Anwendungsfälle in der relevanten wissenschaftlichen Literatur bereits thematisiert wurden, wird im Folgenden beschrieben.

Auf Basis umfassender Mobilitätsstudien wurde ermittelt, dass das Lastverschiebungspotenzial von EVs neben ihrer Ladeleistung vor allem auch vom Nutzungsverhalten ihrer Besitzer abhängt. Beträgt beispielsweise die Netzverfügbarkeit von Pendlerfahrzeugen bei ausschließlichem Heimpladen noch 24 % der Zeit, so steigt sie auf 45 %, sobald auch am Arbeitsplatz eine Lademöglichkeit zur Verfügung steht (Babrowski, Heinrichs, Jochem, & Fichtner, 2014). Studien belegen, dass EVs mit V2G Technologie in dieser Zeit zahlreiche Dienste bereitstellen können. Dazu gehören z.B. lokales Energiemanagement, Blindleistungskompensation, Lastausgleich und das aktive Filtern von auftretenden Oberschwingungen (vgl. Abbildung 2-7). Konkret bedeutet dies einen Zugewinn an Zuverlässigkeit, Effizienz und Stabilität des Stromnetzes. Auch ein Einsatz zur Gewährleistung einer unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) ist denkbar (Habib, Kamran, & Rashid, 2015).

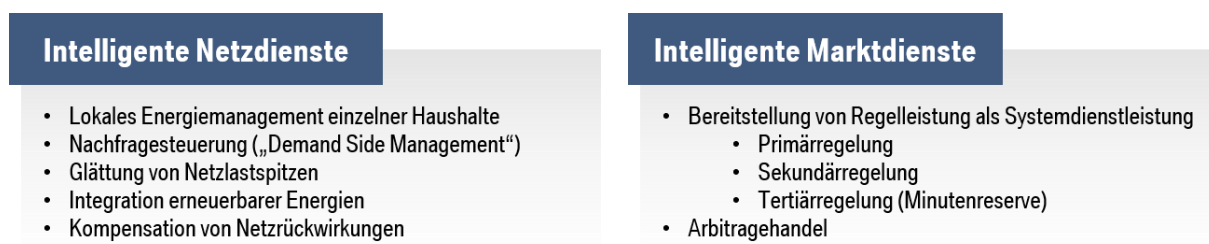


Abbildung 2-7: Übersicht über Anwendungsfälle vernetzter Ladedienste in der bestehenden wissenschaftlichen Literatur (eigene Darstellung)

LOKALES ENERGIEMANAGEMENT EINZELNER HAUSHALTE: Im Kontext der Netzdienste beschreiben Lopes, et al. (2011) ein technisches Framework auf Basis eines Matlab/Simulink Simulationsmodells zur Integration von EVs in das Energiesystem einzelner Haushalte. Demnach ermöglichen intelligente Steuerungsmechanismen einzelner Fahrzeuge und ein lokales Energiemanagement höhere EV-Penetrationen im Energieversorgungssystem ohne gleichzeitigen Netzausbau. Eine geringere Verteilnetzbelastung, bessere Spannungsprofile, eine höhere Performance beim Inselbetrieb von Netzen sowie ein höherer möglicher Einspeisungsanteil erneuerbarer Energien sind weitere Nutzen. Von einem unmittelbaren Nutzen für den EV-Kunden selbst wird hier nicht ausgegangen.

NACHFRAGESTEUERUNG („DEMAND SIDE MANAGEMENT“): Der überwiegende Anteil wissenschaftlicher Studien geht jedoch nicht von einer individuellen Steuerung einzelner EVs innerhalb des Ökosystems des Kunden aus. Zumeist ist die Orchestrierung einer größeren Anzahl von Fahrzeugen die Grundidee der Forschungsgegenstände – so auch bei der Nachfragesteuerung (engl. Demand Side Management (DSM)) durch EVs, welche verschiedene Ziele verfolgen kann. Esmaili und Goldoust (2015) wei-

sen zum Beispiel mit Hilfe eines Modells zur Mehrzieloptimierung von Netzverlusten und Energiekosten die Wirksamkeit verschiedener Ladestrategien für einphasige PHEVs in unregelmäßig dreiphasigen Verteilnetzen nach.

GLÄTTUNG VON NETZLASTSPITZEN: In verschiedenen Arbeiten wird der Einsatz von EV-Flotten zum Ausgleich von Spitzenlasten (engl. Peak-Shaving) intensiv betrachtet. Mit Hilfe eines Multiagenten-Optimierungsmodells konnte gezeigt werden, dass typische Lastkurven mittels eines stündlich festgelegten Preismodells merklich geglättet werden können. Die maximalen Abweichungen vom Mittelwert lassen sich um bis zu 70 % senken, auch wenn insgesamt aber zunächst von einem kleinen Effekt der EVs auf die Lastkurve auszugehen ist. Eine Evaluierung größerer Flotten ist ausstehend, aber vielversprechend (López, De la Torre, Martín, & Aguado, 2015). Auch Pollock, et al. (2010) arbeiten in einem Multiagenten-System mit verschiedenen Szenarien (risikoaffines, neutrales und risikoaverses Kundenverhalten), um eine mögliche Verlagerung der Ladezeitpunkte von EVs zu evaluieren. Prämisse ist hierbei stets eine ausreichende Netzkapazität. Eine auktionenbasierte Steuerung zur Verlagerung der Ladezeitpunkte unter Berücksichtigung lokaler technischer Randbedingungen bewirkt eine insgesamt effizientere Nutzung vorliegender Kapazitäten im Energieversorgungssystem, wodurch eine höhere Penetrationsrate von Elektrofahrzeugen ohne Grenzwertverletzungen im Verteilnetz ermöglicht wird. Weitere Studien kommen basierend auf Modellen für ein hierarchisches Energiemanagementsystem (Reiner, Leibfried, Allending, & Schmeck, 2009) und mit Hilfe von Lastkurvensimulationen (Schill & Gerbaulet, 2015) zu vergleichbaren Ergebnissen. Quantifiziert wird der Mehrwert des Einsatzes von EVs für Peak-Shaving durch Hartmann und Özdemir (2011). Sie errechnen eine Reduzierung der Netzschwankungen um bis zu 16 %.

INTEGRATION ERNEUERBARER ENERGIEQUELLEN: Weitere wissenschaftliche Beiträge bringen EVs mit der Integration erneuerbarer Energiequellen in das Energieversorgungssystem oder Microgrids in ein Verhältnis. Sie weisen mittels stochastischer Optimierungsmodelle und Case Studies nach, dass signifikant höhere Kapazitäten an regenerativen Energieträgern (PV und Windkraftanlagen) möglich sind, wenn sich die Dimensionierungsmodelle exzessiv auf V2G Modelle stützen (Atia & Yamada, 2015) (Ghasemi, Mortazavi, & Mashhour, 2016). Interessant sind solche Betrachtungen insbesondere dann, wenn die zugehörigen Systemmodelle auch die Degradationskosten für den EV Besitzer berücksichtigen und dadurch die Kosten einer V2G Teilnahme transparent machen. Nur so lässt sich nachhaltig die Akzeptanz der Nutzer sowie das Potenzial der Produkte erhöhen (Debnath, Ahmad, Habibi, & Saber, 2015).

KOMPENSATION VON NETZRÜCKWIRKUNGEN: Über die oben genannten Netzdienste hinaus decken weitere Studien über eine mögliche Kompensation von NetZRückwirkungen durch EVs ein breites Spektrum an Anwendungsfällen ab. Mit Hilfe einer Simulation von Lastkurven auf Basis stochastischer Modelle, wurden die Auswirkungen der Integration von Photovoltaik und Elektrofahrzeugen in das Verteilnetz auf die Lastprofile von Transformatoren ermittelt sowie deren Spannungsüberschwingungen (THD_v) analysiert. Lasterhöhungen und Spannungsabfälle können aufgrund hoher EV-Penetrationsraten durch simultanen Betrieb von PV-Anlagen kompensiert werden (Richardson, 2013). Die THD_v hingegen können je nach Rahmenbedingung sowohl höher als auch niedriger ausfallen (Tovilovic & Rajakovic, 2015). Gleichzeitig wird davon ausgegangen, dass bei einer höheren Anzahl ungesteuert ladender EVs die Spannungsqualität sinkt, während die Netzverluste sich erhöhen. Dem kann – nachge-

wiesen mittels Simulationen, die die mangelnde Vorhersagegenauigkeit mittels stochastischer und quadratischer Programmierung berücksichtigen – durch gesteuertes Laden entgegengewirkt werden. Ein Netzausbau aufgrund von Spannungsbandverletzungen wird so vermieden oder wenigstens verzögert (Clement-Nyns, Haesen, & Driesen, 2010) (Clement-Nyns, Haesen, & Driesen, 2011). Auch Leou, et al. (2014) weisen qualitativ nach, dass Spannungs- und Frequenzbandverletzungen durch intelligente Ladestrategien aufgelöst werden können. Negative Auswirkungen eines gesteuerten Ladens zeigen sich jedoch bei der Simulation thermischer Auswirkungen auf Transformatoren. Ein Laden abseits der Spitzenlastzeiten verhindert eine ausreichende nächtliche Kühlung und verringert somit die Lebensdauer der Transformatoren signifikant (Qian, Zhou, & Yuan, 2015). EVs finden ebenso immer mehr Betrachtung, wenn es darum geht, sie zur Blindleistungskompensation im Betrieb von Energieversorgungssystemen zu nutzen. Neue Smart Grid Technologien (Smart Metering, permanente Systemüberwachung, Automatisierung und aktives Verteilnetzmanagement) schaffen neue Optimierungsmöglichkeiten. Mit der Verfügbarkeit von EVs als zusätzliche Lasten im Netz ist es möglich, durch Veränderung der Betriebsstrategie des Umrichters, Blindleistung ins System einzubringen, ohne dabei den Wirkleistungsanteil des EVs merklich zu beeinflussen (Manbachi, Farhangi, Palizban, & Arzanpour, 2016).

Intelligente Marktdienste verfolgen das Ziel etablierte Energiemarktdienste zu monetarisieren. Das Qualitätskriterium eines vernetzten Ladedienstes ist nun nicht mehr, inwiefern er einem Netzbetreiber nutzt um definierte Stabilitätskriterien zu erfüllen. Vielmehr muss er nun qualifiziert sein, Marktmechanismen bedienen zu können. Auch hier existieren einzelne wissenschaftliche Betrachtungen, die im Folgenden eingeordnet und erörtert werden.

BEREITSTELLUNG VON REGELLEISTUNG ALS SYSTEMDIENSTLEISTUNG: Als Grundeigenschaft jedes elektrischen Energiesystems müssen Erzeugung und Verbrauch zu jedem Zeitpunkt ausgeglichen sein. Jede Störung dieser Balance bedingt eine Abweichung von der Sollfrequenz ($50 \pm 0,2$ Hz) und eine Verringerung der Energieversorgungsqualität. Daher ist jeder Betreiber eines Energieversorgungssystems dazu aufgerufen, eine ausreichend hohe Menge an verfügbarer Wirkleistung vorzuhalten, um auftretende Abweichungen kompensieren zu können. Diese können durch unvorhergesehene Wetterereignisse, Kraftwerksausfälle oder auch Fehlplanungen ausgelöst werden. Bei einer drohenden Überdeckung der Netzleistung spricht man von negativer Regelleistung. Das bedeutet, dass Stromerzeuger ihre Leistung drosseln oder vollständig herunterfahren, um die Netzstabilität wieder herbeizuführen. Stromverbraucher – und somit auch EVs – erhöhen für den gleichen Effekt ihre Last. Bei einer Unterdeckung spricht man von positiver Regelleistung. Hier erhöhen Stromerzeuger ihre Leistung, Stromverbraucher reduzieren sie.

Die UCTE (Union for the Coordination of Transmission of Electricity) definiert drei Typen der Regelleistung, die es den europäischen Übertragungsnetzbetreibern ermöglicht, die geforderte Balance zwischen Last und Erzeugung sicherzustellen (Oudalov, Chartouni, & Ohler, 2007). Diese sind Primär-, Sekundär- und Tertiärregelleistung (vgl. Abbildung 2-8). Jede Abweichung der Netzfrequenz erfordert zunächst ein unmittelbares Eingreifen kurzfristig verfügbarer Reservekapazitäten zur Stabilisierung des Systems. Erst dann werden Sekundärregelreserven aktiviert, um die Netzsollfrequenz wiederherzustellen. Nähert sich die Istfrequenz dem unkritischen Frequenzband, so wird sie weiterhin durch Tertiärregelleistung gestützt.

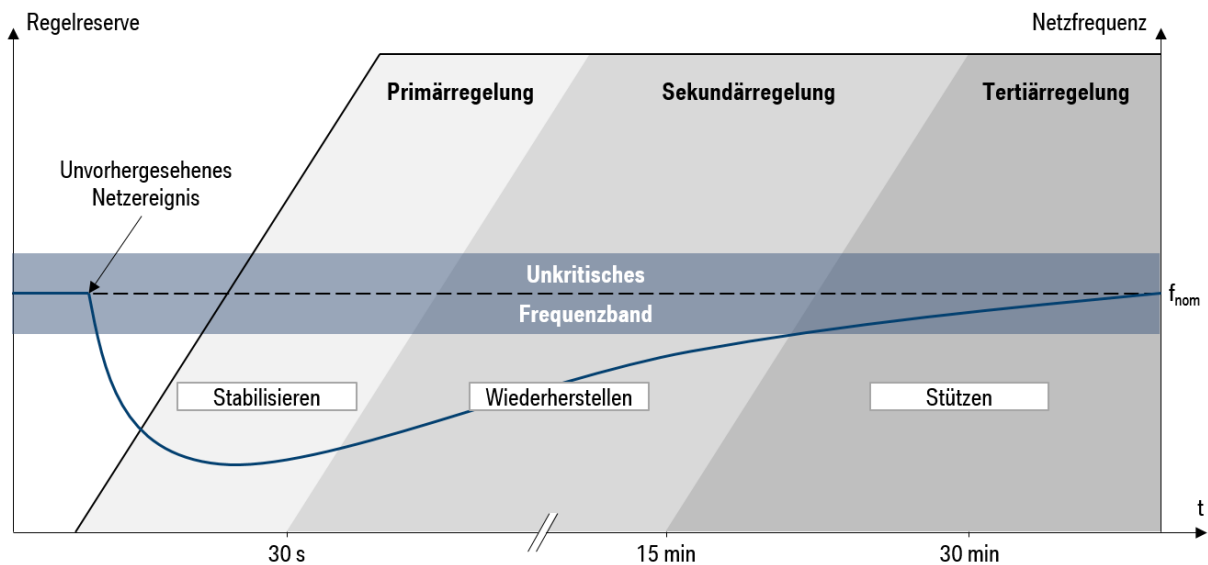


Abbildung 2-8: Bereitstellung von Regelreserven innerhalb der UCTE (eigene Darstellung in Anlehnung an Oudalov, Charatouni, & Ohler (2007))

Tabelle 2-1 beschreibt die Standards, die im Rahmen der UCTE für die Frequenzsteuerung vorgegeben sind. Dabei erfolgt die Beschaffung der erforderlichen Regelleistung für die deutschen Übertragungsnetzbetreiber über eine gemeinsame Plattform für standardisierte Regelleistungsprodukte im Rahmen des Netzregelverbands (NRV). In Deutschland ist dazu wie in den meisten europäischen Ländern ein Ausschreibungsverfahren durchzuführen, welches diskriminierungsfrei und transparent sein muss. Potenzielle Anbieter von Regelleistung müssen sich hierfür zunächst bei einem der vier ÜNB präqualifizieren – d.h. nachweisen, dass sie in der Lage sind, die technischen Anforderungen zur Erbringung von einer oder mehrerer Arten der Regelleistung zu erfüllen. Somit sind auch Elektrofahrzeugflotten, sofern sie sämtliche Anforderungen an ihre Aktivierungs- und Bereitstellungszeit sowie die Leistungsvorgaben erfüllen können, für beliebige Regelleistungsangebote befähigt.

Tabelle 2-1: Anforderungen der UCTE an das Angebot von Regelreserven (OpHB-Team, 2009)

	Primärregelung	Sekundärregelung	Tertiärregelung
Aktivierungszeit	30 s	5 min	15 min
Bereitstellung	30 s – 5 min	5 min – 15 min	15 min – 1 h
Ausschreibungszeitraum	Wöchentlich	Wöchentlich	Täglich
Vergütung	Ein Preis für Leistung & Arbeit	Leistungs- und Arbeitspreis	Leistungs- und Arbeitspreis
Zeitscheiben	-	Haupt-/Nebenzeit	6x 4h-Blöcke
Mindestangebot	2 % Nennleistung & 1 MW	5 MW	5 MW
Richtung	Positiv und negativ	Positiv und/oder negativ	Positiv und/oder negativ

Aufgrund ihrer Fähigkeit, Leistung innerhalb kurzer Zeit bereitzustellen, wurden Batteriespeichersysteme und BEVs im Besonderen bislang überwiegend für das Angebot von Primärregelleistung in Be-

tracht gezogen. So kommen wissenschaftliche Beiträge – basierend auf Prognosemodellen für Speicherpotenziale oder Infrastrukturanalysen – zu dem Ergebnis, dass sich EVs zu virtuellen Speichern für die Bereitstellung der erforderlichen Mindestleistung von 1 MW aggregieren lassen. Prämisse hierfür ist eine bidirektionale Fahrzeuganbindung zur Ladeinfrastruktur. Die Lebensdauerimplikationen und Einschränkungen der Mobilität der Fahrzeugnutzer bleiben hierbei minimal (Psola, Bode, & Henke, 2013).

Ebenso wurden bereits Feldversuche für einen Machbarkeitsnachweis zur Erbringung von Sekundärregelleistung durchgeführt. Eine Bewertung solcher Konzepte ist jedoch noch ausstehend – bislang wurde davon ausgegangen, dass Netzzrückwirkungen durch die bereitgestellten Netzdienste zwar möglich aber irrelevant sind. Zudem liegt den Betrachtungen zugrunde, dass es durch Regelleistungsabrufe zu keinerlei Überhöhung bestehender Netzlastspitzen kommt oder sie auf andere Art mit dem Netzlastverlauf korrelieren (Degner, et al., 2013).

ARBITRAGEHANDEL: Neben den genannten Regelleistungsprodukten gibt es nach dem Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) auch die Möglichkeit, elektrische Energie am Großhandelsmarkt zu kaufen und zu verkaufen. Der Energiehandel findet auf Bilanzkreisebene statt und sieht verschiedene Kontrakte vor. Zum Beispiel bietet der Terminmarkt, an dem Strom für die nächsten Jahre gehandelt wird, Base und Peak⁹ als standardisierte Monats-, Quartals- und Jahreskontrakte an. Neben Produkten zur langfristigen Absicherung von Erzeugung und Bedarf wird der sogenannte Spotmarkt dazu genutzt, das Erzeugungs- oder Verbrauchsportfolio für den jeweils nächsten Tag zu optimieren. Hierdurch kommen die Stromhändler ihrer Verpflichtung nach, den eigenen Bilanzkreis für den Folgetag auf Basis aktueller Lastprognosen und des aktuell geplanten Kraftwerkseinsatzes auszugleichen. Ergänzend werden im Rahmen des Intradaymarktes nach Schluss des Day-Ahead-Handels noch kurzfristige Geschäfte getätigt, um Fahrplanabweichungen zu reduzieren. Dabei ermöglicht die europäische Strombörse (EEX) Intraday-Geschäfte bis 30 Minuten vor Lieferung (EEX, 2017). Entsprechend bisheriger Beiträge ist bei Teilnahme von EV-Flotten am Arbitragehandel ein Gewinn von 0,68 € pro Tag und Fahrzeug zu erzielen (Hartmann & Özdemir, 2011).

Die Auswirkungen hoher Penetrationsgrade von EVs und ihrer Ladeprofile auf das elektrische Verteilnetz können mit Hilfe koordinierten Ladens (z.B. verzögert, off-peak oder mittels intelligenter Planung) zumindest in Teilen kompensiert werden. Darüber hinaus zeigen die zitierten Beiträge, dass V2G Technologie bei gleichzeitiger Aggregation größerer Fahrzeugflotten auch dazu in der Lage ist, einen ökonomischen Beitrag zu leisten. Sie geht aber auch mit Herausforderungen, wie einer verstärkten Degradation der Hochvoltpeicher und der Notwendigkeit eines geeigneten IKT Systems zwischen dem EV und seiner Infrastruktur, einher. Es ist davon auszugehen, dass der durch Ladedienste erzielbare Mehrwert ihre Lebensdauer Auswirkungen überwiegt (Habib, Kamran, & Rashid, 2015).

Der bisherige wissenschaftliche Diskurs lässt zwei Aspekte weitestgehend vermissen. Keiner der Beiträge stellt die Bedürfnisse des EV Kunden in den Mittelpunkt. So wird zum Beispiel der Einsatz von

⁹ Base und Peak Kontrakte: Base bezeichnet eine Bandlieferung, bei der zu jeder Viertelstunde des Lieferzeitraumes dieselbe Leistung geliefert wird. Bei einem Peak Kontrakt hingegen liefert der Verkäufer die Nominalleistung durchgehend von Montag bis Freitag jeweils von 8 – 20 Uhr. Zu den übrigen Zeitpunkten findet keine Lieferung statt (EEX, 2017).

Elektrofahrzeugen für ein lokales Energiemanagement zwar im Hinblick auf seine Netzdienlichkeit untersucht. Inwiefern es einen Mehrwert für den Fahrzeugkunden stiften kann – z.B. im Kontext eines ‚Smart Homes‘ – steht nicht im Fokus. Ebenso finden die jeweiligen Ladedienste nur singulär Betrachtung. Die Tatsache, dass sie im Sinne der Erreichung eines Gesamtoptimums stets um die Nutzung des Lastverschiebungspotenzial der EVs miteinander konkurrieren und somit nicht in vollem Umfang auf dieses zurückgreifen können, wird im Rahmen der Untersuchungen ignoriert.

Es ist ein Pfad zur Gestaltung des Produktangebotes vernetzter Ladedienste zu definieren, der alle beteiligten Stakeholder miteinbezieht und ihnen einen wirtschaftlichen oder technischen Mehrwert stiftet.

2.4 Stakeholder-Analyse zur Identifikation vernetzter Ladedienste und Erfolgsfaktoren

Die erhobenen Daten der geführten semistrukturierten, problemzentrierten Interviews bilden auf Basis des Know-hows der befragten Personen eine solide Informationsbasis, um fundierte Rückschlüsse auf die künftige Rolle der Elektromobilität in dezentralen Energieversorgungssystemen zu ziehen (vgl. Kapitel 2.2.2). In die Interviews wurden sowohl Vertreter aus der unternehmerischen Praxis (Energieversorgungsunternehmen, Verteilnetzbetreiber, OEMs und Energiemanagementdienstleister) als auch Forschungsinstitute mit engem inhaltlichem Bezug miteinbezogen. Dies ermöglichte es, ein unvoreingenommenes Bild des Themenkomplexes zu zeichnen und dieses aus unterschiedlichen Blickwinkeln zu beleuchten. Abbildung 2-9 beschreibt die Zusammensetzung des gewählten Expertenkollektivs im Detail. Es bildet die Grundlage für die Datenerhebung sowohl im Rahmen der geführten Experteninterviews als auch der späteren Delphi-Befragung (siehe Anhang). Entsprechend der im Zuge der Forschungstätigkeit getroffenen Geheimhaltungsvereinbarung werden die Firmen und Forschungseinrichtungen, denen die Befragten angehören, in der vorliegenden Arbeit nicht namentlich erwähnt.

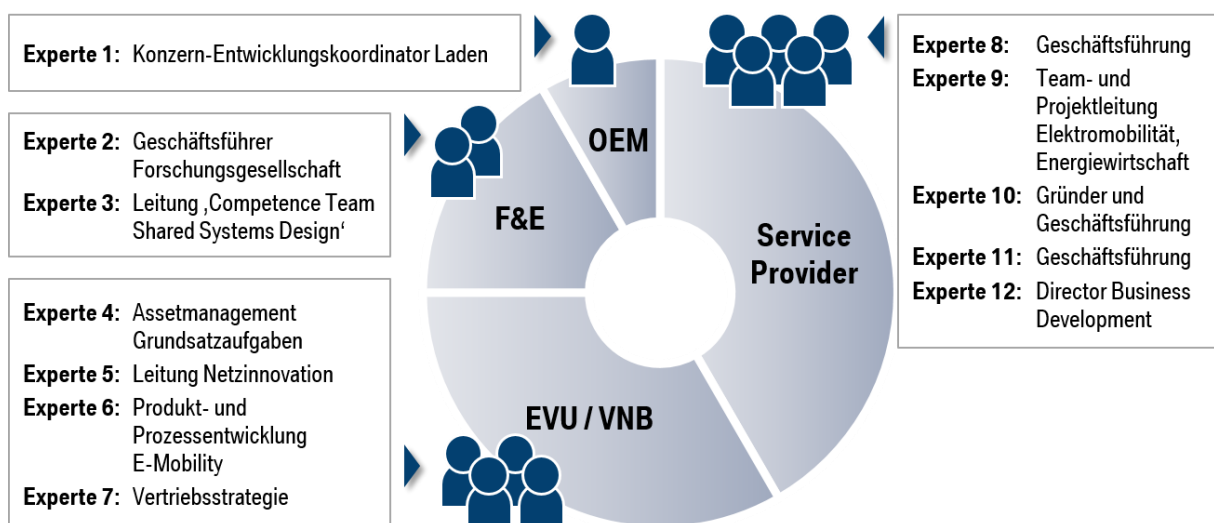


Abbildung 2-9: Zusammensetzung des Expertenkollektivs der durchgeführten Stakeholder-Analyse (eigene Darstellung)

Im Rahmen der geführten Interviews wurden fünf Themenbereiche im Kontext vernetzter Ladedienste für Elektrofahrzeuge detailliert diskutiert (vgl. Abbildung 2-10). Dabei sollten die Befragten zunächst

allgemeine Herausforderungen bei der Dezentralisierung des deutschen Energieversorgungssystems beschreiben und begründen. Erst wenn bekannt ist, mit welchen Problemen gerechnet werden muss, können Handlungsbedarfe oder auch Ziele daraus abgeleitet werden. In einem zweiten Schritt wurden daher Kollaborationsbedarfe zwischen den beteiligten Stakeholdern erörtert. Daraufhin sollten die Befragten diejenigen Anwendungsfälle (Usecases) für vernetzte Ladedienste nennen, die ihrer Einschätzung nach den größten Mehrwert in dezentralen Energieversorgungssystemen stiften. Gleichzeitig waren sie aufgefordert diese zu priorisieren. Um den im Rahmen des Kapitels 2.3.4 geforderten Pfad zur Gestaltung des Produktangebotes vernetzter Ladedienste zu erarbeiten, waren dann Möglichkeiten zur strategischen Positionierung der beteiligten Stakeholder aufzuzeigen. Abschließend wurden kritische Erfolgsfaktoren für eine erfolgreiche Markteinführung vernetzter Ladedienste für die Elektromobilität abgeleitet.

Themenschwerpunkte der explorativen Studie	
1	Allgemeine Herausforderungen bei der Dezentralisierung des deutschen Energieversorgungssystems
2	Kollaborationsbedarfe zwischen beteiligten Stakeholdern
3	Usecases für vernetzte Ladedienste für Elektrofahrzeuge sowie deren Priorisierung
4	Möglichkeiten zur strategischen Positionierung der beteiligten Stakeholder
5	Kritische Erfolgsfaktoren für einen erfolgreichen Launch vernetzter Ladedienste

Abbildung 2-10: Inhalte der durchgeführten explorativen Studie (eigene Darstellung)

Nach Transkription und strukturierender Inhaltsanalyse der Experteninterviews bildeten die gewonnenen Ergebnisse die Grundlage für die darauf folgende Delphi-Befragung (vgl. Kapitel 2.2.3). Auch hier folgten die zu behandelnden Themengebiete derselben Reihenfolge.

2.4.1 Stakeholder und Zusammenarbeitsmodelle

Schon die Wahl des Expertenkollektivs impliziert, dass insbesondere vier Gruppen von Stakeholdern für einen Markt vernetzter Ladedienste relevant sein werden. Dies sind neben den OEMs, stellvertretend für die Automobilindustrie, sowohl Energieversorgungsunternehmen als auch Verteilnetzbetreiber. Sie vertreten den Energiesektor innerhalb des liberalisierten deutschen Energiemarktes. Nicht zuletzt werden aber auch die sogenannten Service Provider eine tragende Rolle innerhalb künftiger Marktstrukturen einnehmen.

Um anstehende Herausforderungen für eine erfolgreiche Dezentralisierung des deutschen Energieversorgungssystems herausarbeiten zu können, ist zunächst ein gemeinsames Verständnis der Begrifflichkeit erforderlich. Im Einklang mit den in Kapitel 1.1.2 erläuterten Zielen intelligenter dezentraler Energieversorgungssysteme herrschte hier Einigkeit unter den befragten Personen. Konkret nannten die Experten charakteristische Merkmale, wie deren feingranulare Strukturen, die dezentrale Energieerzeugung und –verbrauch, ein hohes Maß an Vernetzung und Kommunikation sowie den Bedarf an überregionalem Energieaustausch. Im Hinblick auf künftige Herausforderungen bei der Dezentralisierung des deutschen Energiesystems konnten vier Handlungsfelder identifiziert werden (vgl. Abbildung 2-11).

Diese werden im Folgenden diskutiert und folgen in ihrer Reihenfolge absteigend dem Zustimmungsggrad (DoA)¹⁰ des Expertenkollektivs. Ergänzend zu seinem arithmetischen Mittelwert (M) erfolgt eine Angabe der zugehörigen Standardabweichung (SD).

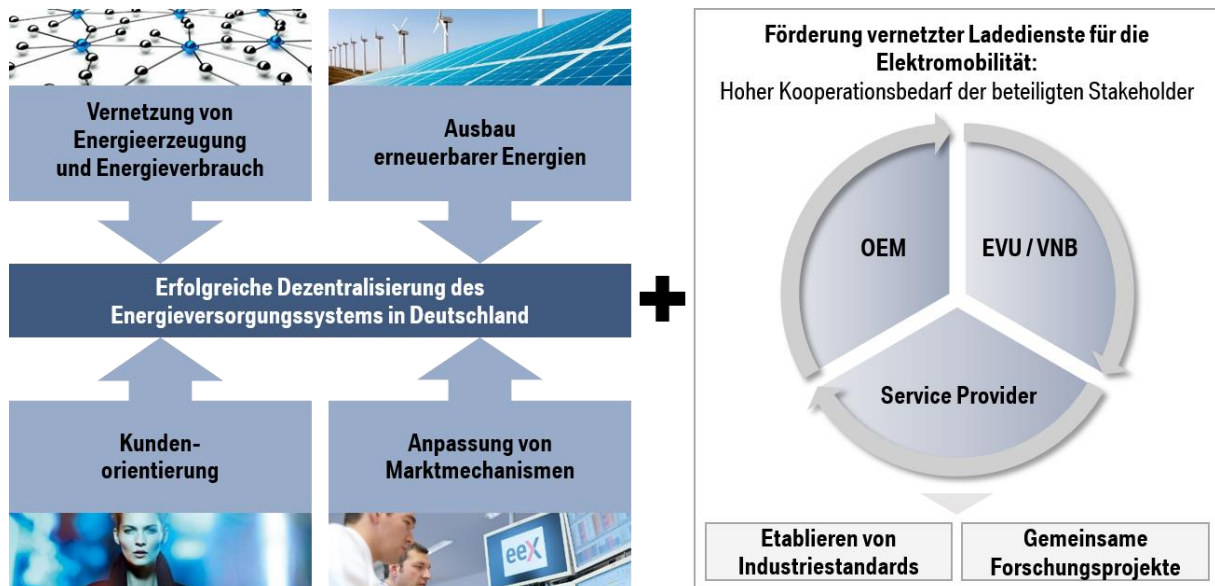


Abbildung 2-11: Handlungsfelder für die erfolgreiche Dezentralisierung des deutschen Energieversorgungssystems sowie die Förderung vernetzter Ladedienste (eigene Darstellung)

VERNETZUNG VON ENERGIEERZEUGUNG UND ENERGIEVERBRAUCH: Das Etablieren und Verbreiten einer geeigneten Kommunikationsinfrastruktur ist eine Grundvoraussetzung (Enabler) innerhalb eines verteilten Energiesystems, die kontinuierlich fortschreitet (z.B. flächendeckender Rollout von Smart-Metern). Es gibt großen Handlungsbedarf im Bereich von Sicherheitstechnologien (Ausfallsicherer Betrieb, robuste Kommunikation und IT Security), da ein sicherer Betrieb zu jedem Zeitpunkt gewährleistet werden muss. Nur ein weitverbreiteter Industriestandard zur Erhebung, Verarbeitung, Aggregation und Validierung von Daten auf allen Ebenen des Energiesystems kann dies sicherstellen und ist gemeinschaftlich zu entwickeln. (DoA: M = 4.58; SD = 0.64)

AUSBAU ERNEUERBARER ENERGIEN: Regionale, saisonale und tageszeitabhängige Schwankungen in der Energiebereitstellung können durch den zunehmenden Ausbau verteilter, erneuerbarer Energiequellen ausgeglichen werden. Gleichzeitig werden Möglichkeiten zur Speicherung von Energie zwingend erforderlich. (DoA: M = 4.50; SD = 0.65)

KUNDENORIENTIERUNG: Langfristig können sich verteilte Energiestrukturen nur dann entwickeln und durchsetzen, wenn der Endkunde in diesen Prozess aktiv miteinbezogen wird. Ein künftiger Markt vernetzter Ladedienste muss transparente und für den Anwender leicht verständliche Produkte anbieten, die ihm einen unmittelbaren finanziellen und/oder ideellen Mehrwert stiften. (DoA: M = 4.50; SD = 0.50)

¹⁰ Der Zustimmungsggrad (DoA – Degree of Agreement) wurde im Rahmen der Delphi-Analyse mittels einer fünfstufigen Likert-Skala ermittelt ([1]: „Ich stimme nicht zu“; [2]: „Ich stimme eher nicht zu“; [3]: „Weder noch“; [4]: „Ich stimme eher zu“; [5]: „Ich stimme zu“).

ANPASSUNG VON MARKTMECHANISMEN: Bestehende Marktmechanismen basieren vorwiegend auf Prämissen und schaffen in Teilen Fehlanreize für nicht nachhaltige Investitionen in dezentrale Energieerzeugungsanlagen und -verbraucher. Derzeit beeinflusst eine Vielzahl an Stellhebeln das technische und ökonomische Potenzial dieser Investitionen. Künftige Marktstrukturen müssen den strukturellen Wandel hin zu erneuerbaren Energien und verteilten Energiesystemen beschleunigen. (DoA: $M = 4.42$; $SD = 0.49$)

Aus den genannten Herausforderungen ergeben sich zwei potenzielle Bereiche für Kooperationen zwischen den beteiligten Stakeholdern. Eine davon ist die Definition und erfolgreiche Einführung von Industriestandards. Hierfür sind zwei unterschiedliche Ansätze denkbar: Entweder verständigen sich alle Stakeholder auf eine gemeinsame Vorgehensweise oder der einflussreichste bzw. die einflussreichsten unter ihnen geben den Industriestandard mit Hilfe ihrer Marktmacht vor. Im Rahmen der Interviews konnte das letztere als das wahrscheinlichste Szenario identifiziert werden, da bislang keine vielversprechenden Kooperationsmodelle erkennbar sind. Eine andere Herausforderung und ein damit verbundener Handlungsbedarf ergibt sich aus zahlreichen Forschungsprojekten, die im Moment – über alle Ebenen des dezentralen Energiesystems hinweg – durchgeführt werden. Trotz der großen Zahl angelegter Studien mangelt es an Forschungsergebnissen größeren Maßstabs mit entsprechend allgemeingültiger Aussagekraft. Gründe hierfür sind die durchschnittliche Finanzmittelausstattung von Startup-Unternehmen und Service Providern. Gleichzeitig ist die Investitions- und Forschungsbereitschaft etablierter Unternehmen noch immer vergleichsweise gering.

Obwohl mögliche Kooperationen zahlreiche Chancen und Vorteile für die beteiligten Unternehmen versprechen, hat keiner der Experten diese als kritischen Erfolgsfaktor für sein eigenes Geschäftsmodell bewertet (DoA: $M = 3.10$; $SD = 0.54$). Im Rahmen möglicher Kooperationsprojekte ziehen sie es nicht zuletzt deshalb vor, eher einen inhaltlichen als einen finanziellen Beitrag zu leisten.

2.4.2 Identifikation vernetzter Ladedienste

Aus den Experteninterviews konnten sieben vielversprechende Anwendungsfälle für vernetzte Ladedienste für Elektrofahrzeuge identifiziert werden (vgl. Abbildung 2-12). Sie werden im Folgenden beschrieben.

LOKALES ENERGIEMANAGEMENT: Kunden verlangen eine kosteneffiziente, hochverfügbare und – wo erforderlich – autarke Energieversorgung. Diese Eigenschaften sind leicht verständlich und bereiten einen direkten, wahrnehmbaren Nutzen. EVs, die in das lokale Ökosystem des Kunden eingebunden sind, können zum Erreichen dieser Optimierungsziele beitragen, indem sie zum Beispiel variable, tageszeitabhängige Stromtarife für eine Tarifoptimierung nutzen („Smart Sourcing“). Gleichzeitig können sie den Eigenverbrauch lokal erzeugter Energie (z.B. Photovoltaik-Energie) steigern (Integration erneuerbarer Energiequellen). Auch der Autarkiegrad kann durch intelligentes Energiemanagement unter Einbezug von Wärmepumpen, stationären Energiespeichern oder weiteren technischen Einheiten erhöht werden („Demand Side Management“).

VNB NETZDIENSTLEISTUNGEN: EVs sind als mobile Energiespeichersysteme dazu in der Lage, Versorgungssicherheit, Spannungsqualität und Netzfrequenzstabilität in Verteilnetzen sicherzustellen. Das

Potenzial dieses Usecases hängt stark von den Charakteristika jedes einzelnen Verteilnetzes ab. Gleichzeitig muss die erforderliche Verfügbarkeit der mit dem Netzstrang verbundenen EVs zuverlässig sichergestellt werden. Da dieser Usecase mit zahlreichen alternativen Technologien zur Bereitstellung von Netzdienstleistungen für den VNB konkurriert, ist sein technischer und ökonomischer Beitrag bislang zu vernachlässigen.

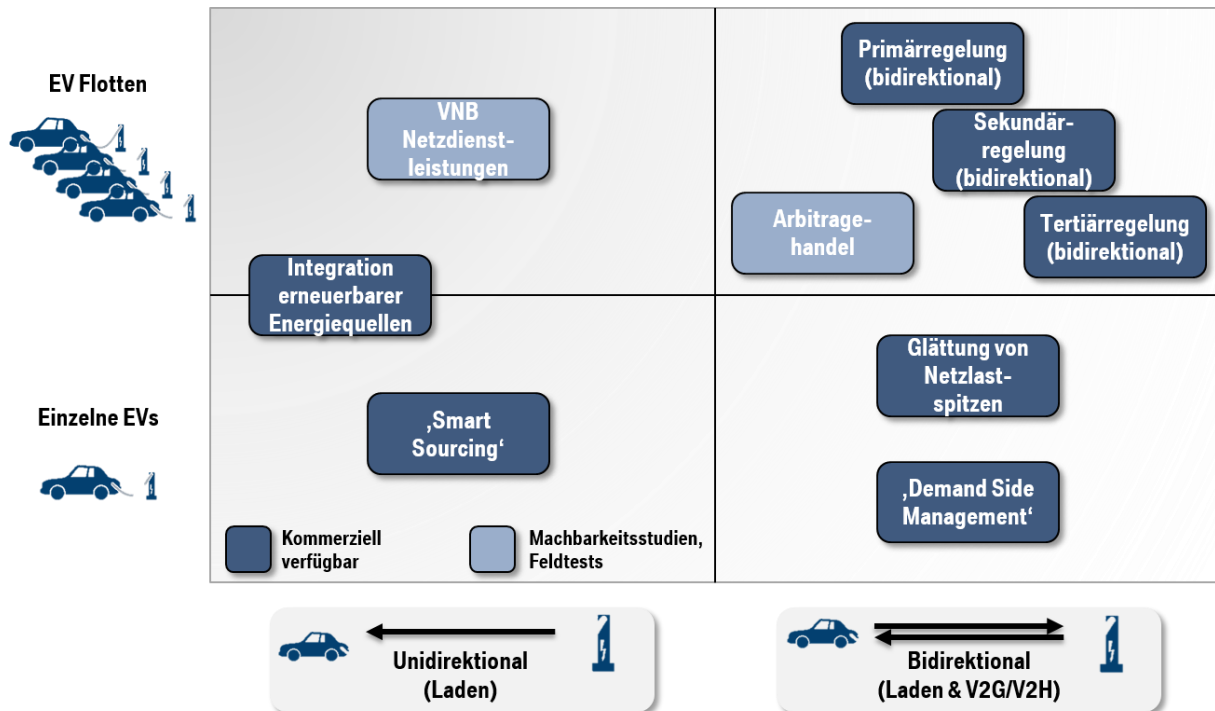


Abbildung 2-12: Usecases vernetzter Ladedienste mit hohem technischen und wirtschaftlichen Potenzial (eigene Darstellung)

REGELLEISTUNGSBEREITSTELLUNG: Schon heute kann Primärregelung, bereitgestellt von kleineren EV-Flotten, profitabel vermarktet werden. Aufgrund ihrer fragmentierten Anbindung innerhalb der Energieversorgungsstruktur und ihrer vorteilhaften Kostenstrukturen, versprechen diese Flotten, neue und vielversprechende Nischen innerhalb des Regelleistungsmarktes besetzen zu können. Dies umfasst neben der Primärregelung auch die Sekundär- und Tertiärregelung. Es herrscht große Unsicherheit im Hinblick auf die künftige Entwicklung relevanter Marktmechanismen. Gewinnmargen, Präqualifikationskosten und technische Aufwände hängen stark davon ab.

GLÄTTUNG VON NETZLASTSPITZEN: Ladedienste zur Glättung von Netzlastspitzen sollten für dedizierte Verteilnetzstränge bzw. Netzanschlusspunkte angeboten werden (einzelne Haushalte). Durch selektives Laden oder Entladen des Batteriespeichers von EVs können Spitzenlasten abgemildert und Netzausbau vermieden werden. Ebenso wie für oben genannte VNB Netzdienstleistungen ist auch hier unumgänglich, dass die Verfügbarkeit der mit dem Netzanschlusspunkt verbundenen EVs zuverlässig und ausreichend sein muss.

ARBITRAGEHANDEL: Der Spotmarkt an der Europäischen Strombörse (EEX) handelt mit elektrischer Energie für kurzfristige Bedarfe. Als Momentaufnahme ist es derzeit profitabler, das Lastverschiebungspotenzial von EVs hier anzubieten als etwa für Tertiärregelung. Darüber hinaus erfordert der Spotmarkt keinerlei Präqualifikation. Auch wenn die erzielbaren Gewinnmargen vergleichsweise gering sind, können Restflexibilitäten aus Anwendungsfällen höherer Priorität hierfür genutzt werden.

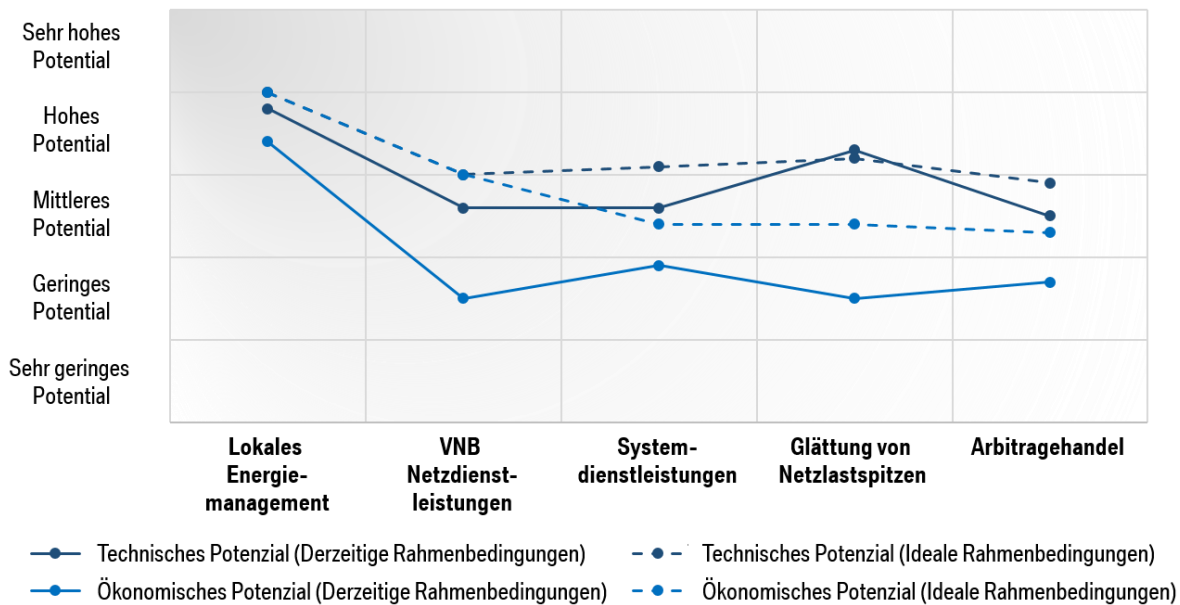


Abbildung 2-13: Priorisierung des technischen und ökonomischen Potenzials der identifizierten vernetzten Ladedienste (eigene Darstellung)

Die Ergebnisse der explorativen Studie zeigen deutlich, dass vernetzte Ladedienste nicht nur mit größeren EV Flotten realisierbar sind. Auch einzelne Fahrzeuge können zum Beispiel durch Optimierung des Energieverbrauchs einzelner oder einiger weniger Haushalte einen Mehrwert stiften. Nichtsdestotrotz lässt sich das volle technische und ökonomische Potenzial vernetzter Ladedienste erst dann erschließen, wenn sie über eine größere Fahrzeugflotte verfügen können. Gleichzeitig kann dieses Potenzial noch weiter ausgereizt werden, wenn eine signifikante Anzahl der Fahrzeuge auch für bidirektionales Laden befähigt werden (vgl. Abbildung 2-12). Abbildung 2-13 quantifiziert das technische und ökonomische Potenzial jedes einzelnen Usecases. Hierbei differenzierten die befragten Experten jeweils zwischen den derzeitigen und den ihrer Meinung nach idealen Rahmenbedingungen, sowohl im Hinblick auf technische Voraussetzungen als auch auf Marktmechanismen.

2.4.3 Kritische Erfolgsfaktoren

Im Verlauf der Durchführung der Experteninterviews sowie im Rahmen der Delphi-Untersuchung zeigten sich zahlreiche konfliktäre Interessen im Hinblick auf die künftige strategische Positionierung der beteiligten Stakeholder. So ist die Rollenzuordnung der Energieversorger, Service Provider und OEMs durch einen intensiven Wettbewerb geprägt. Lediglich die Aufgabe des Verteilnetzbetreibers – das Sicherstellen der Versorgungssicherheit – wird unangetastet bleiben.

Dennoch herrschte breiter Konsens unter den Experten im Hinblick auf die Definition der zu besetzenden Schlüsselrollen innerhalb eines Marktes vernetzter Ladedienste. Abbildung 2-14 illustriert diese Rollen und quantifiziert ihre Zuordnung, indem sie den jeweiligen DoA des Expertenkollektivs darstellt. Ein hoher DoA korreliert dabei mit der favorisierten strategischen Positionierung des Stakeholders. Die Ergebnisse empfehlen dem OEM, sich auf die Mobilitätsbedürfnisse des Kunden zu fokussieren, ebenso wie auf die zugehörige technische Infrastruktur und die Integration des EVs in ein Produktangebot ver-

netzter Ladedienste. Gleichzeitig obliegt es den Serviceprovidern, ihre Expertise im Bereich des Energiemanagements auszubauen, IT-Backbone Architekturen zu designen und die Brücke von der Automobil- zur Energiewirtschaft zu schlagen. Bislang kristallisiert sich jedoch noch nicht heraus, welcher der Stakeholder künftig an der Schnittstelle zum Kunden agieren wird. Dies spiegelt sich auch in der derzeit uneinheitlichen Marktsituation mit verschiedensten Anbietern wider.

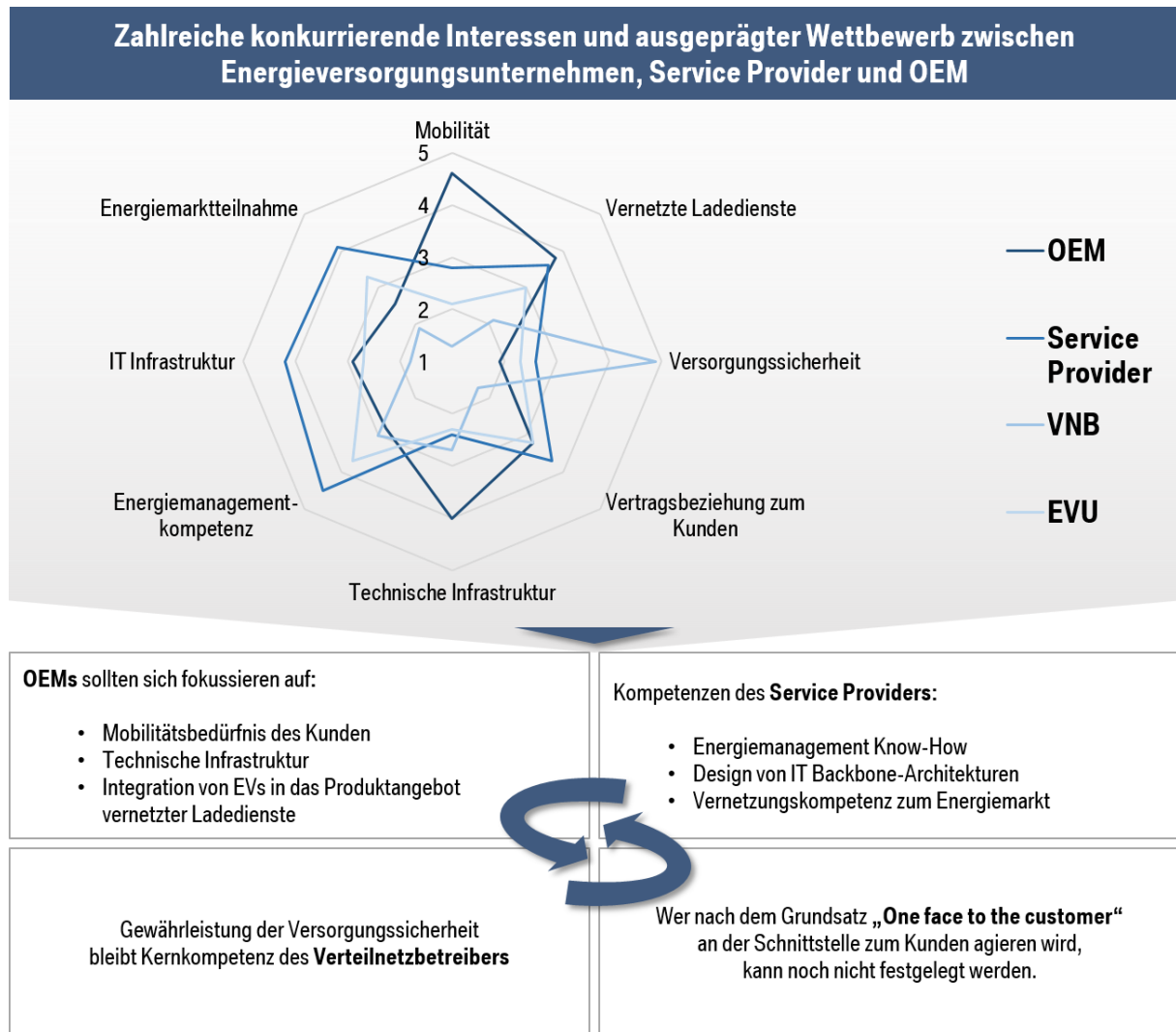


Abbildung 2-14: Schlüsselrollen innerhalb eines Marktes vernetzter Ladedienste und ihre Zuordnung zu den beteiligten Stakeholdern (eigene Darstellung)

Obwohl vielversprechende Usecases für vernetzte Ladedienste identifiziert werden konnten und eine gangbare strategische Positionierung der Stakeholder hergeleitet wurde, hängt der Erfolg künftiger Produktangebote von weiteren Aspekten ab. Dabei konnten die folgenden kritischen Erfolgsfaktoren identifiziert werden:

- Robuste Batterietechnologie und Leistungselektronik für eine erweiterte Lebensdauer von Elektrofahrzeugen (DoA: M = 4.30; SD = 0.78)
- Erfolgreiches Etablieren von Industriestandards für Ladekommunikations- und Leistungsschnittstellen (DoA: M = 4.90; SD = 0.30)

- Kundenbereitschaft zur Anpassung ihres individuellen Mobilitätsverhaltens im Einklang mit den Anforderungen vernetzter Ladedienste (DoA: $M = 4.00$; $SD = 1.41$)
- Maximierung des Lastverschiebungspotenzials von EV-Flotten durch höhere Ladeleistungen und bidirektionales Laden (DoA: $M = 4.50$; $SD = 0.50$)
- Wandlungsfähigkeit und Veränderungsbereitschaft etablierter Unternehmen im Markt (DoA: $M = 3.80$; $SD = 1.17$)
- Zuverlässigkeit, Sicherheit und Verfügbarkeit einer verteilten technischen Infrastruktur für vernetzte Ladedienste (DoA: $M = 4.50$; $SD = 0.81$)
- Hinreichender Markterfolg der Elektromobilität zur Gewährleistung ausreichender Flottengrößen (DoA: $M = 3.80$; $SD = 0.98$)
- Anpassung von Marktstrukturen und politischen Rahmenbedingungen (DoA: $M = 4.30$; $SD = 0.78$)
- Ausreichendes Maß an digitaler Vernetzung (EV, Ladeinfrastruktur, Smart Meter, etc.) (DoA: $M = 4.00$; $SD = 0.89$)
- Wettbewerbsfähigkeit gegenüber alternativen Technologien (z.B. Wärmepumpen oder stationäre Batteriespeichersysteme) (DoA: $M = 4.00$; $SD = 1.00$)

2.4.4 Handlungsbedarfe für OEMs

Die derzeitige Marktdurchdringung von EVs zusammen mit ihrer Lade- und Kommunikationsinfrastruktur reicht nicht aus, um einige der genannten Anwendungsfälle kommerziell anzubieten. Der Markt vernetzter Ladedienste wird sich aller Voraussicht nach Schritt für Schritt entwickeln.

Elektrofahrzeugflotten, die groß genug sind, um einen Beitrag im verteilten Energiesystem zu leisten, können sich nur dann etablieren, wenn Kunden auch dazu bereit sind, in die erforderliche Infrastruktur zu investieren. Innerhalb des Expertenkollektivs herrschte Einigkeit, dass bislang nur lokale Energiemanagementdienstleistungen für klein- und mittelskalige Anwendungen ausreichend Anreiz für den Endkunden bieten. Zunächst scheinen Usecases, wie die Maximierung des eigenen Grades an Energieautarkie durch Optimierung des Eigenverbrauches erneuerbarer Energien, gangbar. Nachstehend können auch unmittelbare Dienste für den Endkunden sichergestellt werden. Letztendlich können Serviceprovider auf dieser Basis fortschreitend auch weitere Usecases durch Aggregation größerer Flotten implementieren.



Abbildung 2-15: Voraussetzungen für das Einbinden von Elektrofahrzeugen in den Markt vernetzter Ladedienste (eigene Darstellung)

Die derzeitige Marktsituation (vgl. 1.1.3) zeigt, dass eine gemeinsame gängige Praxis und standardisierte Anwendungsfälle über alle Stakeholder hinweg unumgänglich sind, um eine Flotte von EVs zu

schaffen, die für vernetzte Ladedienste zugänglich ist. Die kritischsten Einflussfaktoren hierfür sind (vgl. Abbildung 2-15):

- Marktregularien müssen Vergütungsmechanismen bereitstellen, die für vernetzte Ladedienste geeignet und zugänglich sind.
- Vernetzte Ladedienste müssen in der Lage sein, mit alternativen Möglichkeiten zum Speichern von Energie zu konkurrieren (z.B. stationäre Batteriespeichersysteme).
- Die Marktdurchdringung der Elektrofahrzeuge muss eine ausreichende Zuverlässigkeit und Sicherheitsreserve im Hinblick auf die verfügbare Lade- und Entladeleistung sowie Kapazität ermöglichen.
- Kunden müssen bereit sein, einen Teil ihrer Flexibilität beim Laden ihres EVs gegen zum Beispiel monetäre Anreize einzutauschen.

Da Service Provider und OEMs in zunehmendem Maße den Energiemarkt erschließen, etablieren sich im Moment neue Zusammenarbeitsmodelle zwischen bestehenden und neu aufkommenden Marktteilnehmern. Die Kundenschnittstelle ist nicht länger das Privileg der Energieversorgungsunternehmen. Immer häufiger treten OEMs und Service Provider mit ihren Energiemanagementprodukten (inkl. Vernetzter Ladedienste für EVs) an den Endkunden heran. Gleichzeitig zählen Übertragungs- und Verteilnetzbetreiber bei Abnahme von Systemdienstleistungen zu ihren Kunden (vgl. Abbildung 2-16).

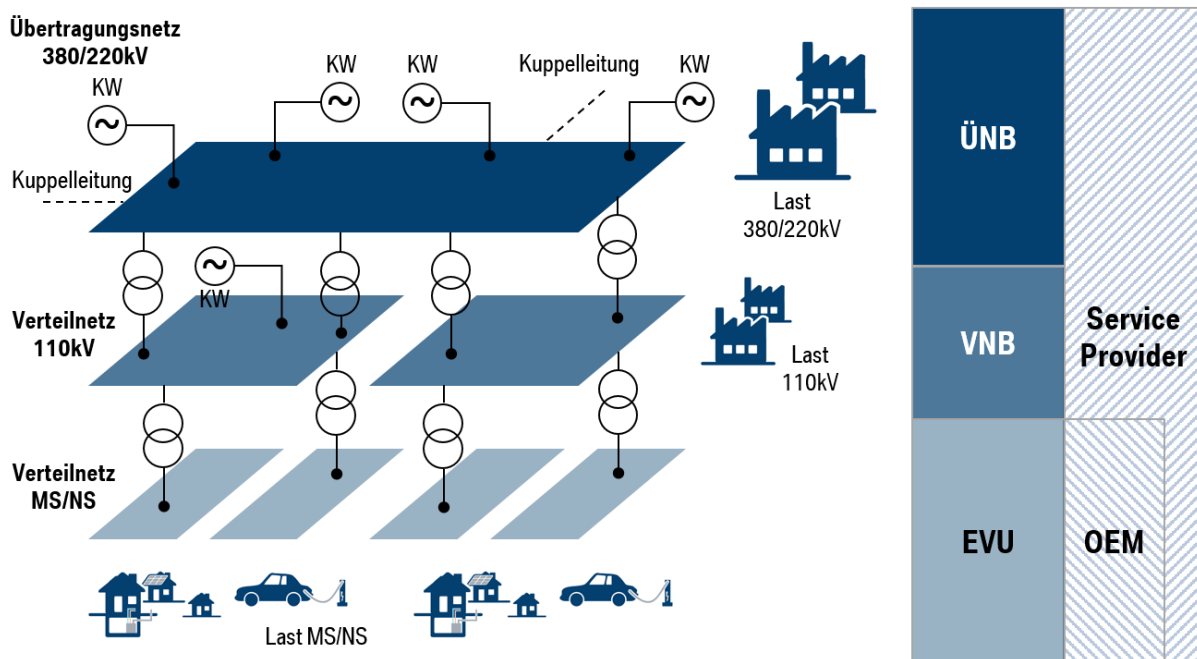


Abbildung 2-16: Konkurrierende Marktpositionierung von Service Providern und OEMs zu etablierten Marktteilnehmern (eigene Darstellung)

Durch Aggregation von EVs und weiterer verteilter technischer Einheiten (z.B. thermische Speicher oder Wärmepumpen) sind Service Provider mittelfristig am ehesten dazu in der Lage, mit bestehenden Technologien in den Wettbewerb zu treten. Um dem Ziel eines intelligenten dezentralen Energiesystems näher zu kommen, sollten OEMs ihren spezifischen Beitrag durch die technische Befähigung der Fahrzeuge zusammen mit ihrer Lade- und IT-Infrastruktur maximieren (vgl. Kapitel 3). Standardisierte

Schnittstellen, die eine Beeinflussung des Ladeverhaltens der Elektrofahrzeuge durch Dritte ermöglichen, sind bereitzustellen.

2.5 Diskussion

Die bisherigen Forschungsergebnisse legen lokale Energiemanagementkonzepte als gangbaren Weg zur erfolgreichen Markteinführung vernetzter Ladedienste nahe. Zu einem späteren Zeitpunkt können verbleibende Restflexibilitäten während des Ladens der Fahrzeuge für großskalige Anwendungen wie zum Beispiel Regelleistungsprodukte eingesetzt werden.

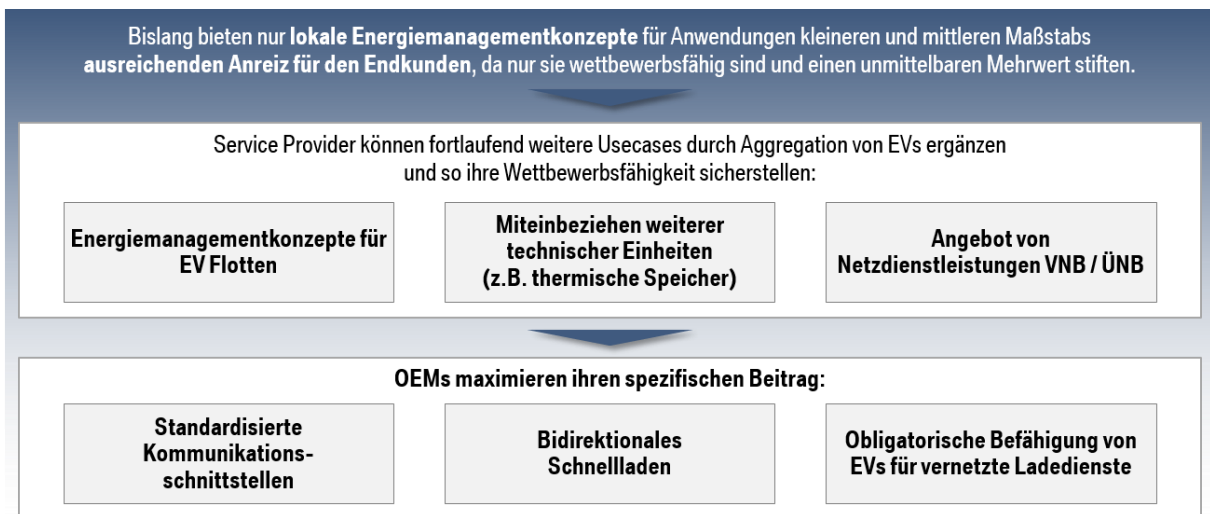


Abbildung 2-17: Handlungsbedarfe für Service Provider und OEMs (eigene Darstellung)

Konkret obliegt es den OEMs, höhere Ladeleistungen zu ermöglichen und ihre Fahrzeuge zusammen mit der zugehörigen Infrastruktur für ein Rückspeisen in das Energiesystem zu befähigen. Ziel muss es sein, jedes produzierte EV – unabhängig von Ausstattungsvarianten – mit geeigneter Informationstechnik und bidirektionalen Schnellladeinterfaces auszustatten (vgl. Abbildung 2-17).

An dieser Stelle sei einordnend darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse des vorliegenden Kapitels in wesentlichen Teilen durch eine umfassende Metastudie im Auftrag des VDE bestätigt werden (VDE Forum Netztechnik/Netzbetrieb, 2018). Diese betrachtet Herausforderungen und Handlungsbedarfe zur Netzintegration der Elektromobilität im Schwerpunkt nicht aus der Perspektive des OEMs, sondern aus der der Netzbetreiber, und erarbeitet Empfehlungen zur technischen Regelsetzung und Regulierung. In Summe ergibt sich ein stimmiges Konzept für das Zusammenspiel der betrachteten Stakeholder.

3. Vernetzte Ladedienste als Produkt-Service-System

Das vorliegende Kapitel setzt die identifizierten vernetzten Ladedienste und das EV als technische Einheit mit Hilfe eines Systemmodells in ein Verhältnis. Jedes System ist eine Gesamtheit von Elementen, zwischen denen Beziehungen bestehen. Durch ihre Abgrenzung zur Umwelt – sie erfolgt entsprechend des Untersuchungsinteresses und ist nicht objektiv vorgegeben – können sie als Einheit behandelt werden. Dabei haben sich sogenannte Systemmodelle als brauchbar erwiesen, um komplexe Erscheinungen besser verstehen, gestalten und steuern zu können.

Im Besonderen integrieren Produkt-Service-Systeme (PSS) sowohl Produkt- (EV) als auch Serviceelemente (vernetzter Ladedienst) in ein Modell und finden im Rahmen des Forschungsvorhabens ihre Anwendung. Sie sind die Basis für eine verbesserte Wettbewerbsdifferenzierung, eine Steigerung der Kundenzufriedenheit sowie eine höhere Produktnachhaltigkeit. Dabei soll im Folgenden nicht zuletzt auf die zugrundeliegende Technologie ein besonderes Augenmerk gelegt werden. Hohes Innovationspotenzial baut in vielen Fällen auf disruptiven Technologien und ihrer differenzierten Betrachtung auf. (Schenkl, Sauer, & Mörtl, 2014)

Dem gewählten Ansatz liegt zugrunde, dass Technologien und darauf aufbauende Produkte und Services in verschiedenster Hinsicht interagieren. So ermöglichen neue Technologien oft eine Verbesserung oder Neuentwicklung von Produkten. Umgekehrt zwingen das Feedback oder neue Anforderungen der Kunden Unternehmen dazu, neue Technologien zu entwickeln und einzusetzen. Jede Technologiestrategie sollte daher sowohl technologische als auch produkt- und serviceorientierte Lösungsräume in Betracht ziehen. Es existieren verschiedene Methoden, die in der Lage sind, hierbei zu unterstützen. Ein Beispiel hierfür ist das sogenannte „Technology Roadmapping“ – ein Vorgehen zur Strategiefindung, das die Reife und zeitliche Abfolge eingesetzter Technologien aufgreift, Lernprozesse stimuliert und in der Lage ist, Markteinführungszeiten zu verkürzen. Dieses wird als Gedankenmodell nun aufgegriffen. (Groenveld, 1997)

3.1 PSS Schichtmodell als technologiebasiertes Rahmenkonzept

PSS sind ein Hilfsmittel für Unternehmen, um auf verschiedene Herausforderungen wie steigende Kundenerwartungen im Hinblick auf Kosten und Qualität zu reagieren. Grundlage hierfür ist die Integration von Service- und Produktkomponenten in ein gesamthaftes Marktangebot (Schenkl, Behncke, Hepperle, Langer, & Lindemann, 2013). Sie lassen sich in drei Typen unterteilen: Produktorientierte PSS umfassen produktbezogene Services sowie Beratungsleistungen. Nutzungsorientierte PSS arbeiten mit Miet-, Leasing- oder Flottenmodellen. Ergebnisorientierte PSS zielen auf die Erbringung und Abrechnung von einzelnen Aktivitäten, Services oder funktionalen Ergebnissen ab (Tucker, 2004).

Vor allem durch die größere Anzahl an beteiligten Domänen erhöht sich die Komplexität bei der Entwicklung von PSS. Um diese Komplexität zu beherrschen, sind integrierte Ansätze zu deren Gestaltung erforderlich (Omann, 2003). Von besonderer Bedeutung für die Entwicklung und Innovation von PSS ist die zugrundeliegende Technologie¹¹. Orientiert man sich an der serviceorientierten Marketingtheorie, die die Anwendung von spezialisierten Fähigkeiten und dem zugrundeliegenden Wissen als zentralen

¹¹ Eine „Technologie“ ist definiert als das Wissen zur Lösung technischer Problemstellungen (Bullinger, 1994).

Produktbestandteil bezeichnet, so wird die Bedeutung einer Technologie deutlich (Vargo & Lusch, 2004).

Das im Folgenden beschriebene und im Rahmen der Arbeit angewendete Systemmodell für PSS nach Schenkl, et al. (2014) ermöglicht eine integrierte Systembeschreibung durch Modellierung der gestaltenden Bestandteile, wobei ein besonderes Augenmerk auf die zugrundeliegende Technologie gelegt werden soll. Hierfür ist der klassische Technologiebegriff über den reinen Produktbezug hinaus auf das gesamte PSS zu erweitern. Methodisch kann das Modell so zur Analyse von PSS genutzt werden und Innovationspotenziale identifizieren. Das Ziel ist das Bereitstellen einer abstrakten Beschreibung von PSS mit Hilfe von drei Schichten – der Ziele-, Lösungs- sowie Technologieschicht (vgl. Abbildung 3-1). Dabei nimmt die Wahrnehmbarkeit und Relevanz für den Kunden aufsteigend mit den Schichten zu.

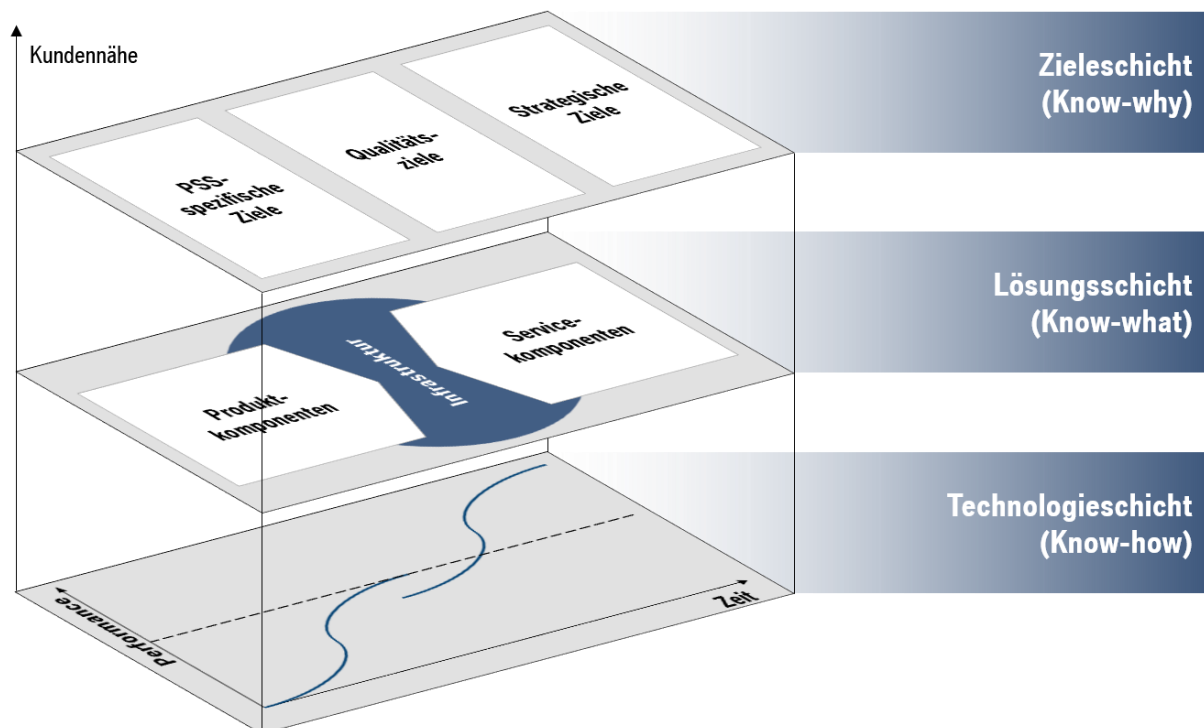


Abbildung 3-1: PSS Schichtenmodell (eigene Darstellung in Anlehnung an Schenkl et al. (2014))

ZIELESCHICHT (KNOW-WHY): Die Zieleschicht setzt sich aus drei Säulen zusammen – den PSS-spezifischen Zielen, den Qualitätszielen und den strategischen Zielen. Erstere umfassen den Mehrwert, den ein PSS für sowohl den Anbieter als auch den Kunden stiftet. Dazu gehören das Erarbeiten einer höheren Kundenloyalität (Tucker, 2004), eine Stärkung der Kundenbindung (Vasanth, Roy, Lelah, & Brissaud, 2012), eine klarere Wettbewerbsdifferenzierung (Baines, et al., 2007), zusätzliche Umsatzsteigerungen (Meier, Roy, & Seliger, 2010), neue Marktchancen (Aurich, Mannweiler, & Schweitzer, 2010) oder auch mehr Nachhaltigkeit (Tukker & Tischner, 2006) (Velamuri, Neyer, & Möslin, 2011). Qualitätsziele können in acht Dimensionen unterteilt werden – Performance, Funktionalität, Zuverlässigkeit, Konformität, Haltbarkeit, Gebrauchstauglichkeit, Ästhetik und wahrgenommene Qualität (Garvin, 1987). Strategische Ziele können das Generieren konstanter Umsatzerlöse, „One face to the customer“-Ansätze oder auch spezifische Technologiestrategien sein (vgl. Kapitel 2.4.3).

LÖSUNGSSCHICHT (KNOW-WHAT): Diese Schicht beschreibt die konkreten Komponenten des PSS (vgl. Abbildung 3-2). Das verwendete Modell zur Beschreibung der Produktkomponenten basiert auf

dem Münchner Vorgehensmodell (MVM) zur Produktentwicklung, welches sich aus drei Abstraktionsebenen zusammensetzt – den Produktfunktionen, ihren Funktionsprinzipien sowie den Produktkomponenten (Ponn & Lindemann, 2011). Auch für Services kann ein bestehendes Beschreibungsmodell herangezogen werden. Bullinger et al. (2003) modellieren Services mit Hilfe von Produkt-, Prozess- und Ressourcenmodellen in drei Dimensionen. Das Rahmenkonzept von Schenkl et al. (2014) integriert diese beiden beschreibenden Ansätze zu einem umfassenden PSS-Lösungsmodell. Abbildung 3-2 beschreibt, wie sich die Modelle der Produkt- und Servicekomponenten zusammensetzen und verweist auf die zugehörige Infrastruktur, die ihre Elemente verbindet.



Abbildung 3-2: Lösungsschicht innerhalb eines Produkt-Service-Systems (eigene Darstellung in Anlehnung an Schenkl et al. (2014))

TECHNOLOGIESCHICHT (KNOW-HOW): Ein zentraler Bestandteil von PSS sind neue und nachhaltigere Technologien – sie ermöglichen Performancesteigerungen und eine Differenzierung zum Wettbewerb. Das Potenzial und die Vorzüge einer Technologie können jedoch nur dann ausgereizt werden, wenn sie in ein wettbewerbsfähiges PSS-Konzept eingebettet werden. Eine entscheidende Rolle spielen in der Regel Schlüsseltechnologien oder Technologien, die die Performance einer PSS-Funktion limitieren (Löffler & Boutellier, 2009). Sie können entweder Bestandteil des Produktes, des Services oder auch der Infrastruktur sein. In jedem dieser Fälle existieren produktrelevante technische Restriktionen, die sich negativ auf wettbewerbsdifferenzierende Merkmale auswirken können. Die genannten limitierenden Faktoren können oft nur dann überwunden werden, wenn technische Innovationen auch gleichzeitig in ein PSS eingebettet werden.

Zahlreiche Beispiele aus der unternehmerischen Praxis belegen, dass die Kommerzialisierung disruptiver Technologien oft scheitert, wenn diese nicht mit neuartigen Businessmodellen verknüpft werden (Christensen, Grossmann, & Hwang, 2009). PSS können Technologien verbessern oder ihnen sogar zum Durchbruch verhelfen. Ersterer Sachverhalt wird in Abbildung 3-3 (a) illustriert. Die blaue Linie des dargestellten Kiviatdiagramms beschreibt mit Hilfe der acht Qualitätsdimensionen nach Garvin die Charakteristika eines rein technischen Produktes (Garvin, 1987). Dessen Performancepotenzial wird durch die hohe Reife der zugrundeliegenden Schlüsseltechnologie maßgeblich limitiert. Erst das Einbinden in ein Serviceangebot ermöglicht eine Steigerung des Kundenwertes des Produktes (Baines, et al., 2007). Eine weitere Performancesteigerung des technischen Produktes wird oft erst durch den Betrieb unter Anwendung des Know-hows spezialisierter PSS-Provider ermöglicht (Mont, 2002).

Die Reife einer Technologie wird mit Hilfe des sogenannten S-Kurven-Phänomens dargestellt (Christensen, 1992). Oft haben neue und substituierende Technologien ein geringeres Performancelevel

als die bereits etablierte Technologie (Sood & Tellis, 2005). Diese Performancelücke kann durch ihre Integration in ein PSS überbrückt werden (vgl. Abbildung 3-3 (b)).

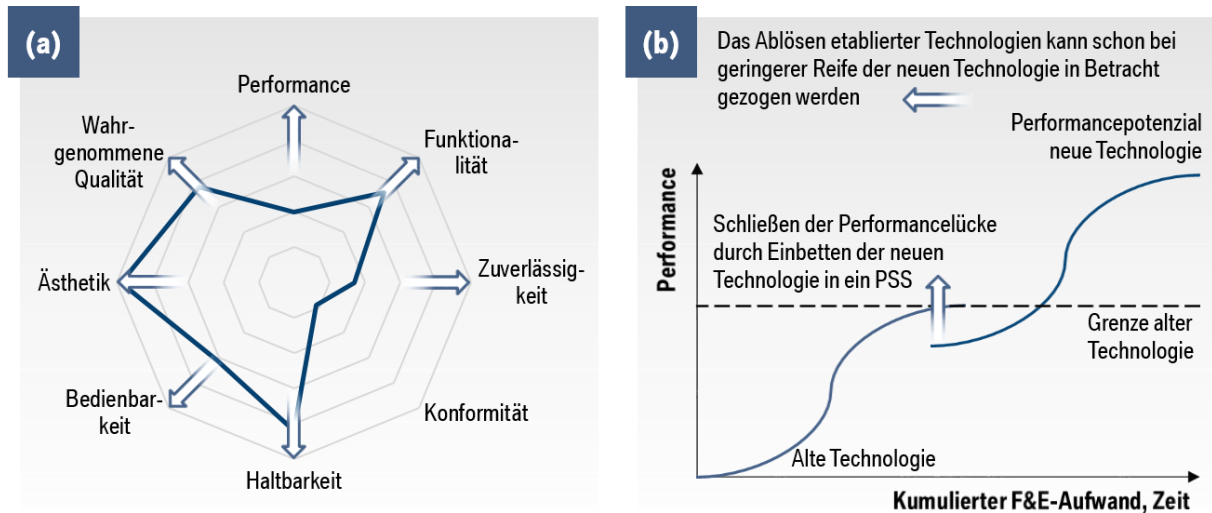


Abbildung 3-3: PSS sind dazu in der Lage, Technologien entweder (a) zu verbessern oder (b) ihnen zum Durchbruch zu verhelfen (eigene Darstellung in Anlehnung an Schenkl et al. (2014))

Als Analogie zu den bestehenden Ansätzen, dass entweder das technologische Angebot oder die Nachfrage des Marktes als Stimulatoren fungieren („Market push/pull“), legt das vorliegende Rahmenkonzept sowohl einen „top-down“ als auch einen „bottom-up“ Ansatz nahe. Diese werden im Folgenden kurz erläutert.

Wird der „top-down“ Innovationspfad gewählt, werden zunächst die Funktionen des Produktes, seiner Services und der notwendigen Infrastruktur definiert. Erst dann werden passende Technologien ausgewählt. Die Lösungsschicht bestimmt das Vorgehen: Während neue Funktionen und nichtfunktionale Anforderungen definiert werden, nimmt die Technologie die Rolle des Enablers ein. Sie eröffnet den notwendigen Lösungsraum. Die Lösungsschicht ist ursächlich für die Notwendigkeit des Einsatzes einer neuen Technologie verantwortlich. Diese stellt wiederum sicher, dass die geforderte Funktionalität innerhalb der Technologieschicht dargestellt werden kann. Der „top-down“ Innovationspfad findet meist bei evolutionären Innovationsprojekten seine Anwendung.

Nicht seltener werden aber auch neuartige Technologien entwickelt, die neues Potenzial zur Lösung offener Problemstellungen mit sich bringen. Der Impuls zur Differenzierung resultiert aus dem Know-how. Nun bestimmt die Technologieschicht das Vorgehen: Ebenso wie beim „top-down“ Innovationspfad, ist die Technologie auch beim „bottom-up“ Ansatz der zentrale Enabler. Anders als bisher, erlaubt erst ihr Einsatz im Rahmen eines PSS, sie im Markt zu etablieren.

Aufkommende Technologien, wie die im Bereich der Elektromobilität, befinden sich in der Regel in einer frühen Phase ihres Technologielebenszyklus (vgl. Abbildung 3-3 (b)). Sie sind oft disruptiv aber gleichzeitig nicht ausgereift. Daher gehen sie zwar mit neuen Potenzialen einher, sind aber kaum dazu in der Lage, bestehende Performancekriterien zu erfüllen (Christensen, 1997). Die Aufgabe eines PSS im „bottom-up“ Innovationspfad ist es, einer vielversprechenden Technologie zu einer wettbewerbsfähigen Ausgangsposition zu verhelfen. Auf Basis einer Charakterisierung der Technologie auf unterster

Ebene im PSS Schichtenmodell können technologische Limitierungen oder funktionale Einschränkungen abgeleitet werden. Aufbauend auf den resultierenden Ergebnissen sind Performancemaßnahmen zu erarbeiten, die innerhalb der Zieleschicht einen ausreichend großen Kundenmehrwert ermöglichen.

Insgesamt eröffnet der „bottom-up“ Innovationspfad eine große Chance für Innovationen, da entweder neue Kundenanforderungen geschaffen werden oder bestehende in höherem Maße erfüllt werden können. Dabei setzen die technologischen Vorreiter zumeist Standards und prägen neue Arten der Nutzung eines Produktes. Erst die Lösungsschicht ermöglicht den Einsatz der Technologie durch Kombination von Produktkomponenten, Services und ihrer Infrastrukturelemente. Der Service trägt zu einer signifikant höheren Performance und Akzeptanz einer Technologie bei. Eine geeignete Infrastruktur kann darüber hinaus auch die Geschwindigkeit der späteren Marktdurchdringung beeinflussen. Der „bottom-up“ Innovationspfad findet meist bei radikalen oder disruptiven Innovationsprojekten seine Anwendung.

3.2 Definition erforderlicher PSS Infrastruktur

Kapitel 2 hat die Herausforderungen und die mögliche strategische Ausrichtung vernetzter Ladedienste ausführlich erarbeitet. Auch wenn die konkrete Ausgestaltung der Services noch offen ist, konnte im Kern ein grundsätzlich hohes Marktinteresse für ein Angebot solcher Elektromobilitätsdienstleistungen identifiziert werden. Bisherige Entwicklungsprojekte wählen stets einen „top-down“ Innovationspfad. Das EV als eigenständiges Produkt wird um Servicefunktionen erweitert, die wiederum Anforderungen an die Infrastruktur und das Fahrzeug stellen. Aufgrund der noch fehlenden Rentabilität vernetzter Ladedienste, ist die technische Befähigung des EVs und seiner (Lade-)Infrastruktur derzeit nicht zu finanzieren. Die Infrastruktur eines vernetzten Ladedienstes soll nun mit Hilfe des vorgestellten PSS Rahmenkonzeptes beschrieben werden, um daraus Rückschlüsse für die technische Befähigung des EVs zu ziehen.

3.2.1 Servicekomponenten vernetzter Ladedienste

Servicekonzepte bestehen nach Bullinger, et al. (2003) aus einem Produktmodell („Outcome dimension“ – es beschreibt ‚was‘ ein Service macht), einem Prozessmodell („Process dimension“ – es beschreibt ‚wie‘ das Ergebnis eines Services erreicht wird) und einem Ressourcenkonzept („Structure dimension“ – es beschreibt ‚womit‘ ein Service erbracht wird). Ersteres ist gleichzusetzen mit dem umzusetzenden Usecase. Tabelle 3-1 stellt mögliche Produktmodelle ausgewählter Usecases (vgl. Abbildung 2-12) dar.

Tabelle 3-1: Detaillierung exemplarischer Produktmodelle zu ausgewählten Usecases vernetzter Ladedienste

Usecase	Exemplarisches Produktmodell
<p>Primärregelleistung (bidirektional)</p>	<p>Fachliche Beschreibung:</p> <p>Der Fahrzeugkunde beteiligt sich über einen vernetzten Ladedienst an einem PRL-Geschäftsmodell. Der OEM oder ein Service Provider fungiert als Aggregator und erhält die Kundenfreigabe zur Durchführung der Ladesteuerung. Der Kunde wird an erwirtschafteten Erlösen am Markt für Systemdienstleistungen beteiligt oder profitiert von sonstigen Anreizmodellen.</p> <p>Möglicher Steuerungsmechanismus:</p> <p>Die Lade- und Rückspeisefunktion eines Pools an Kundenfahrzeugen wird durch das Backendsystem eines Aggregators gestartet oder beendet. Während des Betriebs laufen in zu definierenden Zeitabständen oder ereignisgesteuert Kontrollroutinen ab, deren Häufigkeit mit der Gesamtsystemarchitektur abgestimmt sein muss.</p>

	<p>Externe Vorgaben:</p> <p>Die Kommunikation zwischen dem Backendsystem und dem EVSE (Electric Vehicle Supply Equipment) ist entsprechend der Anforderungen der UCTE auszulegen. Es sind gesetzliche Vorgaben zu erwarten, nach denen verpflichtende Gateways (z.B. für Smart Meter) als Schnittstelle für sämtliche Energie- und Systemdienstleistungen zu verwenden sind (Bundesregierung, 2016). Anforderungen an die spezifische Integration von EVs und EV-Pools sind mit den jeweiligen Übertragungsnetzbetreibern zu klären.</p>
<p>„Demand Side Management“</p>	<p>Fachliche Beschreibung:</p> <p>Der Kunde verfügt über ein eigenes Energiemanagementsystem (Home Energy Management System (HEMS)), das neben dem EV zum Beispiel auch eine eigene PV-Anlage oder stationäre Energiespeicher integriert. Mögliches Ziel des Demand Side Management Usecases kann eine Maximierung des eigenen Autarkiegrades sein.</p> <p>Möglicher Steuerungsmechanismus:</p> <p>Ein proprietäres System des Kunden steuert oder beeinflusst den Ladevorgang. Ein mögliches Umsetzungsszenario ist es, die Rückspeisefunktion des EVs über das Backendsystem eines Aggregators freizugeben. Es erfolgt die Vorgabe von verfügbarer Leistung, Dauer und Energiemenge. Der Leistungsfluss zwischen EV und HEMS kann vom kundeneigenen System angestoßen und auch wieder beendet werden. Auch hier muss sich das Konzept zur Leistungserbringung stimmig in die Gesamtsystemarchitektur einbetten lassen.</p> <p>Externe Vorgaben:</p> <p>Bereits heute existieren zahlreiche Standards für die Kommunikation zwischen EVSE und diversen HEMS (z.B. OCPP, EEBus, SEP 2.0). Eine Kompatibilität ist im Rahmen der Produktentwicklung sicherzustellen.</p>
<p>Glättung von Netzlastspitzen</p>	<p>Fachliche Beschreibung:</p> <p>Der Kunde verfügt auch hier über ein Energiemanagementsystem an seinem Standort und betreibt einen EV Fuhrpark. Der Ladedienst ermöglicht die Einbindung der Fahrzeuge in das System als Pufferspeicher mit dem Ziel, Netzlastspitzen zu glätten. Hierdurch kann neben einer Reduzierung der Stromverbrauchskosten (Leistungspreis) auch eine Entlastung des zugehörigen Netzanschlusspunktes erwirkt werden.</p> <p>Möglicher Steuerungsmechanismus:</p> <p>Analog zum „Demand Side Management“ ist auch hier ein hierarchisches Modell zur Steuerung der Ladevorgänge denkbar. Die Freigabe der EVs kann durch eine Aggregatorinstanz erfolgen, der Leistungsabruf durch das Energiemanagementsystem.</p> <p>Externe Vorgaben:</p> <p>Sowohl an der Schnittstelle zwischen EVSE und Energiemanagementsystem des Kunden als auch für standardisierte Gateways für Energie- und Systemdienstleistungen ist hier mit zu berücksichtigenden Vorgaben zu rechnen.</p>

Durch Aufgreifen des letzten Beispiels (Glättung von Netzlastspitzen) soll nun konsequent ein zugehöriges Prozessmodell erarbeitet werden.

Für Flottenkunden ergeben sich immer dann Spitzenlastzeiten, wenn eine große Anzahl an Fahrzeugen zeitgleich geladen werden soll. Im gewerblichen Bereich ist dies entsprechend des Fahrzeugnutzungsverhaltens oft in den Morgen- oder Abendstunden der Fall. Ohne die Möglichkeit, das Ladeverhalten der EVs zu beeinflussen, verschärft jedes zusätzlich zu ladende Fahrzeug die bereits bestehende Kritikalität des Betriebszustandes am Netzanschlusspunkt oder im zugehörigen Verteilnetzstrang. Bereits

Kapitel 2.3.3 legt in Einzelfällen Spannungsbandverletzungen und weitere Auswirkungen auf Netzstabilitätskriterien nahe.

Es gibt verschiedene Ansätze, um auf diese Herausforderungen zu reagieren und trotz eines höheren EV-Penetrationsgrades auf Netzausbau verzichten zu können. Oft wird hierfür als Werkzeug zur Nachfragesteuerung auf HTNT-Tarife zurückgegriffen. Mit Hilfe einer tageszeitabhängigen Preisgestaltung sollen Anreize für das Laden des EVs zu Zeitpunkten niedriger Netzauslastung geschaffen werden. Dieser Ansatz soll im Folgenden aber nicht weiter berücksichtigt werden. Vielmehr ist es von Interesse, inwiefern intelligente Ladepläne zwischen dem Verteilnetzbetreiber und dem Flottenkunden verhandelt werden können. Ein möglicher Algorithmus zur Ladesteuerung wird im Folgenden dargestellt (vgl. Abbildung 3-4).

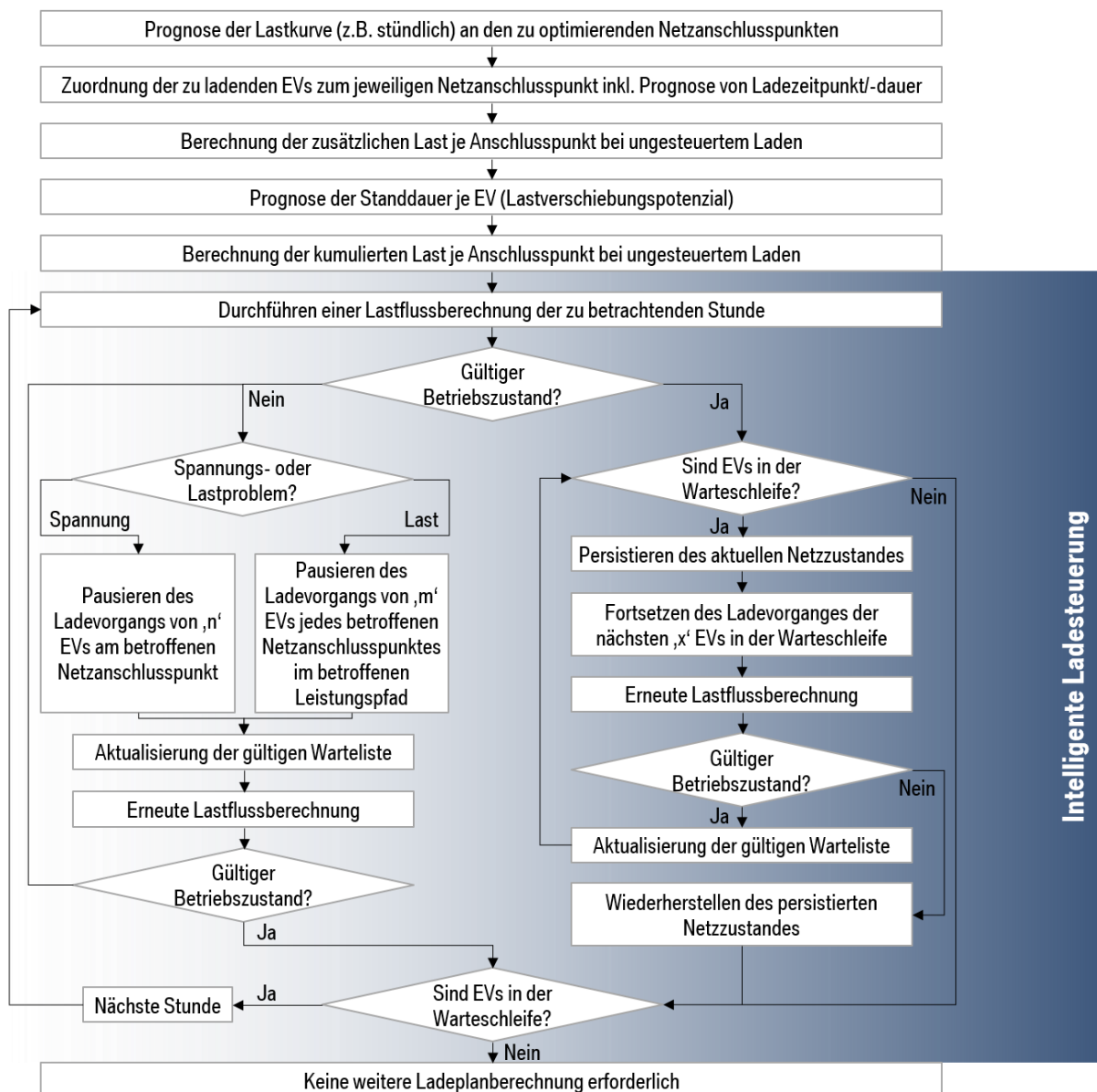


Abbildung 3-4: Vereinfachter Algorithmus zur Berechnung eines stündlichen Ladeplans zur Sicherstellung der Netzstabilität (eigene Darstellung)

Der hier dargestellte (vereinfachte) Algorithmus geht zunächst von einem ungesteuerten Ladevorgang aus. Nach Prognose bzw. Berechnung des zu erwartenden Lastgangs an den betroffenen Netzanschlusspunkten wird mit Hilfe einer Lastflussberechnung ermittelt, ob sich das Verteilnetz in einem gültigen Betriebszustand befindet. Ist dies der Fall, erfolgt solange eine Leistungsfreigabe für weitere zu ladende EVs, bis dieses Kriterium nicht mehr erfüllt ist oder alle EVs geladen werden. Befindet sich das Gesamtsystem jedoch in einem kritischen Betriebszustand, so wird die Anzahl der ladenden Fahrzeuge schrittweise reduziert, bis alle Stabilitätskriterien wieder eingehalten werden können. Insgesamt stellt die intelligente Ladesteuerung mit ihrer Ladeplanberechnung zu jedem Zeitpunkt sicher, dass die maximal mögliche Anzahl an EVs geladen werden kann.

Um den Algorithmus zu erweitern und ihn an reale Anforderungen anzunähern, sind zusätzliche Entscheidungskriterien zu berücksichtigen. Die relevante Information über den betrachteten Fahrzeugpool ist deutlich umfangreicher als die bloße Angabe des Ladewunsches. Unter realen Bedingungen kann nicht davon ausgegangen werden, dass alle Fahrzeuge uneingeschränkt pausiert werden dürfen. Aufgrund unterschiedlicher Ladestandards und Degradation kann ebenso wenig von identischen und konstanten Leistungsbedarfen ausgegangen werden. Auch bidirektionales Laden als optionale Grundeigenschaft der Ladeschnittstellen der EVs wird nicht in Betracht gezogen. Die Liste relevanter Informationen und Parameter kann nach Bedarf fortgesetzt werden.

Nichtsdestotrotz lässt sich bereits anhand des Algorithmus aus Abbildung 3-4 und unter Anwendung des vorgeschlagenen PSS-Vorgehensmodells ein Ressourcenmodell ableiten, welches das zu erarbeitende Servicekonzept nach Bullinger, et al. (2003) vervollständigt.

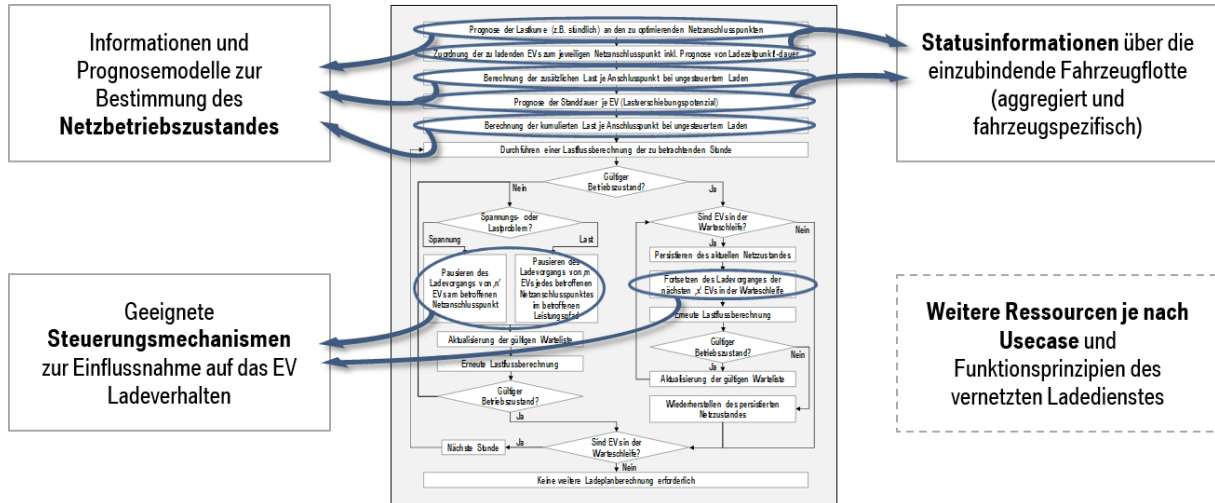


Abbildung 3-5: Exemplarisches Ressourcenmodell eines vernetzten Ladedienstes als Bestandteil des Servicekonzeptes (eigene Darstellung)

Abbildung 3-5 zeigt, dass jede Servicefunktion mit bestimmten Prozessen auf bestimmte Ressourcen zurückgreift. Das gewählte Beispiel – eine intelligente Ladesteuerung zur Sicherstellung der Betriebssicherheit am betreffenden Netzanschlusspunkt – erfordert einerseits relevante Informationen aus den Teilsystemen, andererseits geeignete Steuerungsmechanismen zur Einflussnahme auf das Ladeverhalten der EVs und damit auf den Systemzustand. Diese sind von der PSS-Infrastruktur zur Verfügung zu stellen. Je nach Umfang und Komplexität des Services sind Produktmodell, Prozess und Ressourcenkonzept zu adaptieren.

Insgesamt beschreibt das vorliegende Kapitel nun das ‚Was‘, ‚Wie‘ und ‚Womit‘ eines vernetzten Ladedienstes. Eine Aussage zur Relation des Servicekonzeptes zur Hard- und Software des Produktes aber fehlt. Sie wird im Folgenden erarbeitet.

3.2.2 Produktkomponenten vernetzter Ladedienste

Das Münchner Vorgehensmodell zur Produktentwicklung sieht zunächst die Definition spezifischer Produktfunktionen vor (Ponn & Lindemann, 2011). Sie sind das Pendant zu den soeben beschriebenen Ressourcen eines vernetzten Ladedienstes. Im vorliegenden Beispiel beinhaltet das Ressourcenmodell die bereits genannten Steuerungsmechanismen zur Einflussnahme auf das Ladeverhalten des EVs. Das zugehörige produktspezifische Gegenstück des Fahrzeuges ist seine Fähigkeit, die Ladeleistung entsprechend interner und externer Vorgaben zu regeln. Analog müssen auch alle anderen Ressourcen eines Services stets eine produktspezifische Entsprechung finden und werden an dieser Stelle mit Verweis auf Kapitel 3.2.1 nicht weiter detailliert.

Das Produkt selbst wird insbesondere durch seine Komponenten geprägt. Diese können nun – anders als in Kapitel 3.2.1 – aber nicht aus den umzusetzenden Usecases abgeleitet werden. Vielmehr sind sie zusammen mit ihren Funktionsprinzipien bereits durch die unternehmerische Praxis vorbestimmt. Abbildung 3-6 skizziert die Architektur vernetzter Ladedienste, wie sie sich bislang im Markt etabliert hat.

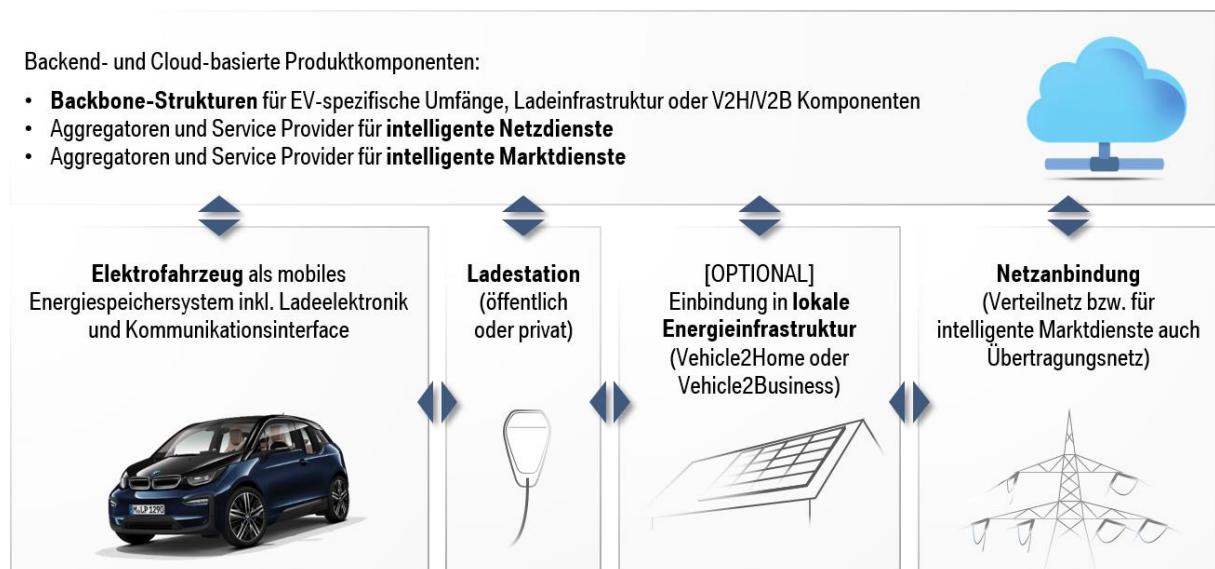


Abbildung 3-6: Produktkomponenten vernetzter Ladedienste (eigene Darstellung)

Das EV als Produktkomponente übernimmt zahlreiche Teilaufgaben, die einen signifikanten Einfluss auf das Angebot vernetzter Ladedienste haben. So bestimmt es mit seinem Hochvoltspeicher die dem Service zur Verfügung stehende Kapazität. Seine Leistungselektronik und der Ladestandard geben die uni- oder bidirektionale Ladeleistung vor. Oft hängen diese Größen von der gewählten Sonderausstattungsvariante des Kunden ab (z.B. Speicherkapazität). Des Weiteren definiert der Kommunikationsstandard Art und Inhalt des Informationsaustausches des Fahrzeuges mit seiner Umwelt. Auch ein Teil der Nutzerinteraktion mit dem vernetzten Ladedienst findet bereits mit Hilfe des fahrzeugeigenen Anzeige- und Bedienkonzeptes statt. Die Auswahl des Lademodus bzw. des Ladedienstes sowie das Setzen gewünschter Abfahrtszeiten erfolgt in der Regel onboard. Für komplexere Bedienschritte – etwa zur Kon-

figuration des vernetzten Ladedienstes – nutzt man oft CE-Devices oder Webapplikationen. Die erforderliche Updatefähigkeit des Produktangebotes kann so ohne regelmäßige Anpassungen der Fahrzeugsoftware sichergestellt werden.

Die Wallbox (EVSE) fungiert neben ihren Funktionen zur Lade- und Kommunikationssteuerung als Gateway hin zu lokalen Energieinfrastrukturen, dem Verteilnetz sowie oft auch zu diversen Backendsystemen. Abbildung 3-7 visualisiert einen Auszug aus einem exemplarischen Sequenzdiagramm. Es beschreibt initial die Authentifizierung des EVs sowie ein mögliches Vorgehen zur Verhandlung eines Ladeplans.

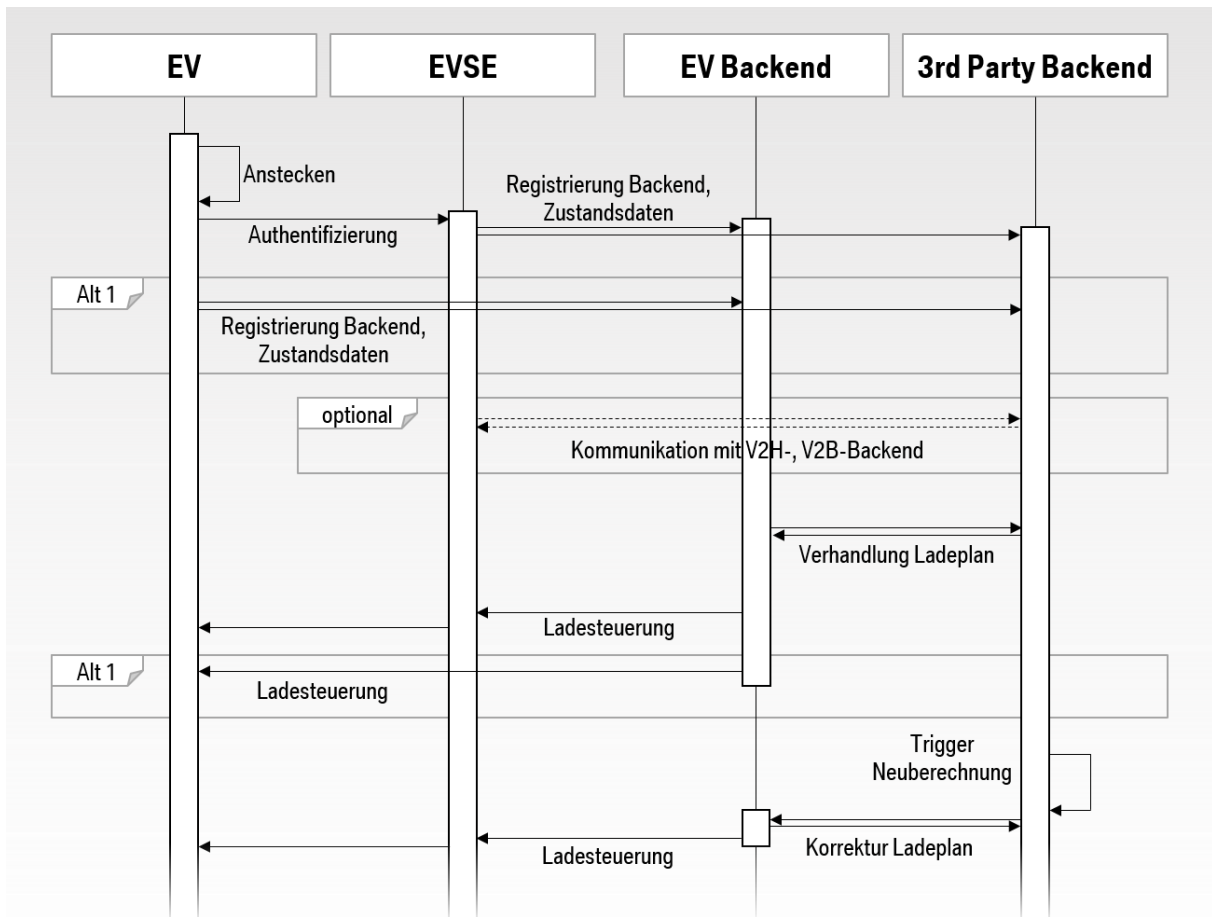


Abbildung 3-7: Exemplarisches Sequenzdiagramm zur Authentifizierung des EVs und Verhandlung eines Ladeplans (eigene Darstellung)

Hierbei wird deutlich, dass das EV als Produktkomponente für einen vernetzten Ladedienst nur eine geringe Anzahl an Außenschnittstellen anbieten muss. Sie beschränken sich neben der Leistungsschnittstelle vordergründig auf die Bereitstellung von Zustandsdaten und das Empfangen umzusetzender Ladepläne. Der größere Anteil des Informationsflusses findet zwischen den verschiedenen Backendsystemen und Service Providern statt. Erst sie aggregieren die verteilte EV Flotte zusammen mit ihren Daten zu einer für den vernetzten Ladedienst nutzbaren technischen Einheit.

Mit Ausnahme der Kommunikationsschnittstelle zwischen EV und EVSE (ISO 15118) sowie einzelner HEMS-Protokolle werden bislang alle in Abbildung 3-6 dargestellten Interfaces proprietär je Anbieter oder angebotenen Ladedienst umgesetzt. Die Folge ist, dass es keine eindeutige Kompetenzzuordnung

zwischen den dargestellten Produktkomponenten gibt. Funktionsprinzipien vernetzter Ladedienste sind uneinheitlich.

Die aus dem dargestellten Produktmodell gewonnenen Erkenntnisse untermauern die in Kapitel 2.4.3 erarbeiteten kritischen Erfolgsfaktoren vernetzter Ladedienste. Aufgrund proprietärer Konzepte und wegen des ausgeprägten Wettbewerbs zwischen Energieversorgungsunternehmen, Service Provider und dem OEM empfiehlt es sich für letzteren, sich weiterhin auf das Mobilitätsbedürfnis des Kunden zu fokussieren, das EV mit möglichst stabilen Außenschnittstellen in das Produktangebot vernetzter Ladedienste zu integrieren sowie die dafür erforderliche technische Infrastruktur bereitzustellen.

3.3 Synthese des PSS

Insgesamt ist das erarbeitete Produkt-Service-System sehr gut in der Lage, die künftige strategische Positionierung eines OEMs herzuleiten und die Anforderungen an die Fahrzeugschnittstelle zur Lade- und Kommunikationsinfrastruktur zu definieren. Im Ergebnis ist das wettbewerbsdifferenzierende Merkmal für den OEM nicht der Ladedienst selbst, da dieser zumeist auch mit bestehender Technologie dargestellt werden kann. Ein privatökonomischer und energiewirtschaftlicher Mehrwert vernetzter Ladedienste ergibt sich insbesondere dann, wenn ihre Konkurrenzfähigkeit zu alternativen Produkten am Energiemarkt sichergestellt werden kann (vgl. Kapitel 2.4.3). Hierfür müssen hohe Energiemengen zuverlässig und kostengünstig abgerufen werden können. Voraussetzung hierfür sind eine hohe Marktdurchdringung und das damit verbundene Lastverschiebungspotenzial sowie eine breite Kundenakzeptanz.

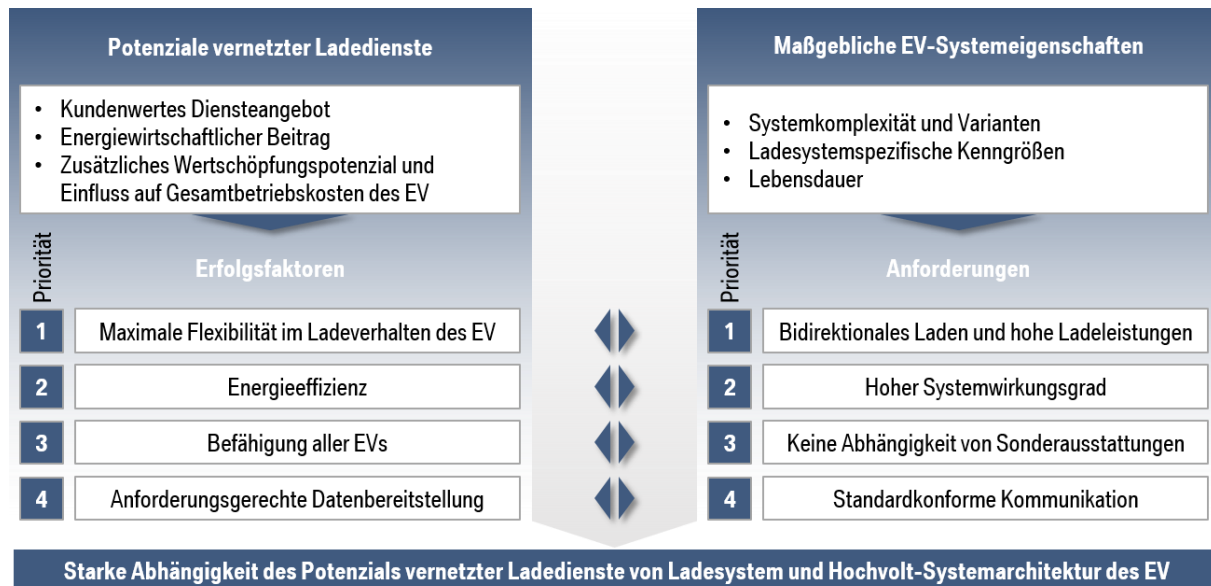


Abbildung 3-8: Handlungsbedarfe für den OEM, um ein kundenwertes und wettbewerbsdifferenzierendes Angebot vernetzter Ladedienste zu ermöglichen (eigene Darstellung)

Abbildung 3-8 schlussfolgert Handlungsbedarfe aus den Ergebnissen des Kapitels 2 sowie dem strukturierenden Beitrag des vorliegenden Produkt-Service-Systems. Aus Sicht des OEMs hängt das Potenzial eines vernetzten Ladedienstes von verschiedenen Erfolgsfaktoren ab. Zunächst muss seine Flotte ein maximales Lastverschiebungspotenzial – dieses ist gleichzusetzen mit einer möglichst hohen Flexibilität

im Ladeverhalten des EVs – bieten. Gleichzeitig muss jede Leistungsentnahme und -bereitstellung effizient erfolgen (Wirkungsgrad). Gleichzeitig sind Skaleneffekte auszunutzen. Möglichst jedes EV muss technisch für ein späteres Angebot von Ladediensten befähigt sein.

Des Weiteren setzt Abbildung 3-8 die genannten Erfolgsfaktoren mit Anforderungen an die Systemeigenschaften des Elektrofahrzeuges in ein Verhältnis. Als erstes Handlungsfeld für den OEM ergibt sich die Befähigung des Ladesystems. Hocheffiziente, leistungsfähige und bidirektionale Ladeschnittstellen sind in der Lage, das Potenzial eines vernetzten Ladedienstes signifikant zu steigern. Skaleneffekte können nur dann optimal genutzt werden, wenn jedes Fahrzeug potenziell zu einer späteren technischen Einheit aggregiert werden kann. Ein zweites Handlungsfeld ist es daher, zu vermeiden, dass ein späteres Produktangebot von Ladediensten von bestimmten Sonderausstattungsvarianten abhängt und so nur ein bestimmter Teil der Fahrzeugkunden sich dafür qualifiziert. Nicht zuletzt stellt eine standardkonforme Kommunikationsschnittstelle sicher, dass EVs ohne signifikante Anpassungsbedarfe in verschiedenste Produkte integriert werden können. Der internationale Standard ISO 15118 (ISO/IEC, 2017) ist in der Lage – sofern er weiterhin Verbreitung findet – eine Antwort auf diese Problemstellung zu geben (vgl. Kapitel 2.3.1). Proprietäre Lösungen sind zu vermeiden.

4. Potenziale der modularen Multilevel-Batterie (M2B) im Elektrofahrzeug

Neben ihrem energiewirtschaftlichen Potenzial wird von der Elektromobilität erwartet, dass sie auch im Hinblick auf das Mobilitätsbedürfnis der Kunden mit konventionellen Antriebstechnologien konkurrieren kann. Dabei stellt der Einsatz von Batteriespeichertechnologien die Automobilindustrie vor vielfältige neue Herausforderungen. Der Stand der Technik von EVs bedingt hohe Systemspannungen, die ein aufwändiges Sicherheitskonzept erfordern. Ebenso werden im Sinne der Wirtschaftlichkeit von Fahrzeugprojekten zahlreiche technische Varianten generiert – Komplexität und mit ihr einhergehende Kosten sind die Folge. Gleichzeitig sind Maßnahmen erforderlich, die einen sicheren Einsatz von Batteriezellen ermöglichen. Dazu gehören zum Beispiel Batteriemanagementsysteme und der Einsatz geeigneter, spannungsfester Bauelemente.

Für die Entwicklung eines EVs wird bislang – wie auch in der klassischen Automobilindustrie – meist der „top-down“ Innovationspfad gewählt. Zunächst werden die Funktionen des Produktes, seiner Services und der notwendigen Infrastruktur definiert (Entwicklungsziel). Erst dann werden passende Technologien ausgewählt, die sich in der Regel aus bestehenden und ausgereiften Industriebaukästen bedienen. Die beschriebenen Performancelücken können sie kaum oder nur mit erheblichem Aufwand schließen. Hier rückt die vorliegende Arbeit nun das Know-how (Technologieschicht) des PSS-Schichtenmodells in den Fokus der Betrachtung. Innovationen in der Leistungselektronik liefern einen wesentlichen Beitrag, um auf die beschriebenen Herausforderungen zu reagieren. Die relevanten Fahrzeugeigenschaften werden signifikant durch die Systemarchitektur des EVs und seiner Umrichtertechnologie bestimmt. Dieses Forschungsvorhaben greift daher ein innovatives Konzept auf, das am Lehrstuhl für elektrische Energieerzeugung und -verteilung der Universität der Bundeswehr München von Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Weyh entwickelt wurde. Dabei handelt es sich um die modulare Multilevel-Batterie (M2B) – ein neuartiges Batteriespeichersystem, das technologisch auf modularen Multilevel-Umrichtern aufsetzt.

Grundlegende Idee der M2B ist die Integration und intelligente Kombination von Batteriespeicher und Leistungselektronik. Durch konsequente Neugestaltung heutiger Antriebsarchitekturen können bestehende Restriktionen überwunden werden. Das Gesamtsystem erhält mit Hilfe seines modularen Aufbaus zusätzliche Freiheitsgrade, die ein individuelles Handling einzelner Batteriemodule ermöglichen – diese können nun dynamisch sowohl parallel als auch in Serie geschaltet werden und unterschiedlichste Anforderungen an den Verlauf der Batteriespannung flexibel erfüllen. Hierdurch werden Betriebsstrategien ermöglicht, die zum Beispiel auf geringere Innenwiderstände, minimale Speicherzyklisierung oder eine gleichförmigere Alterung der Batteriemodule abzielen – separate Batteriemanagementsysteme (BMS) werden überflüssig.

Durch die Kombination von Umrichter und Batteriespeichersystem ist die modulare Multilevel-Batterie als Technologie in der Lage, bestehende Antriebsstrang- und Ladearchitekturen des EVs fundamental zu verändern. Sie ist die Grundlage für ein hochintegriertes Batteriespeichersystem, das Antriebsumrichter, Ladeelektronik und BMS umfasst. Dies bietet des Weiteren die Chance, das EV im „bottom-up“ Innovationspfad für vernetzte Ladedienste zu befähigen.

Das vorliegende Kapitel beschreibt den Stand der Technik aktueller HV-Systemarchitekturen im EV und leitet bestehende Technologierestriktionen daraus ab. Darauf folgt eine Beschreibung und Analyse der M2B. Abschließend werden die Implikationen auf das energiewirtschaftliche Potenzial des EVs und nicht zuletzt ein möglicher positiver Einfluss auf weitere Fahrzeugeigenschaften erarbeitet.

4.1 Grundlagen der HV-Systemarchitektur im Elektrofahrzeug

Im Hinblick auf das Ladesystem bedingen die genannten Anforderungen einen Bedarf an bidirektionalen, leistungsfähigen und interoperablen Ladeschnittstellen. Die Batterieladeelektronik von EVs kann im Fahrzeug (onboard) oder außerhalb partitioniert sein (offboard) und ihr Leistungsfluss entweder als unidirektional oder bidirektional kategorisiert werden. Unidirektionale Ladesysteme vermindern die Hardwareanforderungen, vereinfachen die Herausforderungen der Leistungsschnittstelle zum Energieversorgungssystem und reduzieren eine mögliche Batteriedegradation (Fasugba & Krein, 2011). Bidirektionalität hingegen ermöglicht das Rückspeisen von Energie in das Netz (Du, Lukic, Jacobson, & Huang, 2011). Die Leistungselektronik ist bislang nur eingeschränkt dazu in der Lage, diese Anforderungen zu vertretbaren Kosten zu erfüllen. Gewicht, Package (geometrische Integrationsfähigkeit) und negative Lebensdauerwirkungen sind weitere Hürden (Yilmaz & Krein, 2013).

Ein zusätzlich limitierender Faktor in der elektromobilen Antriebstechnik ist die geringe elektrische Reichweite. Geringe Energiedichten und das hohe Gewicht des Batteriespeichersystems (BSS) wurden bereits als Gründe hierfür angeführt. Des Weiteren sind sowohl die elektrische Maschine als auch der Umrichter verlustbehaftet¹². Auch das Laden ist entweder langsam oder es reduziert die Lebensdauer der verbauten Batteriezellen. In beiden Fällen – sowohl beim Standardladen als auch beim Schnellladen – ist es aufgrund von Batterieverlusten und nachteiligen Ladetopologien mit mehreren Konvertierungsstufen vergleichsweise ineffizient (Yilmaz & Krein, 2013) (Musavi, Edington, Eberle, & Dunford, 2012). Bis zu 11 % der Energie werden als Verluste im Umrichter umgesetzt. Im Vergleich dazu belaufen sich die Ladeverluste des BSS auf 1 % - 7 % – abhängig von verschiedenen Parametern wie Ladestrom, SOC oder der Temperatur (Brito, Martins, Pedrosa, Monteiro, & Afonso, 2013) (Eaves & Eaves, 2004) (Wirasingha, Gremban, & Emadi, 2012).

Gleichzeitig induzieren die bestehenden Lademodi – sie unterscheiden sich in ihrer Spannungscharakteristik, dem Leistungsniveau und der Topologie der Ladeelektronik (onboard vs. offboard) – mehrere Hardwarevarianten für den OEM, da jedes EV mit einem oder mehreren von ihnen kompatibel sein muss. Diese Varianten gehen wiederum mit zusätzlichen Aufwänden insbesondere im Bereich Entwicklung und Absicherung für die Automobilindustrie einher.

Für das sichere und bedarfsgerechte Laden von E-Fahrzeugen wurden verschiedene Lademodi definiert. Tabelle 4-1 zeigt die Lademodi „1“ bis „4“, wie sie IEC 61851-1 (IEC 61851-1:2010, 2010) und IEC 61851-23 (IEC 61851-23:2014, 2014) definieren. Die Mehrzahl der Fahrzeugladungen findet nachts über zuhause statt, wobei eine haushaltsübliche Schutzkontaktsteckdose zusammen mit einem dedizierten Ladegerät (EVSE) genutzt wird. Die Modi „3“ und „4“ zielen auf eine kommerzielle Nutzung oder

¹² Die modulare Multilevel-Batterie hat als Technologie keinen direkten Einfluss auf die genannten Parameter (Gewicht, Energiedichten, etc.). Sie kann jedoch aufgrund ihres Zugewinns an Effizienz (vgl. Kapitel 4.3.3) einen positiven Einfluss auf die erzielbare Reichweite eines EVs haben.

auf einen Einsatz im öffentlichen Raum ab (Yilmaz & Krein, 2013). Die in Tabelle 4-1 gelisteten Leistungswerte beschreiben die spezifizierten Maximalwerte. In der Praxis werden geringere Ladeleistungen realisiert (z.B. Mode „1“ Laden an einer Schutzkontaktsteckdose (230 V, 16 A) mit maximal 3,7 kW).

Tabelle 4-1: Lademodi und Leistungsniveaus entsprechend IEC 61851-1 und IEC 61851-23

	Max. Leistung entspr. IEC 61851-1 und -23	Übliche Ladeleistungen	Ladeelektronik	Beschreibung
MODE 1	13,3 kW; AC einphasig (< 250 V) oder AC dreiphasig (< 480 V); 16A	3,7 kW bei AC einphasig (230 V, 16 A); 11,0 kW bei AC dreiphasig (400 V, 16 A)	Schutzkontakt- oder CEE-Steckdose	Standardladen mit haushaltsüblicher Steckdose
MODE 2	26,6 kW; AC einphasig (< 250 V) oder AC dreiphasig (< 480 V); 32A	3,7 kW bei AC einphasig (230 V, 16 A); 22,0 kW bei AC dreiphasig (400 V, 32 A)	Dediziertes EVSE	Standardladen mit haushaltsüblicher Steckdose und Leitungsschutz im Ladekabel
MODE 3	66,5 kW; AC einphasig (< 250 V) oder AC dreiphasig (< 480 V); 80A	3,7 kW bei AC einphasig (230 V, 16 A); 43,5 kW bei AC dreiphasig (400 V, 63 A)	Dediziertes EVSE	Standard- oder Schnellladen mit spezifischer EV Stecker-Verbindung, Ladesteuerung und Schutzmechanismen
MODE 4	300 kW; DC (< 1000 V); 300 A	DC-low max. 38 kW ; DC-high max. 170 kW	Dediziertes EVSE	Schnellladen mit externem Ladegerät

4.1.1 Batteriespeichersysteme

Batteriespeichersysteme, wie sie heute im EV eingesetzt werden, setzen sich aus einem Hochvolt-Batteriestack, einem BMS und einem bidirektionalen Wandler¹³ zusammen. Der Batteriestack wird zum Erreichen der erforderlichen Systemspannung aus mehreren Batteriepacks – auch Batteriemodule genannt – gebildet, die hierfür in Serie geschaltet werden.

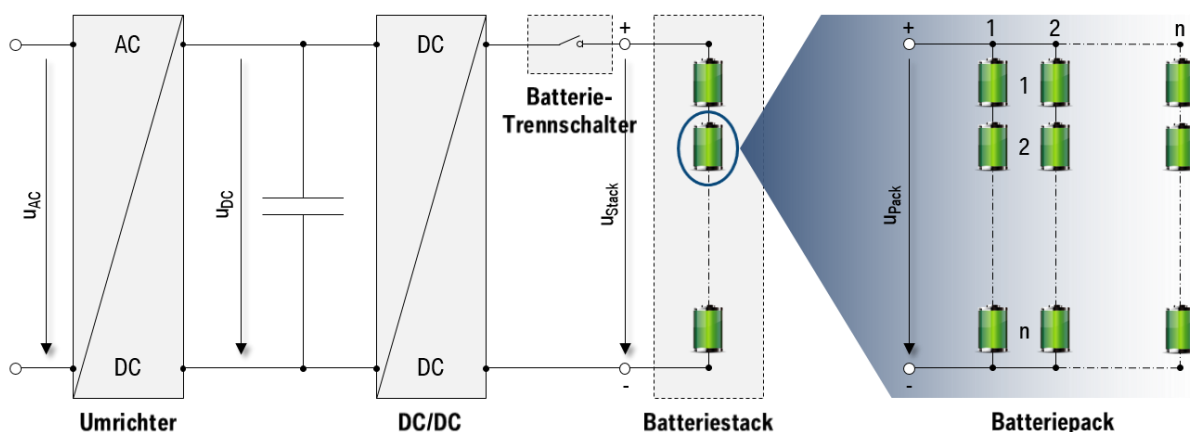


Abbildung 4-1: Aufbau und Struktur heutiger Batteriespeichersysteme (eigene Darstellung)

¹³ Der dem Batteriespeichersystem zugeordnete DC/DC-Wandler muss zur Befähigung des Ladebetriebs sowie des motorischen Betriebs des EV bidirektional ausgelegt werden. Nur sehr selten trifft dies auch auf den Wandler der Ladeelektronik zu. Bislang haben Kunden keinen Bedarf, ins Netz zurückspeisen zu können, der den erforderlichen Aufwand und die damit verbundenen Kosten rechtfertigen würde (vgl. auch Kapitel 4.2).

Um die nötige Kapazität und Stromtragfähigkeit zu erreichen, können einzelne Module wiederum aus mehreren parallel verschalteten Strängen bestehen. Durch seriell verbinden einzelner Batteriezellen innerhalb dieser Stränge wird schließlich die gewünschte Modulspannung erzeugt (vgl. Abbildung 4-1) (Schroeder, et al., 2013).

Trotz immer kleiner werdender Fertigungstoleranzen – die Standardabweichung für die Masse des Aktivmaterials beläuft sich auf einen Anteil von $\pm 0.1\%$, für Elektrodendicke und -dichte sind es etwa $\pm 1\%$ (Kenney, Darcovich, MacNeil, & Davidson, 2012) – sind Schwankungen der Zellkapazität und ihres Innenwiderstandes von 10 bis 20 % üblich. Gleichzeitig laufen die Parameter der Batteriezellen auch während der Lebensdauer des BSS auseinander. Grund hierfür sind Temperaturgradienten innerhalb des Batteriestacks sowie leicht divergierende Lastkurven, die aufgrund von Fertigungstoleranzen und Innenwiderstandsabweichungen auftreten (Baumhöfer, Brühl, Rothgang, & Sauer, 2014). BMS, die den SOC der Batteriezellen balancieren, werden auch dafür eingesetzt, das thermische Auseinanderdriften einzelner Zellen zu vermeiden und die nutzbare Kapazität und Lebensdauer des kompletten Batteriestacks zu erhöhen (Uno & Tanaka, 2011). Gleichzeitig stellen sie sicher, dass die Zellen sich zu keinem Zeitpunkt außerhalb der zulässigen Betriebszustände (Safe Operating Area) befinden. Hierfür müssen zumindest Spannung, Strom und Temperatur überwacht werden (Schroeder, et al., 2013). Dabei reichen die Möglichkeiten des Balancings von passiven Systemen – sie zeichnen sich durch dedizierte Balancingstromkreise aus, die Batteriezellen mit höheren SOC über einen Widerstand entladen – bis hin zu aktiven Systemen, die Energie von einer Batteriezelle zur nächsten übertragen. Letztere sind im Vergleich effizienter aber auch teuer, da sie zusätzliche aktive und passive Bauteile sowie aufwändige Kontroll- und Messsysteme erfordern (Lee, Jeon, & Bae, 2016). Des Weiteren bedingen aktive BMS unter Umständen eine schnellere Zellalterung (Uno & Tanaka, 2011).

Weiterhin hat die intern statische Struktur heutiger Batteriespeichersysteme Einschränkungen zur Folge. Betriebskennzahlen und nicht zuletzt auch aus ökonomischer Hinsicht relevante Größen, wie nutzbare Kapazität, Lebensdauer oder Stromtragfähigkeit, werden durch die schwächste Zelle im Gesamtsystem bestimmt (Schroeder, et al., 2013). Sobald nur eine einzige Zelle nicht mehr funktionsfähig ist, bedingt dies den Ausfall des Gesamtsystems. Ebenso sind die Spannungsniveaus heutiger BSS deutlich oberhalb der Schutzkleinspannung, weshalb zusätzliche Maßnahmen für Betrieb und Wartung des Systems erforderlich werden. Eine nachträgliches Erweitern oder Skalieren des BSS ist nicht möglich.

4.1.2 Ladesystem und HV-Busstrukturen

Die Systemarchitektur von EVs zeichnet sich üblicherweise durch eine verteilte Struktur aus. Dies gilt sowohl für die leistungselektronischen Komponenten als auch für die einzelnen Steuergeräte (Electronic Control Unit – ECU) (vgl. Abbildung 4-2). Dabei erfordern die zuvor genannten zahlreichen Konvertierungsstufen eine ebenso hohe Anzahl an Umrichtern¹⁴.

Für gewöhnlich werden das Batteriespeichersystem, der Antriebsumrichter und das Ladesystem über einen HV-Bus (DC) miteinander verbunden. Die DC-Ladeelektronik speist in der Regel direkt in den Bus ein. Aus Kostengründen, und aufgrund vertriebsstrategischer Ziele, bieten OEMs ihren Kunden

¹⁴ Channegowda, Pathipati und Williamson (2015) zum Beispiel ermitteln im Rahmen einer Betrachtung des Nissan Leaf, dass dieser eine Ladeeffizienz („Plug to Battery“) von 82 – 88 % aufweist. Hierfür wurde für das Laden des Lithium-Ionen Batteriespeichers ein Wirkungsgrad von 93 % angenommen. Weiterhin wurden verschiedene Ladesystemtopologien und Ladeleistungen untersucht.

dreiphasiges oder Mode 2-, 3- und 4-Laden üblicherweise als Sonderausstattungen an (z.B. Volkswagen (2016) oder BMW (2016)). Hierfür sind zahlreiche Varianten der AC-Ladeelektronik und des Ladeanschlusses jeweils mit oder ohne DC-Ladeinterface zu entwickeln und zur Marktreife zu bringen.

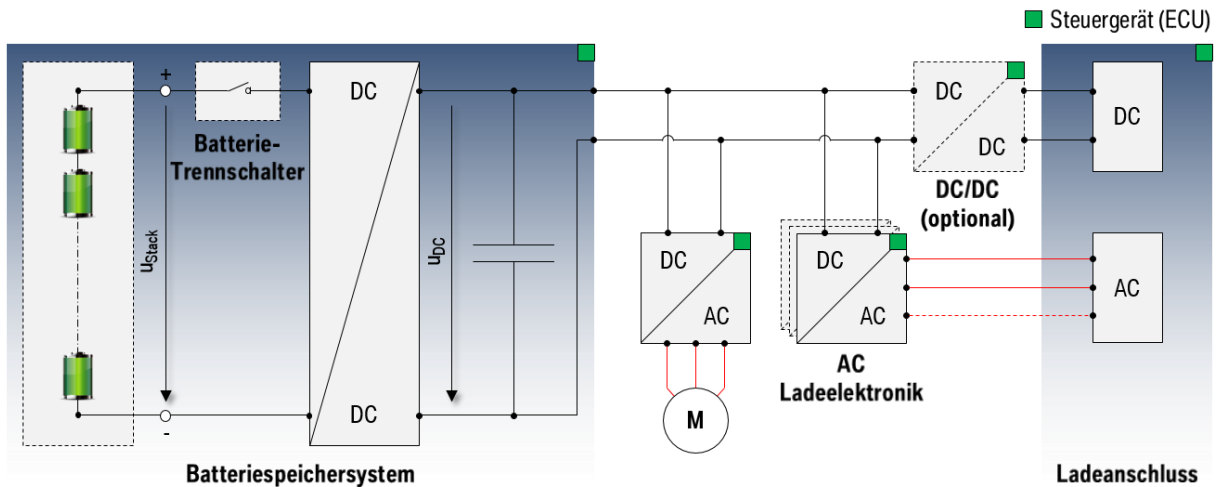


Abbildung 4-2: HV-Systemarchitektur konventioneller EVs (eigene Darstellung)

In der Regel werden für den HV-Bus Nennspannungen im Bereich von 350 bis 400 V (DC) gewählt. Wie beim DC-Laden speist auch beim Wechselstromladen ein Gleichrichter direkt auf diesen ein (z.B. Mode 1-Laden einphasig). Für höherwertige Ausstattungsvarianten (z.B. Mode 2-Laden einphasig mit bis zu 26,6 kW) wird üblicherweise ein zusätzlicher Umrichter verbaut, der zusätzliche Leistung in den HV-Bus umsetzt (vgl. Abbildung 4-3). Gleichzeitig sind für das DC-Laden weitere Trennschalter erforderlich, die entweder im Ladeanschluss selbst oder in einem separaten Steuergerät verortet werden müssen – eine weitere Variantenbildung ist also die Folge, die durch Länderspezifika nochmals verschärft wird. Aufgrund des CHAdeMO-Ladestandards im japanischen Markt sind weitere Abwandlungen im Hinblick auf Steckertypen (separate Ladeanschlüsse für AC- und DC-Laden) und Kommunikation erforderlich. Abbildung 4-3 zeigt exemplarisch, welche hohe Anzahl an Fahrzeugausstattungsvarianten sich in der Fahrzeugentwicklung eines kostengetriebenen OEMs ergeben kann. Dabei muss wiederum nicht jeder OEM oder jedes Fahrzeugderivat alle Lademodi (als dedizierte Variante) umsetzen und anbieten. Im Sinne eines weniger komplexen und gleichzeitig kosteneffizienten Produktangebotes werden dem Kunden in der Regel nicht alle der theoretisch denkbaren Varianten angeboten. Nichtsdestoweniger sind Aufwand und Komplexität der umzusetzenden Varianten für den OEM signifikant.

Soll auch bidirektionales Laden möglich sein, verdoppelt sich dieser Aufwand. Hier sei jedoch angemerkt, dass dies in der Industrie bislang kaum Relevanz hat. Gründe hierfür sind die höhere Batteriedegradation (Zyklisierung), die signifikanten Kosten für eine entsprechend befähigte Ladeelektronik sowie weitere Infrastrukturhemmnisse (vgl. Kapitel 2). Dabei gehen diese Ladesysteme in der Regel zweistufig vor: ein netzgekoppelter bidirektionaler AC/DC Umrichter stellt einen zulässigen Leistungsfaktor sicher, ein bidirektionaler DC/DC Wandler regelt den Batteriestrom. Beide können sowohl isolierte als auch nicht-isolierte Schaltungsaufbauten nutzen. In jedem Fall aber müssen sie sicherstellen, dass sie dem Netz im Ladebetrieb sinusförmige Ströme entziehen und mit einem definierten Phasenwinkel Wirk- und Blindleistung regeln. Auch beim Rückspeisen sind saubere, Oberschwingungsarme Ströme ein wichtiges Qualitätskriterium (Yilmaz & Krein, 2013).

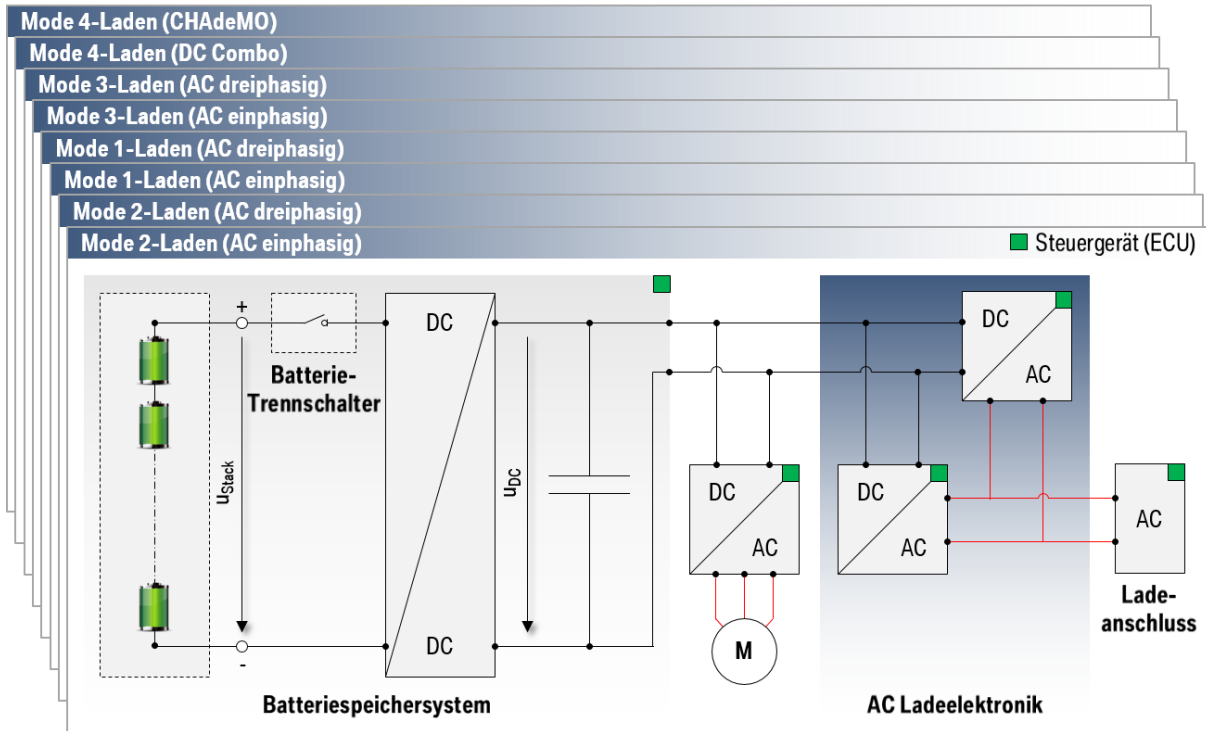


Abbildung 4-3: Lademodi und Länderspezifika induzieren zahlreiche Varianten in der HV-Systemarchitektur (eigene Darstellung)

Zusammenfassend ergeben sich für das Ladesystem zwei vordergründige Restriktionen: Zum einen hängt das Spannungsniveau für das DC-Laden von der fahrzeuginternen Busstruktur ab, zum anderen hat die hohe Anzahl möglicher Sonderausstattungskonfigurationen eine hohe Varianz der Anforderungen an die AC-Batterieladeelektronik zur Folge (Yilmaz & Krein, 2013).

4.1.3 Antriebskomponenten

Der elektrische Antriebsstrang ist das Bindeglied zwischen dem Batteriespeichersystem (Traktionsbatterie) und der Antriebswelle. Er ist ein zentraler Bestandteil eines jeden Elektrofahrzeuges und umfasst alle Komponenten, die für die Wandlung gespeicherter elektrochemischer Energie in Antriebsenergie erforderlich sind. Die einfachste Antriebsstrangtopologie besteht aus einem Batteriespeichersystem, einem Wechselrichter sowie einer elektrischen Maschine und ist in Abbildung 4-4 dargestellt. Die Maschine kann sowohl motorisch als auch generatorisch eingesetzt werden. Dabei wird letztere Betriebsart zur Rekuperation, also dem elektrischen Bremsen bei gleichzeitigem Rückspeisen in die Traktionsbatterie, genutzt.



Abbildung 4-4: Einfache Antriebsstrangtopologie (eigene Darstellung)

Grundsätzlich gibt es zahlreiche Möglichkeiten, um Umrichter, Maschine und das zugehörige Getriebe mit der Antriebswelle anzuordnen. Dabei reicht die Bandbreite von leistungsstärkeren, zentralen Maschinen mit Differential bis hin zu kleineren, verteilten Radnabenmotoren, bei denen die Energiewandlung direkt im angetriebenen Rad erfolgt. Bei der Konzeptauswahl ist das jeweilige Auslegungsziel zu

berücksichtigen. Nicht selten gehört dazu mit entsprechend hoher Priorität ein hoher Gesamtsystemwirkungsgrad über einen festgelegten Fahrzyklus – also einer zeitlichen Abfolge verschiedener Betriebspunkte (Kampker, Vallée, & Schnettler, 2013).

Die Vielzahl möglicher Topologien findet zusammen mit der komplexen Modellierung dieser Systeme große Aufmerksamkeit in der wissenschaftlichen Arbeit (van Hoek, Boesing, van Treek, Schoenen, & De Doncker, 2010). Aller Voraussicht nach wird neben sicherheitstechnischen und zuverlässigkeitsrelevanten Aspekten insbesondere die Käuferakzeptanz die Topologien der nächsten EV-Generationen prägen. Sie hängt entscheidend davon ab, welcher Funktionsumfang zu welchem Preis umgesetzt werden kann. In der unternehmerischen Praxis wird daher insbesondere auf einfache, zuverlässige und günstige Konzepte gesetzt, denn nur durch den Einsatz einfacher Antriebsstrangtopologien kann eine Konkurrenzfähigkeit zu konventionellen Fahrzeugkonzepten sichergestellt werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die genannten Topologien zusammen mit ihren Vor- und Nachteilen nicht weiter betrachtet – der Einsatz multipler Motoren ist bis dato die Ausnahme. Dies soll als Gestaltungsprämisse im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens Anwendung finden.

Die Wahl der in Kapitel 4.1.2 genannten HV-Bus Nennspannung ist ein weiterer wichtiger Systemgestaltungsaspekt. Sicherheitstechnische Aspekte sprechen für niedrige Spannungsniveaus von bis zu 60 V (Schutzkleinspannung), da sehr einfach ausgeschlossen werden kann, dass von spannungsführenden Teilen eine Gefahr für die Fahrzeuginsassen ausgeht. Niedrige Spannungen bedeuten bei gleicher Leistung jedoch auch höhere Ströme, wodurch die Verluste in der Maschine und der Kupferaufwand für das Bordnetz – insbesondere bei verteilten Topologien – signifikant steigen. Daher orientieren sich die HV-Betriebsspannungen oft an der Spannungsfestigkeit kommerziell verfügbarer Leistungshalbleiter, die entweder bei 400 V (600 V-Bauelemente) oder bei 900 V (1.200 V-Bauelemente) liegen. Diese Spannungsniveaus versprechen aus Sicht der leistungselektronischen Komponenten eine optimale Ausnutzung der Bauelemente (Kampker, Vallée, & Schnettler, 2013).

Grundsätzlich lassen sich alle elektrischen Maschinenarten auch in EVs einsetzen. Die Auswahl sollte auf Basis der Bewertung verschiedener Kriterien (z. B. zu erwartendes Fahrprofil, Kostenziel, fertigungstechnische Realisierbarkeit, Wartungsfähigkeit, Lebensdauer, Leistungsdichte oder Wirkungsgrad) erfolgen. Kommerziell finden bislang vor allem permanenterreichte Maschinen ihre Anwendung, da sie gute Wirkungsgrade und durch den Einsatz von Hochenergiepermanentmagneten eine sehr hohe Leistungsdichte aufweisen (Kampker, Vallée, & Schnettler, 2013). Aber auch Asynchronmaschinen, Reluktanzmotoren und Transversalflussmaschinen lassen sich je nach Anwendungsfall in EVs finden. Für den Betrieb von Drehfeldmaschinen werden dabei in der Regel dreiphasige Wechselrichter (z.B. B6C-Brücken) eingesetzt.

4.1.4 Leistungselektronik und Peripherie

Die Leistungselektronik gilt aufgrund ihres hohen Einflusses auf systemprägende Eigenschaften bei vielen Innovationen als wichtige Schlüsseltechnologie. Derjenige Wechselrichter, der die elektrische Maschine speist, ist eine der zentralen Komponenten des Antriebssystems. Dabei obliegt die komplexe, dynamische Steuerung der elektromechanischen Energiewandlung des Systems der Wechselrichterregelung – eine enge Verknüpfung der Forschungsgebiete der Leistungselektronik und der elektrischen Antriebe ist die Folge. (Kampker, Vallée, & Schnettler, 2013)

Der Einsatz von Leistungselektronik beschränkt sich aber nicht nur auf die Antriebskomponenten. Auch viele Hilfsaggregate wie beispielsweise die elektrische Lenkunterstützung oder das Batteriemanagement mit der dazugehörigen Ladeelektronik sind prädestinierte Applikationen für die neueste Leistungselektronik. Wirkungsgrade von deutlich über 90 % sind üblich.

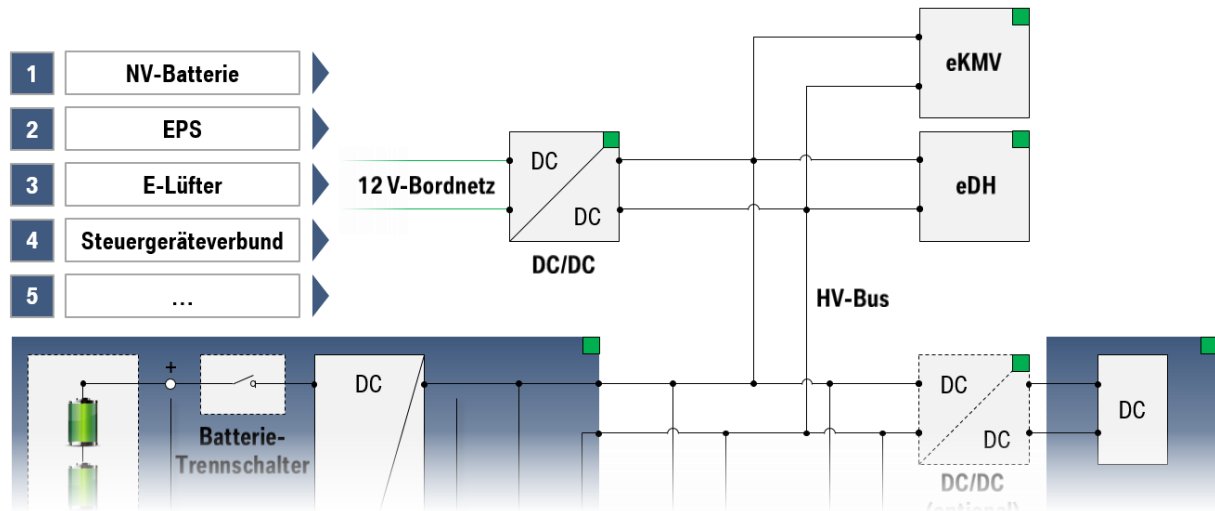


Abbildung 4-5: Der HV-Bus speist zahlreiche weitere elektrische Verbraucher im Gesamtfahrzeugsystem mit Energie; Bestehende NV-Verbraucher werden über einen zusätzlichen DC/DC-Wandler gekoppelt (eigene Darstellung als Ergänzung zu Abbildung 4-2)

Die in Abbildung 4-2 beschriebene HV-Systemarchitektur ist um weitere Leistungsabnehmer am HV-Bus zu erweitern (vgl. Abbildung 4-5). In der Regel werden Verbraucher hoher Leistungen, wie die Klimatisierungssysteme, direkt an das HV-Netz angeschlossen – dazu gehören der elektrische Kältemittelverdichter (eKMV) und der elektrische Durchlaufheizer (eDH). Üblicherweise werden jedoch auch zahlreiche Verbraucher und Technologien aus konventionellen Fahrzeugen verwendet. Das hierfür typische Niederspannungs-Bordnetz (12 V) wird über einen DC/DC-Wandler mit dem Spannungsniveau der Traktionsbatterie gekoppelt.

Unabhängig vom Einsatzgebiet strebt der fortschreitende Stand der Technik immer höhere Schaltfrequenzen der leistungselektronischen Bauelemente an. Hierdurch verspricht man sich geringere Filteraufwände, die zudem Bauvolumen und Kosten von Komponenten herabsetzen. Gleichzeitig wirken aber Beschränkungen der schaltenden Halbleiterbauelemente dieser Zielvorgabe entgegen. Die mit der Schaltfrequenz steigenden Schaltverluste sind durch die maximale abführbare Verlustleistung begrenzt. Entsprechend ist die Herausforderung in der Auslegung eines leistungselektronischen Wandlers die Abbildung des Optimums aus Wirkungsgrad, Bauraum, Gewicht und Kosten. Insgesamt lässt sich ein Trend hin zur Hochintegration einzelner Komponenten bzw. des Antriebswechselrichters in die Maschine erkennen. Diese soll künftig deutlich höhere Leistungsdichten ermöglichen (März, Eckardt, & Schletz, 2007). Damit verbunden ist die Reduktion von Kabelverbindungen. Dies hat wiederum Nachteile wie etwa einen erhöhten Vibrationseintrag durch die mechanische Kopplung der Leistungselektronik zur Maschine. Auch aus Sicht der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) ist der Betrieb verschiedener Komponenten auf immer kleiner werdendem Bauraum kritisch zu bewerten. Filteraufwände sind ein fortlaufend diskutiertes Themengebiet in der Leistungselektronik und in der Regel mit hohen Aufwänden verbunden.

Zur Erreichung der erforderlichen hohen Schaltfrequenzen ist der Einsatz von Leistungshalbleitern erforderlich. Durch ihren isolierten Aufbau ermöglichen sie hohe Leistungsdichten – zumeist werden IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistor) verwendet, die sich durch geringe Verluste, gute Parallelschaltbarkeit und leistungslose Ansteuerung auszeichnen.

4.2 Technologierestriktionen

Der Einsatz konventioneller Batteriespeichersysteme bedingt, zusammen mit der dafür nötigen Leistungselektronik, verschiedene Hürden für eine schnellere Marktdurchdringung der Elektromobilität.

KOMPLEXITÄT UND KOMPLEXITÄTSKOSTEN: Üblicherweise geht er mit höheren Kosten im Vergleich zu bisherigen Antriebstechnologien einher. Viele Systemanforderungen erfordern maßgeschneiderte technische Lösungen für das EV – die hierdurch induzierte hohe Anzahl an Fahrzeugvarianten wurde bereits erläutert (vgl. Kapitel 4.1.2) – und lassen gleichzeitig an Effizienz und Zuverlässigkeit vermissen (Musk, 2015). Manche Fahrzeugkonzepte partitionieren Teilkomponenten des Ladesystems sogar off-board, um die Komplexität der EV-Systemarchitektur zu verringern. Zudem korrelieren höhere Ladeleistungen unmittelbar mit zusätzlichen Herstellungskosten, bidirektionale Ladeschnittstellen sind bislang nicht wirtschaftlich darstellbar.

BAUELEMENTE UND FILTERAUFWAND: Derzeitige Umrichterkonzepte basieren auf Pulsweitenmodulation (PWM) und gehen mit zahlreichen systembedingten Nachteilen einher. Gemeinhin eingesetzte Ein- oder Mehrpuls-Umrichter sind sehr Oberschwingungsbehaftet (THD) und erfordern neben kompensierenden Filtern¹⁵ auch den Einsatz von Hochspannungsschaltern (hohe Spannungsfestigkeit verwendeter Bauteile). Neben ihrer hohen Fehleranfälligkeit sind sie insbesondere im Teillastbetrieb sehr ineffizient (Baumhöfer, Brühl, Rothgang, & Sauer, 2014) (Kawakami, et al., 2014).

ANFORDERUNGEN AN BATTERIEZELLEN UND BALANCING: Die statische Struktur des Batteriestacks ist aus industriellen Anwendungen bekannt und hat bislang kaum Adaption für das EV erfahren. Der Defekt eines Batteriepacks, ja sogar einer einzelnen Zelle, führt zu einem Ausfall des Gesamtsystems. Die schwächste Zelle im Gesamtsystem ist maßgeblich für die Performance des BSS. Auch deshalb sind die Toleranzanforderungen an Kapazität und Innenwiderstand der eingesetzten Zellen sehr hoch. Trotz immer geringerer Fertigungstoleranzen und beschriebener Möglichkeiten des Balancings, müssen alle Batteriezellen eines Batteriespeichersystems zahlreiche Anforderungen erfüllen. Sie sollen vom gleichen Hersteller und Typ sein, sowie aus derselben Produktionscharge stammen. Zudem sollte ihr Innenwiderstand, SOC und „State of Health“ (SOH) möglichst identisch sein. Nur so ist in herkömmlichen Batteriespeichersystemen sicherzustellen, dass sich alle verwendeten Zellen in ihrem Verhalten ähneln (Korthauer, 2013). Das trotz dieser Maßnahmen erforderliche Balancing der Batteriepacks ist zudem – ob aktiv oder passiv – stets verlustbehaftet. Ein Einsatz unterschiedlicher Zelltechnologien (z.B. Hochenergie- und Hochleistungszellen) ist nicht möglich.

¹⁵ Erhöhter Filteraufwand für die EMV korreliert mit steigenden Anforderungen an sowohl aktive als auch passive Filter. Höhere Bauteil- und somit Systemkosten sind die Folge. Der Bauraumbedarf steigt.

HOHE SYSTEMSPANNUNGEN: Die Systemspannung des Batteriespeichersystems ist nicht anpassbar und durch die hartverdrahtete Struktur des BSS bestimmt. Die resultierenden hohen Zwischenkreisspannungen (die Klemmenspannung des BSS ist üblicherweise deutlich oberhalb der Schutzkleinspannung) erfordern ein aufwändiges Sicherheitskonzept.

4.3 Die modulare Multilevel-Batterie im Elektrofahrzeug

Die Multilevel-Umrichter-Technologie gewinnt unter anderem in der Energietechnik immer mehr an Bedeutung und befindet sich bereits heute in großtechnischer Anwendung (Leuchtturmprojekt: “HVDC Trans Bay Cable” in San Francisco). Aber auch in der Batterietechnik sind modulare Multilevel-Umrichter (MMC) mit integrierten Batteriemodulen ein vielversprechender Ansatz, um oben genannte Technologierestriktionen zu reduzieren oder sogar zu überwinden.

Während diese Technologie fortlaufend Gegenstand des wissenschaftlichen Diskurses ist, werden schon heute erste auf ihr beruhende Systeme installiert (Kawakami, et al., 2014). Eines ihrer charakteristischen Merkmale ist die Integration von Batteriepacks niedriger Spannung. Sie ersetzen die in MMC-Systemen üblicherweise eingesetzten Niedervoltkondensatoren (Lesnicar & Marquardt, 2003). Während schon die herkömmlichen MMCs die Effizienz des Systems um mehr als 2 % im Vergleich zu bisherigen spannungsgeführten Zweipunkt-Umrichtern erhöhen können (Allebord, Hamerski, & Marquardt, 2008), gibt es weiteres Optimierungspotenzial durch das Verschmelzen von Batteriespeichersystem und Umrichter (Soong & Lehn, 2014). Auch konnte bereits gezeigt werden, dass diese Systeme die Effizienz im Teillastbetrieb steigern können. Trotz der höheren Komplexität ihrer Komponenten erweisen sie sich als betriebswirtschaftlich vielversprechend und im Vergleich zu konventionellen Batteriespeichersystemen als wettbewerbsfähig (Chang, Iliina, Hegazi, Voss, & Lienkamp, 2017).

Abbildung 4-6 skizziert einen ersten Vergleich der Multileveltechnologie gegenüber herkömmlicher Batterie- und Umrichtertechnologie und gibt einen Ausblick auf die Funktionsweise der M2B. Konventionelle Batterieumrichter nutzen in der Regel Pulsweitenmodulation, um Gleichspannungen zu zerhacken (vgl. Abbildung 4-6(a)). Die Amplitude der Spannungsimpulse entspricht dabei der vollen Ausgangsspannung des Batteriespeichersystems bzw. der HV-Zwischenkreisspannung, während ihre Pulslänge dem Verlauf der zu erzeugenden Sinusspannung folgt. Anwendung findet diese Vorgehensweise häufig in der Antriebstechnik und somit auch in der Elektromobilität. Trotz ihrer wenig komplexen Struktur haben PWM-Umrichter im Zusammenspiel mit statischen Batteriespeichersystemstrukturen die bereits erläuterten Limitationen. Modulare Multilevel-Umrichter verwenden – statt wie bisher nur eine – mehrere Spannungsstufen, um den geforderten Signalverlauf nachzubilden.

Zahlreiche Varianten dieser sogenannten „Split Battery“ Systeme wurden bereits evaluiert. Sie unterscheiden sich in der Art und Weise der Anbindung des Batteriepacks an die jeweilige Leistungselektronik. Auch die leistungselektronischen Schaltungen selbst sowie die MMC-Topologien variieren, wobei die einfachste mögliche Topologie die Batteriepacks durch bloßes Ersetzen der Kondensatoren eines MMC-Moduls in die Leistungselektronik des Umrichters integriert (Zheng, Wang, Peng, Li, & Xu, 2013).

MMC-basierte „Split Battery“ Systeme (vgl. Abbildung 4-6(b)) besitzen die Fähigkeit, jedes einzelne Batteriepack entsprechend der Erfordernisse des jeweiligen Betriebszustandes dynamisch anzusprechen.

Hierdurch können beliebige Spannungsformen – ihre Auflösung wird durch die Spannungen der eingesetzten Batteriepacks definiert – an den Ausgangsklemmen des Batteriespeichersystems dargestellt werden. Verbleibende Oberschwingungen können durch zusätzliche Pulsweitenmodulation weiter reduziert werden.

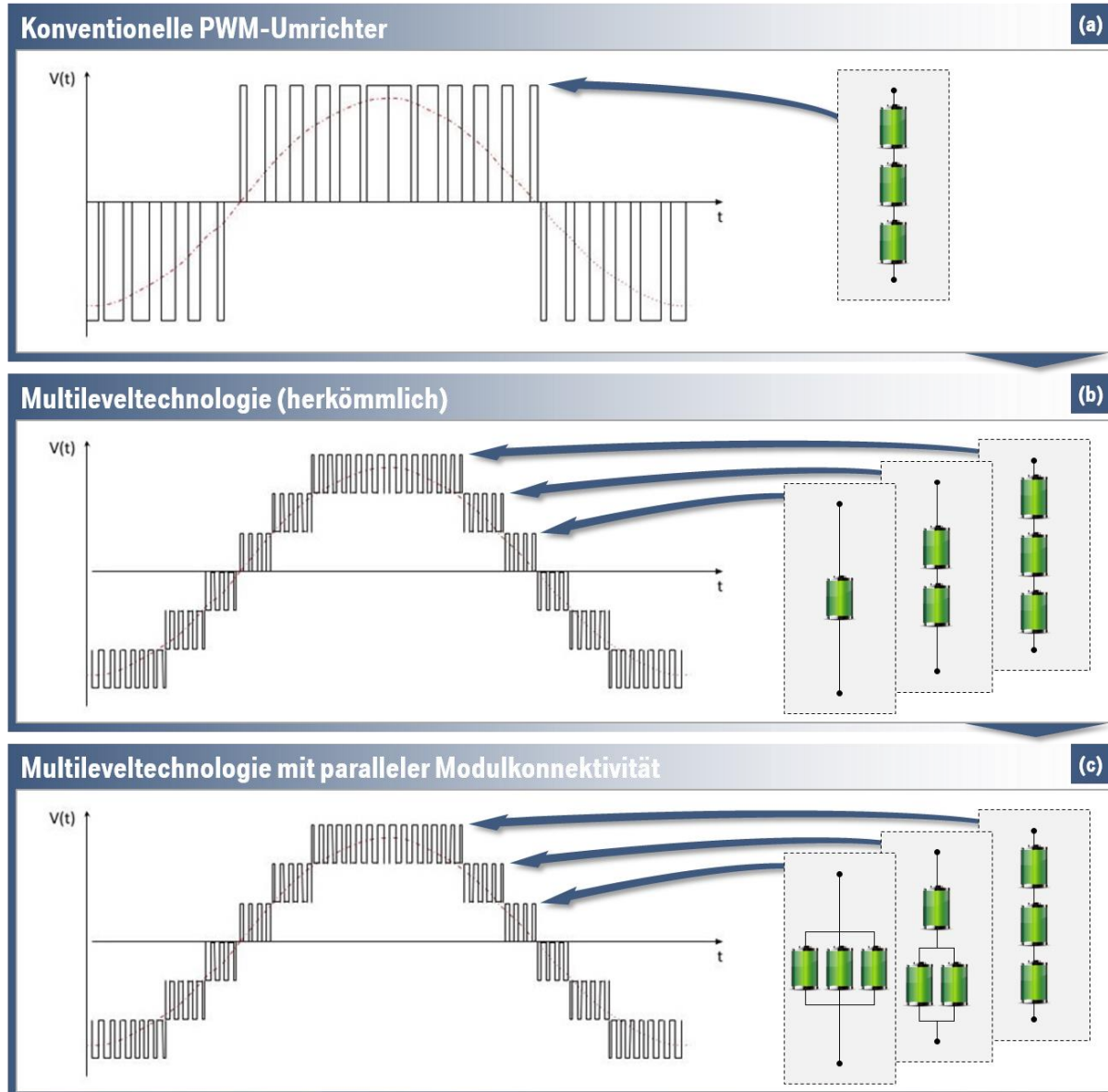


Abbildung 4-6: Vergleichende Darstellung der betrachteten Batterieumrichterkonzepte (eigene Darstellung)

Gleichzeitig gibt es aber auch konzeptbedingte Einschränkungen: Die Modulation erfolgt üblicherweise durch die Module selbst, wodurch die Batteriepacks beim Laden und Entladen Rippelströmen ausgesetzt werden, deren Höhe der des Systemstroms gleichzusetzen ist und deren Frequenz der der Modulation entspricht. Im Ergebnis treten sehr steile Stromflanken auf, die wiederum Filter erfordern. Diese Strompulsformen sind bereits aus bisherigen MMC Systemen bekannt, wo sie aber keine weiterführende Beachtung finden. Sie haben keine negativen Auswirkungen auf die dort eingesetzten Kapazitäten. Bei „Split Battery“ Systemen hingegen erfolgt die Anbindung der Batteriepacks an die MMC Module oft über dedizierte Schaltungen (z.B. DC/DC-Wandler), um den Verlauf der Batterieströme zu glätten. Diese Schaltungen werden bevorzugt isoliert ausgeführt (Hillers & Biela, 2013) (Jauch & Biela, 2014),

wodurch sich die Rippelströme inhärent reduzieren. Aber auch nichtisolierte Varianten sind denkbar (Schroeder, et al., 2013) (Kawakami, et al., 2014) (Maharjan, Inoue, Akagi, & Asakura, 2009). Letztere nutzen Kondensatoren, die, statt den Stromverlauf zu glätten, in Parallelschaltung zu den Batteriepacks agieren und so in der Lage sind, die Stromüberhöhungen aufzunehmen.

Die durchschnittlichen Lade- und Entladeströme der Batteriepacks beeinflussen nicht zuletzt auch die Effizienz des Gesamtsystems (Liu, et al., 2014). Die systembedingte Betriebsstrategie, Batteriepacks immer dann zu überbrücken, wenn sie für den jeweiligen Betriebspunkt nicht erforderlich sind, stellt somit einen weiteren negativ zu bewertenden Faktor dar. Nichtsdestotrotz sind MMC-basierte “Split Battery” Systeme ein sehr vielversprechender Ansatz, um die Batterietechnologie weiter voranzutreiben. In technischer Hinsicht sind sie die Vorstufe der Modularen Multilevel-Batterie (M2B), wie sie im Rahmen der vorliegenden Arbeit weitere Betrachtung findet. Abbildung 4-7 visualisiert die grundlegende Idee, weshalb der Einsatz dieser Technologie im EV als sinnvoll erscheint.

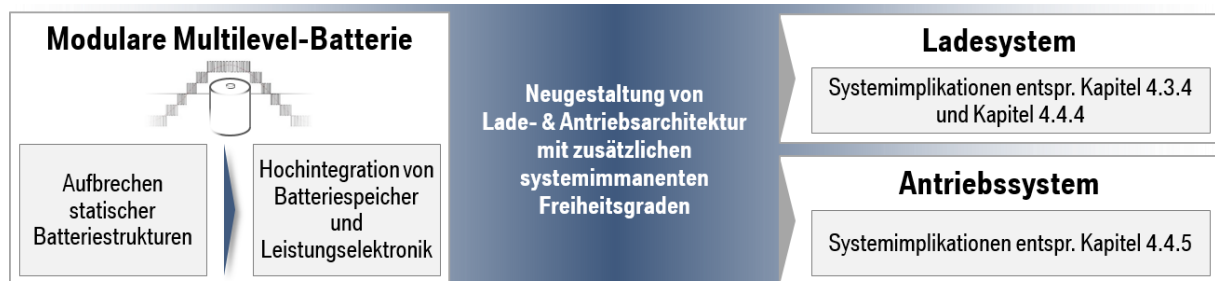


Abbildung 4-7: Die modulare Multilevel-Batterie prägt sowohl das Lade- als auch das Antriebssystem eines EVs entscheidend (eigene Darstellung).

Die M2B ersetzt neben dem gesamten Batteriesystem eines EVs auch die zugehörigen Umrichter sowie das Ladesystem (Helling, Pfaeffl, Huber, Goetz, & Weyh, 2014). Durch disruptive Neugestaltung der Systemarchitektur von Elektrofahrzeugen ist sie in der Lage, den zuvor genannten Einschränkungen heutiger Batteriespeichersysteme zu begegnen. Dies schließt auch MMC-basierte Systeme ein. Im Kern beruht die M2B auf der Idee, die Technologie eines modularen Multilevel-Parallel-Umrichters (MMPC) für ihren Einsatz in Batteriespeichersystemen zu befähigen und zu optimieren.

Das vorliegende Kapitel erörtert nun die Mikro- und Makrotopologie von M2B-Systemen. Anschließend werden wesentliche Eigenschaften der Technologie hergeleitet – Grundlage hierfür ist die Betrachtung verschiedener Betriebsstrategien und deren Einfluss auf z.B. Stromkurven, Effizienz oder Alterungsprozesse. Des Weiteren werden die Auswirkungen auf EV-Systemarchitekturen und Fahrzeugeigenschaften detailliert.

4.3.1 Mikrotopologie

Die M2B erweitert die bekannte MMC-Struktur (Marquardt, 2010) um die Möglichkeit, benachbarte Batteriepacks nicht nur in Serie, sondern auch parallel zueinander zu betreiben (vgl. Abbildung 4-6(c)). Diese Kerneigenschaft befähigt das System, jedes Batteriemodul in noch höherem Maße individuell und unter Berücksichtigung seiner spezifischen Parameter und Eigenschaften zu betreiben.

Um die nötigen verschiedenen Schaltzustände zu ermöglichen, ist jedes Batteriemodul in eine leistungselektronische Schaltung zu integrieren. Befähigt man das System auch für parallele Modulkonnektivität, hat dies Auswirkungen auf sowohl Mikro- als auch Makrotopologie. Da der grundlegende Aufbau des

Batterieumrichters weiterhin seriell ist, ist jedes Modul ausschließlich mit seinen direkten Nachbarn verbunden. Dabei sind jeweils zwei voneinander getrennte Verbindungen zwischen aufeinanderfolgenden Modulen vorzusehen. Abbildung 4-8 beschreibt eine exemplarische Mikrotopologie, welche auf der von Helling, et al. (2014) entwickelten „M2PC“-Topologie basiert. Im Gegensatz zu MMC-basierten „Split Battery“ Systemen, werden die Submodule nicht länger als Zweipolelemente ausgeführt. Sie stellen nun jeweils vier Terminals zur Verfügung – zwei für jeden ihrer direkten Nachbarn. Die Terminals werden über Halbbrücken an die Batteriemodule angebunden, welche wiederum aus jeweils zwei Halbleiterschaltern bestehen. Hierfür werden aufgrund ihrer geringen Kosten, ihres geringen ohmschen Widerstandes und ihres schnellen Schaltverhaltens vorzugsweise MOSFETs (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) niedriger Spannung eingesetzt. Ein zusätzlicher MOSFET im Strompfad des Batteriemoduls stellt bei Bedarf eine sichere Trennung des Batteriemoduls von den übrigen Bauelementen sicher. Im Ergebnis kann jedes Modul überbrückt werden, ohne die Betriebsfähigkeit des Gesamtsystems zu gefährden. Des Weiteren verhindert dieser Batterieschalter unbeabsichtigte Ausgleichsströme von einem Batteriemodul zum nächsten. Schädigende Betriebszustände während des Ladens oder Entladens und sogar Kurzschlüsse können so vermieden werden.

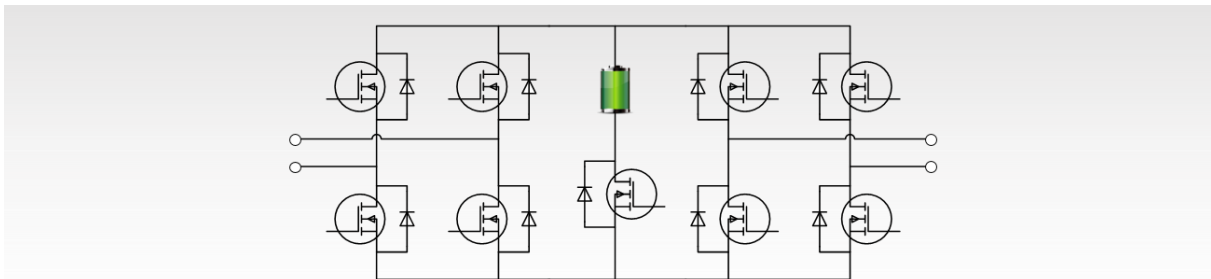


Abbildung 4-8: M2B-Modultopologie mit neun Schaltern (eigene Darstellung)

Kombinatorisch ergeben sich für eine M2B-Modultopologie mit neun Schaltern $2^9 = 512$ mögliche Schaltzustände. Bis zu neun davon sind von praktischer Bedeutung. Die Zustände ‚serielle Konnektivität mit positiver Polarität‘, ‚serielle Konnektivität mit negativer Polarität‘, ‚Bypass mit aktiver Nullspannungsverbindung‘ und der ‚passive Zustand‘ sind bereits aus der MMC-Technologie bekannt. Nun sind jedoch auch parallele Konfigurationen möglich. Diese sind ‚parallele Konnektivität auf der linken Seite mit positiver Polarität‘, ‚parallele Konnektivität auf der rechten Seite mit positiver Polarität‘, ‚parallele Konnektivität auf der linken Seite mit negativer Polarität‘, ‚parallele Konnektivität auf der rechten Seite mit negativer Polarität‘ und ‚parallele Konnektivität auf beiden Seiten‘ (Götz, Peterchev, & Weyh, 2015). Dementsprechend ist nun auch ein Vierquadranten-Betrieb des Systems möglich – zwischen den Terminals können positive und negative Pulsformen dargestellt werden. Abbildung 4-9 zeigt eine einphasige M2B, bestehend aus vier Vierquadranten-Modulen mit jeweils neun Schaltern. Für einen beispielhaften Betriebszustand sind die zugehörigen Strompfade in Rot hervorgehoben. Modul 1 ist in Serie mit seinem Nachbarn verbunden. Die Module 2 und 4 werden parallel zueinander betrieben, während Modul 3 überbrückt ist und somit keinen direkten Beitrag leistet. Dieses Vorgehen, Submodule zu „bypassen“, beeinflusst die Schaltzustände der jeweils benachbarten Module nicht. So ist – anders als bei bisherigen MMPCs (Soong & Lehn, 2014) – eine parallele Konfiguration zweier nicht unmittelbar benachbarter Batteriemodule möglich, während eines oder mehrere dazwischen liegende überbrückt werden.

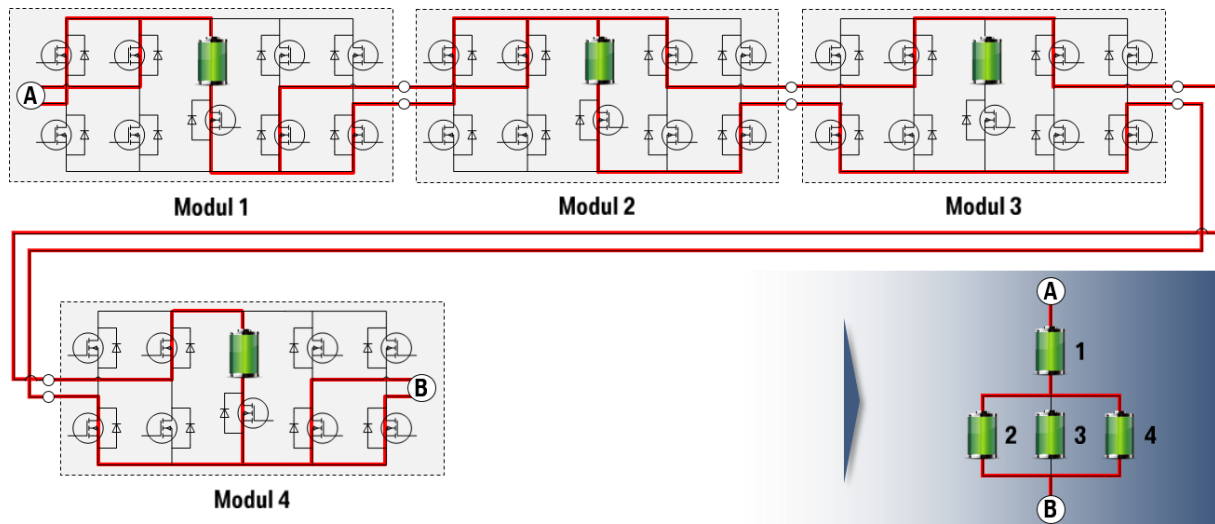


Abbildung 4-9: Einphasige M2B mit insgesamt vier Vierquadranten-Modulen: Die rot dargestellten Strompfade visualisieren mögliche Schaltzustände. Modul 1 ist in Serie zu den beiden parallel betriebenen Modulen 2 und 4, während Modul 3 überbrückt ist. Die resultierende Konfiguration ist im Bild unten rechts zu sehen. (eigene Darstellung)

Neben der beschriebenen Topologie mit neun Schaltern gibt es zahlreiche weitere, die ebenso eine serielle sowie parallele Modulkonnektivität ermöglichen. Um zum Beispiel die Anzahl der Halbleiterschalter zu verringern, schlagen Helling, et al. (2019) eine Topologie mit nur vier MOSFETs pro Batteriemodul vor. Diese ist in einem ersten Schritt nur für einen Zweiquadranten-Betrieb geeignet. Erst durch den Einsatz einer zusätzlichen Vollbrücke können mit dieser Topologievariation neben positiven auch negative Pulsformen zwischen den Batterieterminals realisiert werden. Im direkten Vergleich zur in Abbildung 4-8 beschriebenen Modulausprägung sind hier pro Batteriemodul weniger Bauelemente erforderlich. Auch der Steuerungsaufwand verringert sich entsprechend. Da zusätzlich aber der beschriebene Kommutator erforderlich ist, muss man ebenso die Gesamtkomplexität innerhalb der Systemgrenzen des Batteriespeichersystems in Betracht ziehen. Da in der Elektromobilität vorzugsweise Systeme mit wenigen Batteriemodulen eingesetzt werden, empfiehlt sich die Topologie mit neun Schaltern. Erst bei größeren Systemen überwiegt der Vorteil einer einfacheren Submodultopologie den nötigen Zusatzaufwand (Helling, Glück, Singer, Pfisterer, & Weyh, 2019).

4.3.2 Makrotopologie

Genau wie bei MMC-basierten „Split Battery“ Systemen, setzen sich einphasige Batteriesysteme auch bei der M2B aus einem Strang von ‚n‘ Batteriemodulen zusammen. Dabei hängt die mindestens erforderliche Anzahl der M2B-Submodule von der geforderten Gesamtsystemspannung sowie dem Spannungsniveau der eingesetzten Batteriemodule ab. Die Dimensionierung der Batteriepacks ist für die Komplexität und den Steuerungsaufwand des gesamten M2B-Systems bestimmend. Auch Effizienz und THD werden maßgeblich von ihr beeinflusst. Der Oberschwingungsgehalt reduziert sich linear mit der gewählten Batteriemodulspannung und der dadurch definierten Höhe der Spannungsstufen. Beschränkt man sich auf diesen Zusammenhang, so erscheint es als sinnvoll, einzelne Batteriezellen innerhalb der M2B-Submodule einzusetzen. Abbildung 4-10 zeigt den Spannungsverlauf (120 V, 60 Hz) einer einphasigen M2B mit insgesamt 50 Batteriemodulen. Dabei kommen je Modul keine Batteriepacks, sondern einzelne Batteriezellen mit einer Nennspannung von 3,5 V zum Einsatz. Aus so kleinen Spannungsstufen resultiert auch ohne Pulsweitenmodulation oder zusätzliche Filter ein THD-Wert von nur

0,87 %. Der Spannungsverlauf des Systems ist sehr glatt – einzelne Spannungsstufen werden erst bei näherer Betrachtung sichtbar. Des Weiteren erfordert ein so dimensioniertes Batteriesystem keinerlei zusätzliches Batteriemangement, da jede Batteriezelle individuell angesteuert werden kann.

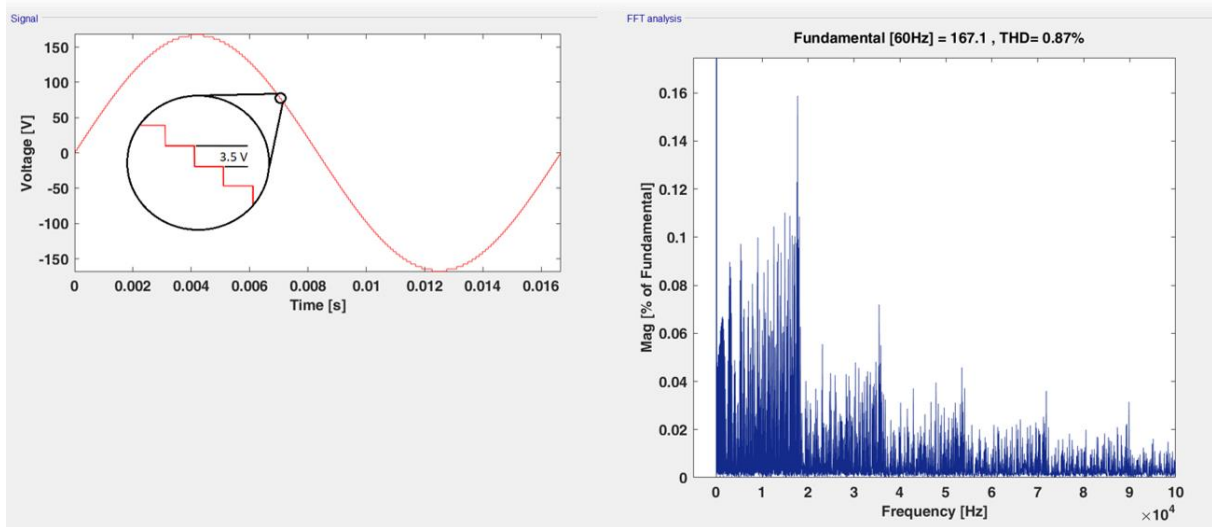


Abbildung 4-10: Spannungsverlauf (120 V, 60 Hz) und THD-Charakteristik einer einphasigen M2B mit insgesamt 50 Batteriemodulen: Jedes davon ist mit nur einer Batteriezelle ausgestattet. (Helling, Glück, Singer, Pfisterer, & Weyh, 2019)

Nichtsdestotrotz sprechen gute Gründe dafür, eine größere Anzahl an Batteriezellen zu einem Batteriepack zusammenzufassen. Dadurch können die Anzahl der benötigten M2B-Module sowie die damit korrelierende Anzahl an Schaltern ebenso wie die Systemkomplexität reduziert werden. Möchte man die Effizienz des Gesamtsystems optimieren, muss man nicht zuletzt auch die individuellen Parameter der eingesetzten Bauelemente in die Betrachtung miteinbeziehen. Dazu gehören genauso wie die Durchlasswiderstände der MOSFETs auch die Innenwiderstände der Batteriezellen bzw. Batteriepacks.

Die Betrachtungen und referenzierten prototypischen Implementierungen im weiteren Verlauf der Arbeit beziehen sich auf Batteriepacks mit einer Nennspannung von 48 V. Einerseits ist dies gängiger Industriestandard, wodurch die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu bisherigen Batteriesystemen gegeben ist. Andererseits erfüllt jedes der Batteriemodule für sich das Schutzkleinspannungskriterium, was deren Handling deutlich vereinfacht.

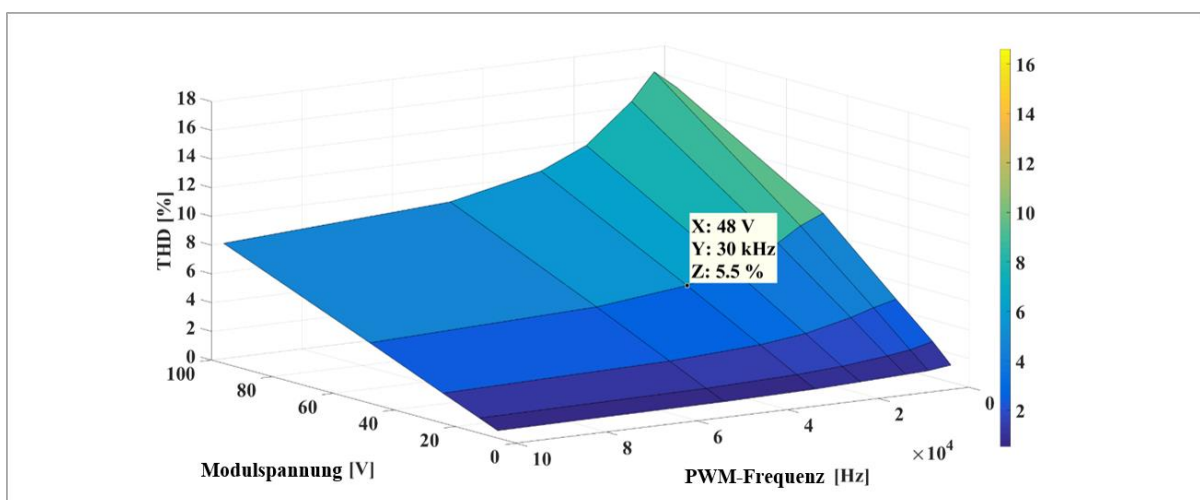


Abbildung 4-11: THD einer einphasigen M2B ohne zusätzliche Filter als Funktion über der Batteriemodulspannung und eingesetzter PWM-Frequenz (Helling, Glück, Singer, Pfisterer, & Weyh, 2019)

Abbildung 4-11 stellt den THD-Verlauf als Funktion der gewählten Batteriemodulspannung und der PWM Frequenz dar. Nimmt man eine Modulierungsfrequenz von 30 kHz an, ergibt sich ein Oberschwingungsanteil von 5,5 %, der im direkten Vergleich zu bisherigen Batteriespeicher- und Umrichter-systemen deutlich überlegen ist. Der Filteraufwand ist – sofern erforderlich – moderat. Die zugrunde-liegende Simulation der einphasigen M2B mit einer Ausgangsspannung von 120V (60 Hz) wurde mit Hilfe eines Matlab/Simulink-Modells durchgeführt.

Möchte man mit den zuvor beschriebenen M2B-Modulen dreiphasige Systeme darstellen, so gibt es dafür verschiedene Möglichkeiten. Sie können – genauso wie bei MMC-basierten Systemen – aus drei Umrichterarmen in Sternkonfiguration gebildet werden. Dabei ist ein Herausführen des Sternpunktes optional (vgl. Abbildung 4-12(a)) (Zheng, Wang, Peng, Li, & Xu, 2013) (Jauch & Biela, 2014) (Maharjan, Inoue, Akagi, & Asakura, 2009). Deltakonfigurationen, wie in Abbildung 4-12(b) zu sehen, sind ebenso möglich. Hierbei wird jeder Arm des Umrichters mit zwei der insgesamt drei Terminals der M2B verbunden (Vasiladiotis & Rufer, 2015).

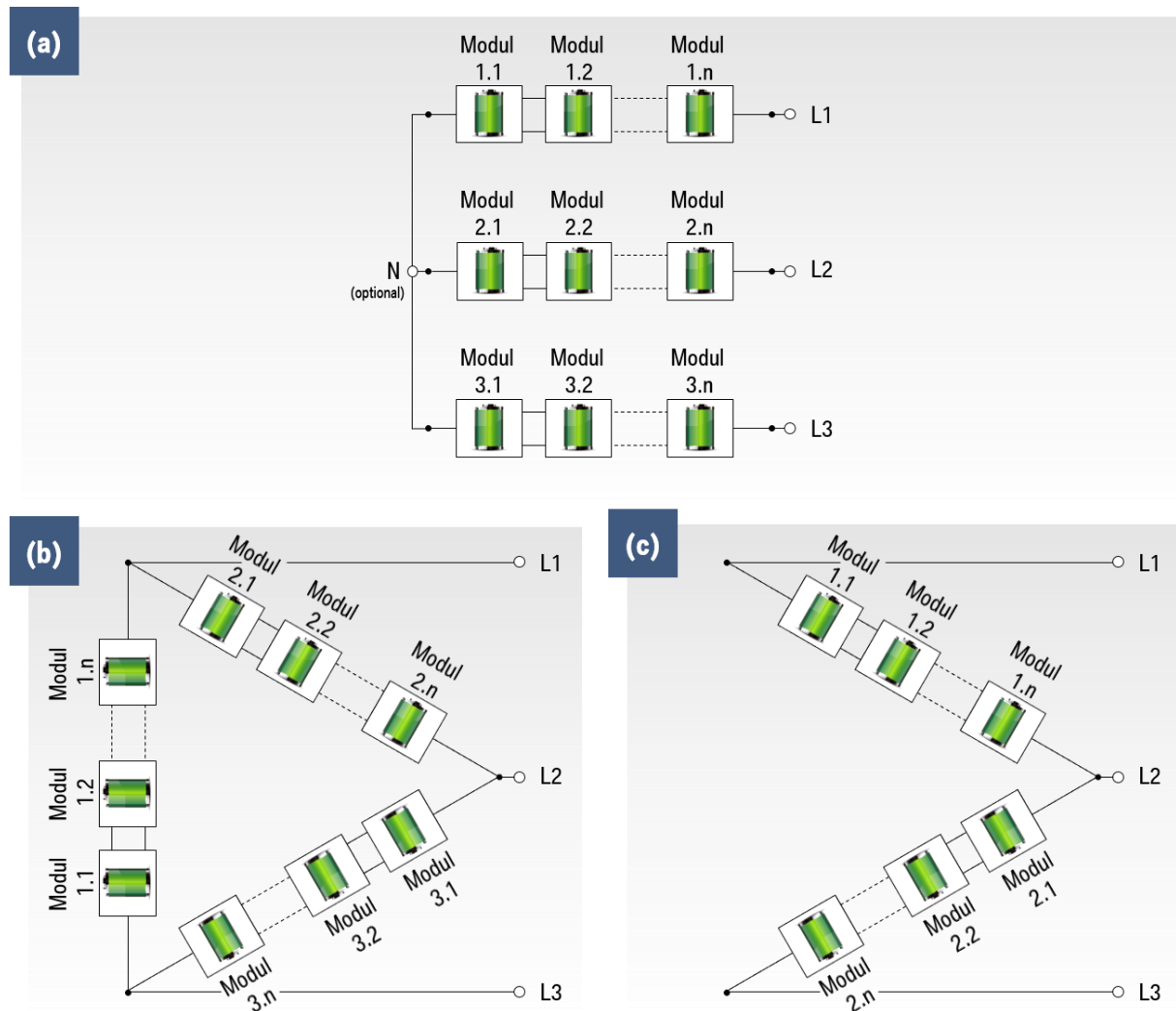


Abbildung 4-12: Systemtopologie eines dreiphasigen M2B-Systems mit (a) Sternkonfiguration und optional herausgeführten Sternpunkt, (b) Deltakonfiguration und (c) reduzierter Strangkongfiguration (eigene Darstellung in Anlehnung an Helling, et al. (2019))

Es ist zu beachten, dass nun zur Darstellung einer definierten Klemmenspannung an den Batteriterminals eine im Vergleich zur Sternkonfiguration um den Faktor $\sqrt{3}$ höhere Anzahl an Batteriemodulen je Strang erforderlich ist. Diese Makrotopologie zeichnet sich durch ihre inhärent höhere Fehlertoleranz aus. Verschiedene Fehlerzustände eines einzelnen M2B-Batteriemoduls oder sogar eines ganzen Umrichterarms haben nicht zwingend den Ausfall des Gesamtsystems zur Folge. Auch mit nur zwei funktionsfähigen Umrichterarmen ist ein sicherer Betrieb weiterhin möglich. Dieses Fallback-Szenario, das einen ausfallsicheren Betrieb von M2B-Systemen mit Deltakonfiguration sicherstellt, ist gleichzeitig auch die dritte Topologievariante (vgl. Abbildung 4-12(c)).

Natürlich geht eine derartige Reduktion der M2B-Umrichterkonfiguration mit einem geringeren Bauteil Aufwand einher. Dabei opfert sie jedoch die zuvor beschriebene Ausfallsicherheit und Fehlertoleranz. Ein weiterer Vorteil der Deltakonfiguration ist, – sollte es zu asymmetrischer Belastung des Systems kommen – dass durch das Ausbilden von Ringströmen Energie von einem Umrichterarm zum nächsten transferiert werden kann. Anders als bei in Stern konfigurierten Systemen ist das Balancieren einzelner Batteriemodule hier ohne Einbezug der Last möglich.

In Summe sind die Wahl der Systemtopologie sowie die Anzahl der Submodule abhängig vom Optimierungsziel eines M2B-Systems (vgl. Abbildung 4-13). Entscheidet man sich für eine vergleichsweise hohe Anzahl an Submodulen, hat dies einen positiven Einfluss auf den Oberschwingungsanteil der Ausgangsspannungen. Ebenso werden zusätzliche BMS je Submodul obsolet und das Schutzkleinspannungskriterium kann eingehalten werden.

Eine geringe Submodulanahl je Strang geht mit anderen Effekten einher. Insgesamt sind für das M2B-System nun weniger Leistungsschalter erforderlich. Die im Gesamtsystem umgesetzten Durchlass- und Schaltverluste der Leistungsbaulemente sind entsprechend geringer. Ebenso reduziert sich die Systemkomplexität zusammen mit ihrem Steuerungsaufwand.

Uneindeutig ist der Zusammenhang zwischen Modulanzahl und Systemeffizienz. Einerseits bedingen die geringeren Batterieverluste durch dynamische Parallelisierung der Module während des Betriebs bei höherer Modulanzahl einen Effizienzanstieg (vgl. Kapitel 4.3.3). Andererseits sind hierfür auch zusätzliche Leistungsschalter erforderlich, die in Summe für das Gesamtsystem – auch wenn kleinteiligere Module singular betrachtet vergleichsweise geringere Verluste aufweisen – durch ihre Schalt- und Durchlassverluste einen gegenteiligen Effekt haben. Zudem kann auch bei geringer Modulanzahl durch statische Parallelisierung von Batteriemodulen oder Modulsträngen innerhalb eines M2B-Moduls ein Effizienzgewinn durch Reduktion des Innenwiderstandes erreicht werden.

Die Kostenbewertung eines M2B-Systems verhält sich nicht weniger komplex. Hier korreliert eine höhere Submodulanahl mit steigenden Kosten für leistungselektronische Bauelemente (insb. MOSFETs). Eine geringere Anzahl an Submodulen bedingt zunächst also auch den Einsatz weniger Leistungsschalter, auch wenn diese eine höhere Spannungsfestigkeit aufweisen müssen. Durch höhere Oberschwingungsanteile in den Ausgangsspannungen steigt jedoch auch der Filteraufwand für das Gesamtsystem. Ebenso kann die fehlende individuelle Konfigurierbarkeit einzelner Batteriezellen durch das Zusammenfassen zu größeren Batteriemodulen separate BMS erforderlich machen, die wiederum mit Aufwand einhergehen.

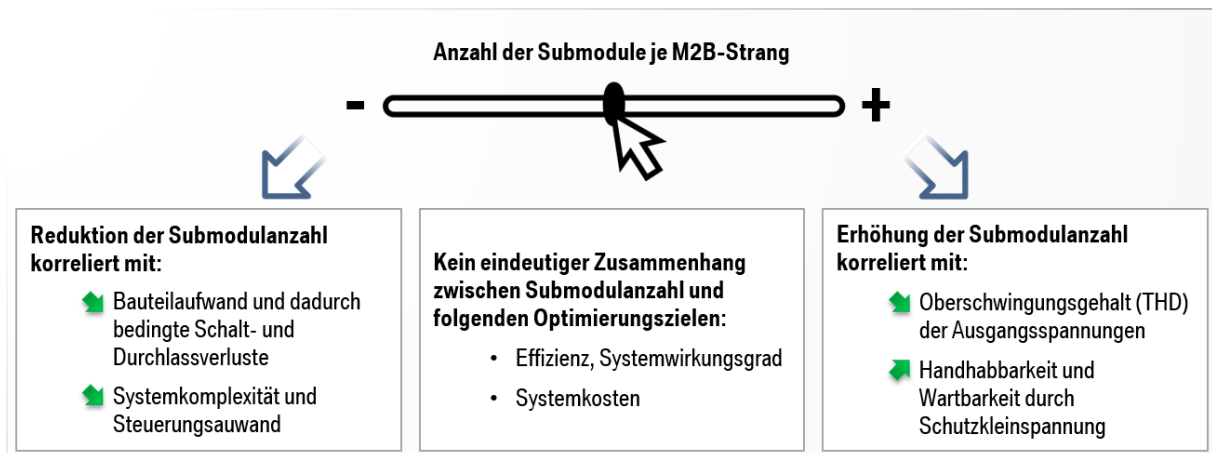


Abbildung 4-13: Wahl der Anzahl der Submodule ist abhängig vom Optimierungsziel eines M2B-Systems (eigene Darstellung).

Auch die Systemtopologie selbst wirkt sich auf die Kosten des M2B-Systems aus. Zur Darstellung einer definierten Klemmenspannung ist bei Deltakonfiguration eine um den Faktor $\sqrt{3}$ höhere Modulanzahl erforderlich, weshalb die Sternkonfiguration zunächst vorteilhaft erscheint. Jedoch müssen auch die Ausfallsicherheit des Systems sowie sein Balancingverhalten in der Entscheidung mit berücksichtigt werden.

4.3.3 Eigenschaften

Das vorliegende Kapitel gibt einen Überblick über die grundlegenden Eigenschaften von M2B-Systemen. Bereits eingangs wurde erwähnt, dass diese aufgrund ihres modularen Aufbaus über zusätzliche Freiheitsgrade verfügen. Hierdurch werden Betriebsstrategien ermöglicht, die auf geringere Innenwiderstände (höhere Effizienz), minimale Speicherzyklisierung oder eine gleichförmige Alterung der Batteriemodule abzielen. Die zugrundeliegenden Zusammenhänge werden nun erläutert.

VERGLEICHENDE MATHEMATISCHE VERLUSTBETRACHTUNG:

In der folgenden theoretischen Herleitung werden vereinfachend ausschließlich die Batterieverluste verschiedener Topologien betrachtet. Einflüsse weiterer Umrichterkomponenten, wie zum Beispiel Halbleiterbauelemente, werden zunächst nicht berücksichtigt.

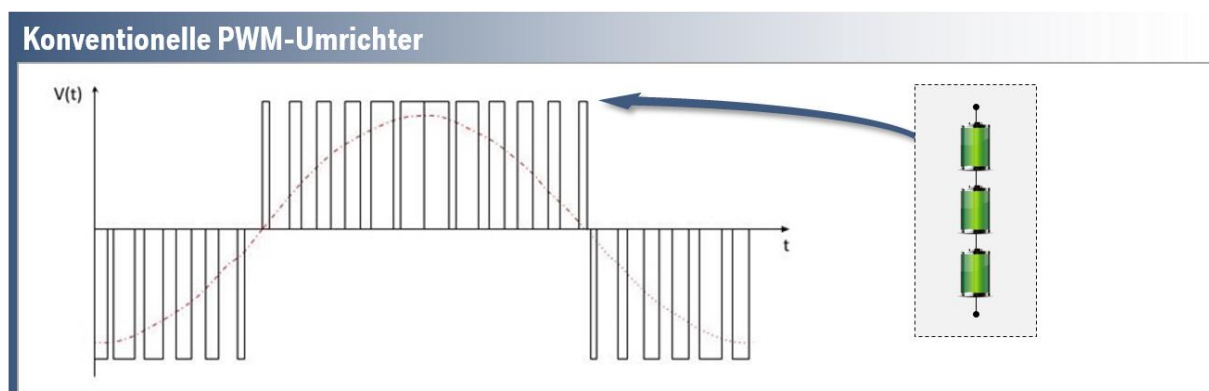


Abbildung 4-14: Konventionelle Umrichtersysteme nutzen statische Batteriespeichersysteme und generieren gewünschte Ausgangsspannungen mittels Pulsweitenmodulation. (eigene Darstellung)

Bisher werden in Elektrofahrzeugen statisch konfigurierte Batteriespeichersysteme eingesetzt (vgl. Abbildung 4-14). Daher gilt für ihren Innenwiderstand

$$R_i = R_{Batt} = const \quad (1)$$

und für die Ausgangsspannung des BSS

$$U_{Batt} = const. \quad (2)$$

Die Batterieverlustleistung ergibt sich in Abhängigkeit des Laststromes zu

$$P_V = I_{Last}^2 \times R_{Batt}, \quad (3)$$

während für den Spannungs- und Stromverlauf an der Last

$$U_{Last} = U_{Batt} \times \sin \omega t \quad \text{sowie} \quad I_{Last} = \frac{U_{Last}}{R_{Last}} = \frac{U_{Batt}}{R_{Last}} \times \sin \omega t \quad (4)$$

gelten. Die Ausgangsleistung des Systems lässt sich mit

$$P_{Last} = U_{Last} \times I_{Last} = \frac{U_{Batt}^2}{R_{Last}} \times \sin^2 \omega t \quad (5)$$

beschreiben. Im Ergebnis gilt für die Batterieverlustleistung bei Nutzung konventioneller Systemtopologien mit statischen Batteriespeichern¹⁶ somit

$$P_V = \frac{U_{Batt}^2 \times R_{Batt} \times \sin^2 \omega t}{R_{Last}^2}. \quad (6)$$

In einem zweiten Schritt wird nun der Vergleich zu „Split Battery“ Systemen mit zunächst ausschließlich serieller Modulkonnektivität gezogen. Abbildung 4-15 zeigt, dass hier zu jeder Zeit nur diejenigen Batteriemodule zum Einsatz kommen, die zur Darstellung des gewünschten Ausgangsspannungsverlaufes an den Batterieterminals erforderlich sind. Die Anzahl der Spannungsstufen bzw. Batteriemodule ist je nach Anforderungen an das Batteriespeichersystem variabel.

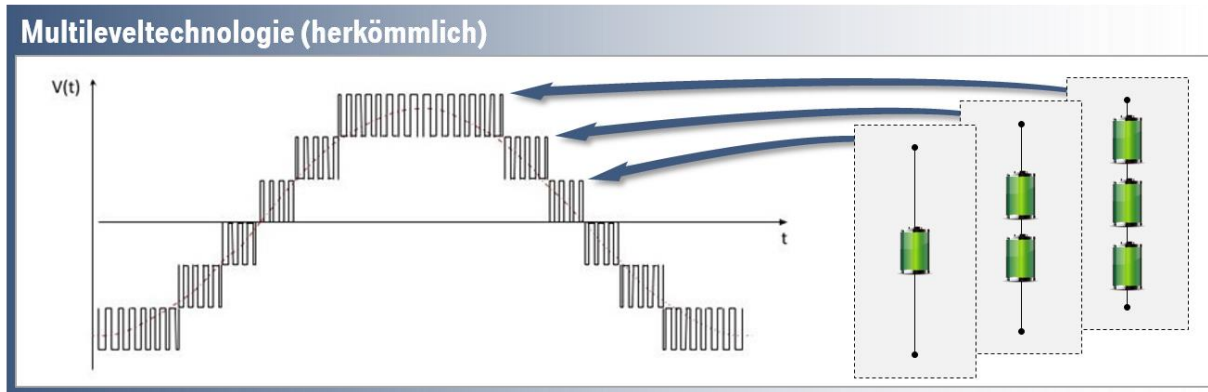


Abbildung 4-15: Exemplarischer Spannungsverlauf eines "Split Battery" Systems mit serieller Modulkonnektivität und Darstellung der zugehörigen Submodulkonfigurationen. (eigene Darstellung)

Auch hier gilt für die Batterieverlustleistung der bereits aus obiger Betrachtung bekannte Zusammenhang

$$P_V = I_{Last}^2 \times R_i(U_{Last}). \quad (7)$$

¹⁶ Anmerkung: Dieser Zusammenhang gilt nicht nur für rein PWM-basierte Zweipunktumrichterkonzepte. Bei Nutzung von kondensatorbasierten Multilevelumrichtern wie zum Beispiel MMC oder M2PC verhält sich die Batterieverlustleistung analog. Auch hier werden aufgrund der fehlenden Hochintegration zu jedem Zeitpunkt alle Batteriemodule eines statisch konfigurierten BSS belastet.

Der Innenwiderstand des BSS ist hier jedoch nicht länger konstant. Vielmehr ist er eine Funktion in Abhängigkeit zur Ausgangsspannung an den Terminals der „Split Battery“. Idealisierend wird für die mathematische Betrachtung angenommen, dass sich das System aus unendlich vielen Modulen zusammensetzt. Der Widerstand kann somit als direkt proportional zur Ausgangsspannung angenommen werden. Es gilt:

$$R_i(U_{Last}) = R_{Batt} \times \frac{|U_{Last}|}{U_{Batt}} \quad (8)$$

Für die Batterieverlustleistung ergibt sich somit insgesamt

$$P_V(t) = \frac{U_{Batt}^2 \times R_{Batt} \times \sin^2 \omega t \times |\sin \omega t|}{R_{Last}^2} \quad (9)$$

Um den Verhältnissfaktor der beiden Verlustleistungen für statische BSS und das beschriebene „Split Battery“ System zu ermitteln, sind die beiden Integrale über jeweils eine volle Periode der Ausgangsschwingung in Relation zu setzen.

Für statische BSS ergibt sich

$$\int_0^{2\pi} \sin^2 \omega t \, d\omega t = \left[\frac{1}{2} \omega t - \frac{1}{2} \sin \omega t \times \cos \omega t \right]_0^{2\pi} = \pi, \quad (10)$$

während für serielle „Split Battery“ Systeme

$$\int_0^{2\pi} \sin^2 \omega t \times |\sin \omega t| \, dt = 2 \times \int_0^\pi \sin^3 \omega t \, dt = 2 \times \left[\frac{1}{12} \cos 3\omega t - \frac{3}{4} \cos \omega t \right]_0^\pi = \frac{8}{3}$$

gilt. Die Batterieverluste von herkömmlichen BSS übersteigen die von „Split Battery“ Systemen somit um einen Faktor von bis zu

$$\frac{P_{V_{Konventionell}}}{P_{V_{Split Battery}}} = \frac{3}{8} \pi \approx 1,18. \quad (11)$$

Betrachtet man in einem nächsten Schritt M2B-Systeme, so gilt auch Gleichung (9) nicht länger. Da nun – sofern möglich – jedes Batteriemodul stets zum aktuellen Betriebspunkt der M2B beitragen soll (vgl. Abbildung 4-16), ergibt sich ein komplexerer Zusammenhang zwischen Batteriewiderstand und Ausgangsspannung.

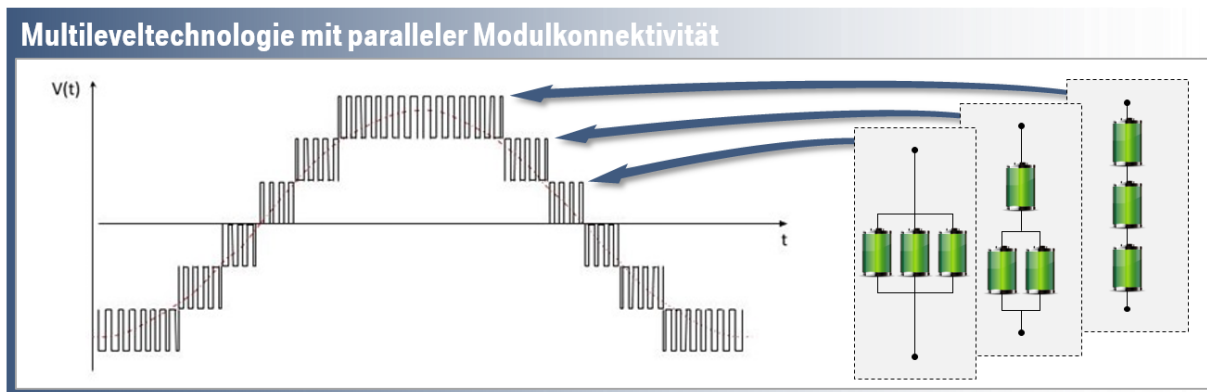


Abbildung 4-16: Exemplarischer Spannungsverlauf einer M2B mit serieller und paralleler Modulkonnektivität sowie Darstellung der zugehörigen Submodulkonfigurationen. (eigene Darstellung)

Um diesen zu beschreiben, ist das Batteriespeichersystem in seine Submodule zu unterteilen. Spannung und Innenwiderstand aller n Module werden als identisch angenommen, weshalb

$$U_{Modul} = \frac{U_{Batt}}{n} \quad \text{und} \quad R_{Modul} = \frac{R_{Batt}}{n} \quad (12)$$

gelten. Für den Fall, dass

$$U_{Batt} \geq U_{Last} \geq \frac{U_{Batt}}{2} \quad (13)$$

ist, sind die im Folgenden erläuterten Zusammenhänge zu beschreiben.

Möchte man eine Ausgangsspannung von U_{Last} an den Batteriterminals der M2B erzeugen, so sind hierfür

$$m = \frac{U_{Last}}{U_{Modul}} \quad (14)$$

Batteriemodule in Serie zu schalten. Eine Anzahl von

$$k = n - m \quad (15)$$

Modulen bleibt daher zunächst unberücksichtigt. Sie trägt nicht zum aktuellen Betriebspunkt der M2B bei und kann daher in paralleler Konfiguration betrieben werden. Die verbleibenden

$$l = m - k \quad (16)$$

Submodule verbleiben in Serie (vgl. Abbildung 4-17 (a)).

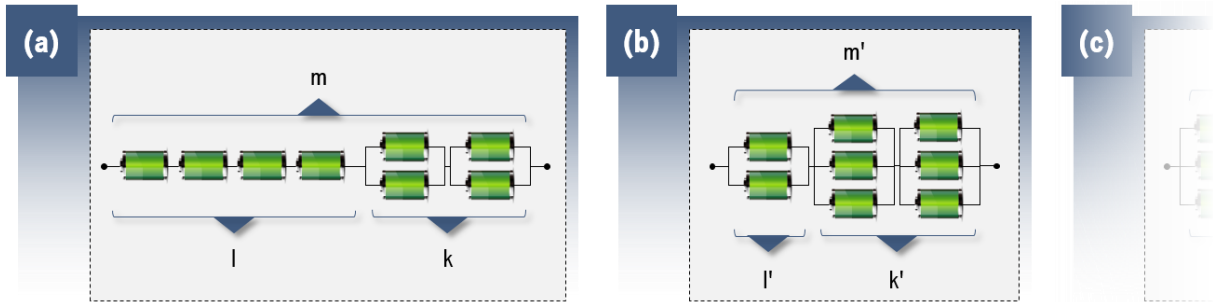


Abbildung 4-17: Je nach gewünschter Ausgangsspannung an den Terminals eines M2B-Systems sind unterschiedliche Submodulkonfiguration möglich und erforderlich. Als Grundlage für die mathematische Verlustbetrachtung werden diese für (a) $U_{Batt} \geq U_{Last} \geq U_{Batt}/2$ und (b) $U_{Batt}/2 > U_{Last} \geq U_{Batt}/3$ näher beschrieben. Hierfür wurde eine M2B mit insgesamt acht Submodulen als Beispiel herangezogen.

Für den Innenwiderstand gilt nun

$$\begin{aligned} R_i(U_{Last}) &= l \times R_{Modul} + k \times \frac{R_{Modul}}{2} = R_{Modul} \times \left(l + \frac{k}{2} \right) = \frac{R_{Batt}}{n} \times \left(m - \frac{k}{2} \right) \\ &= \frac{R_{Batt}}{2n} \times (3m - n) = \frac{R_{Batt}}{2n} \times \left(3 \frac{U_{Last}}{U_{Modul}} - n \right) = \frac{R_{Batt}}{2} \times \left(3 \frac{U_{Last}}{U_{Batt}} - 1 \right), \end{aligned} \quad (17)$$

weshalb eine Verlustleistung von

$$P_V(t) = \frac{U_{Batt}^2}{R_{Last}^2} \times \sin^2 \omega t \times \frac{R_{Batt}}{2} \times (3 \sin \omega t - 1) \quad (18)$$

resultiert. Analog müssen für

$$\frac{U_{Batt}}{2} > U_{Last} \geq \frac{U_{Batt}}{3} \quad (19)$$

insgesamt

$$m' \leq \frac{n}{2} \quad (20)$$

Submodule in Serie agieren. Hierbei ist

$$m' = \frac{U_{Last}}{U_{Modul}} = \frac{U_{Last}}{U_{Batt}} \times n. \quad (21)$$

Aus einer Betrachtung entsprechend Abbildung 4-17 (b) ergeben sich

$$k' = n - 2 \times m' \text{ und } l' = 3 \times m' + n. \quad (22)$$

Hieraus resultieren wiederum Innenwiderstand und Verlustleistung:

$$R_i(U_{Last}) = l' \times \frac{R_{Modul}}{2} + k' \times \frac{R_{Modul}}{2} = \frac{R_{Batt}}{6} \times \left(5 \times \frac{U_{Last}}{U_{Batt}} - 1\right); \quad (23)$$

$$P_V(t) = \frac{U_{Batt}^2}{R_{Last}^2} \times \sin^2 \omega t \times \frac{R_{Batt}}{6} \times (5 \sin \omega t - 1) \quad (24)$$

Durch analoges Vorgehen lassen sich die Verlustleistungen auch für weitere Ausgangsspanningsintervalle beschreiben. Dabei steigt die Anzahl der zu betrachtenden Intervalle, je mehr Submodule innerhalb eines M2B-Systems eingesetzt werden. Abbildung 4-18 zeigt ein Simulationsergebnis auf Basis der erfolgten mathematischen Betrachtungen. Ohne Redundanzen innerhalb eines M2B-Systems ($\hat{U}_{Last} = U_{Batt}$) lassen sich die Batterieverluste im Vergleich zu „Split Battery“ Systemen in etwa um zusätzliche 8,3 % reduzieren. Durch Erhöhung des Quotienten U_{Batt}/\hat{U}_{Last} lassen sich die Batterieverluste weiter absenken¹⁷.

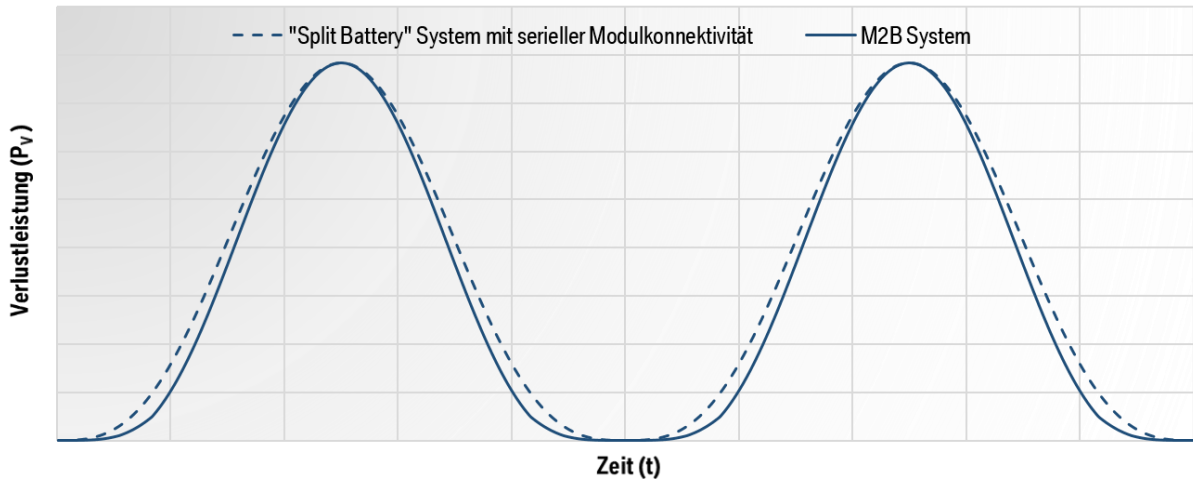


Abbildung 4-18: Simulationsergebnis einer vergleichenden Betrachtung der Batterieverluste eines „Split Battery“ Systems mit ausschließlich serieller Modulkonnektivität und einem M2B-System. Abhängig von der Anzahl der Submodule ergeben sich bei letzterem bereits für $\hat{U}_{Last} = U_{Batt}$ bis zu ca. 8,3 % geringere Batterieverluste.

¹⁷ In der vorliegenden Betrachtung wird, wie für den Ladebetrieb typisch, von einem Vollastbetrieb ausgegangen. Die Peak-Terminalspannungen entsprechen der maximalen Spannung für die das System dimensioniert ist. Der Quotient U_{Batt}/\hat{U}_{Last} kann allerdings nicht nur durch den Vorhalt redundanter Batteriemodule erhöht werden. Auch im Teillastbetrieb verändert sich dieser zugunsten geringerer Batterieverluste und wirkt sich insbesondere im motorischen Betrieb des EVs positiv auf die Effizienz des Gesamtsystems aus (vgl. Kapitel 4.4.5).

BETRIEBSSTRATEGIEN:

Zustandsabhängiger Betrieb

Im Allgemeinen sind die technischen Parameter von allen Zellen innerhalb eines neu gefertigten Batteriepacks sehr homogen. Dies macht ein dynamisches Balancen einzelner Zellen innerhalb des Packs, wie es innerhalb von M2B-Systemen möglich ist, überflüssig. Über den Speicherlebenszyklus hinweg ist ein gleichförmiger Einsatz und Betrieb aller Batteriemodule ein hinreichender Balancingmechanismus.

Nichtsdestotrotz existieren Anwendungsfälle und Systemzustände, die flexiblere und fehlertolerantere Betriebszustände eines Batteriespeichersystems erfordern: Dazu gehören gealterte Batteriesysteme, Batteriesysteme mit inhärent diskrepanten Batteriemodulen (z.B. Second Life Batteriespeichersysteme), Systeme, die verschiedene Zelltechnologien einsetzen, oder auch Systeme, die eine erhöhte Fehlertoleranz erfordern. Hierfür können – neben dem SOC der Batteriemodule – auch die Zellspannung, der Innenwiderstand sowie die maximalen Lade- und Entladeströme überwacht werden. Sobald man den gegenwärtigen Systemzustand kontinuierlich zur Definition des jeweiligen Betriebszustandes heranzieht, sind neue Optimierungsstrategien umsetzbar:

- **REDUKTION DER BALANCINGSTRÖME:** Abbildung 4-19 beschreibt eine Betriebsstrategie, die auf das Vermeiden hoher Balancingströme abzielt. Immer wenn ein Batteriespeichersystem Energie abgibt, führen diejenigen Batteriemodule mit vergleichsweise höheren Terminalspannungen auch höhere Ströme. Im Gegensatz dazu – und zwar immer dann, wenn das System geladen wird – werden Batteriemodule mit geringeren Spannungen überproportional stark geladen. Diese Zusammenhänge befähigen M2B-Systeme dazu, die Terminalspannungen und SOC's von Batteriemodulen aneinander anzugleichen ohne dafür Energie von einem Modul zum nächsten transferieren zu müssen (vgl. Kapitel 4.4.3).

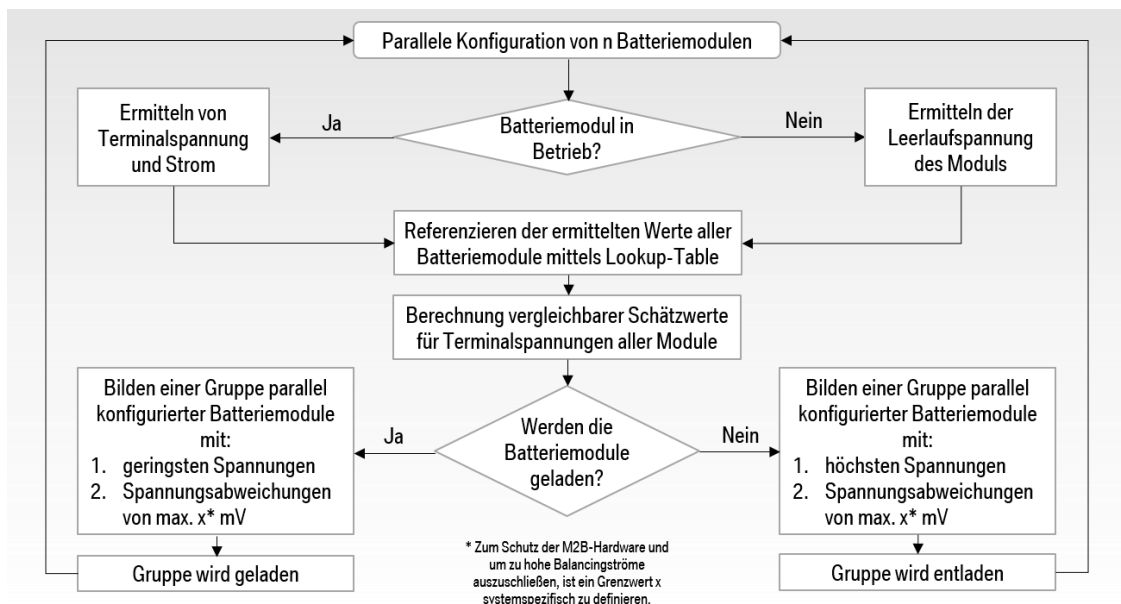


Abbildung 4-19: Ablaufdiagramm einer einfachen Betriebsstrategie mit dem Ziel hohe Balancingströme zwischen M2B-Modulen aufgrund von Spannungsabweichungen zu vermeiden (eigene Darstellung)

Solange ein Batteriesystem gut aufeinander abgestimmte Batteriemodule einsetzt, ist diese Betriebsstrategie ausreichend, um die jeweiligen SOC's der Module anzugleichen. Sobald jedoch

Batteriemodule mit heterogenen Eigenschaften verwendet werden, sind weitere Systemparameter zu berücksichtigen (Kim, Shin, Chun, & Cho, 2012). Um dieser zusätzlichen Komplexität in der Betriebsstrategie des Systems zu begegnen, können beispielsweise Korrekturwerte für die Ladezustände der Batteriemodule verwendet sowie als zusätzlicher Inputparameter im obigen Entscheidungsbaum mit aufgenommen werden (vgl. Abbildung 4-19).

- **SYMMETRISCHE STROMBELASTUNG ALLER BATTERIEMODULE:** Die Terminalspannung jedes M2B-Moduls hängt wie bereits beschrieben von verschiedenen Bedingungen ab – dazu gehören der SOC, Temperatur oder auch die Relaxation. Zusätzlich weisen aber auch ihre Innenwiderstände ähnliche Zusammenhänge auf, auch wenn die zuvor beschriebene Betriebsstrategie diese nicht berücksichtigt. Dies hat zu Folge, dass eine parallele Konfiguration von Modulen mit abweichenden Innenwiderständen nicht auszuschließen ist. Eine asymmetrische Verteilung der Batteriemodulströme ist die Folge. Sie verringert die Lebensdauer der Energiespeicher (Kim, Shin, Chun, & Cho, 2012) (Gogoana, Pinson, Bazant, & Sarma, 2014).

Um dies zu verhindern, muss die gewählte Betriebsstrategie auch die Innenwiderstände mitberücksichtigen. Dabei gibt es verschiedene Möglichkeiten, diese zu ermitteln. Entweder man nutzt die Impedanz-Spektroskopie oder man misst die Ströme durch alle M2B-Module, die parallel betrieben werden. Bei letzterer Methode ist es zunächst nicht nötig, die Absolutwerte der Ströme zu ermitteln – die Kenntnis über ihr Verhältnisses zueinander ist hier hinreichend. Das Bestimmen der Ströme parallel konfigurierter Batteriemodule geht dabei mit weiteren Vorteilen einher. Fehlerzustände wie zum Beispiel interne Kurzschlüsse oder auch das thermische Auseinanderdriften der Batteriemodule können dadurch verhindert werden (McCoy & Ofer, 2017).

Minimierung der Batteriezellenalterung

Der vorangegangene Abschnitt behandelte Optimierungsstrategien, die entweder hohe oder asymmetrische Balancingströme zu vermeiden versuchen. Vieles deutet jedoch darauf hin, dass auch weitere Charakteristika der Lade- und Entladeströme – z.B. deren Form – die zu erwartende Lebensdauer der Batteriezellen maßgeblich beeinflussen.

Die Batterieströme konventioneller Batteriespeichersysteme weisen die doppelte Frequenz ihrer Ausgangsspannungen auf (z.B. bei einphasigen Systemen). Um die Stromrippel zu reduzieren, nutzen manche Systeme Kapazitäten, die parallel zum Batteriestack wirken. Zusätzliche Induktivitäten um die Stromflankensteilheit abzumildern sind optional. Ebenso setzten manche Systeme DC/DC-Wandler mit dem Ziel ein, diese Stromrippel zu vermeiden, und gleichzeitig Abweichungen der Terminalspannungen aufgrund unterschiedlicher SOCs zu kompensieren (Serban & Marinescu, 2010). So können sogar Ladealgorithmen, die von konstanten Modulströmen ausgehen, genutzt werden. Die Meinungen darüber, welche Rippelströme welcher Frequenz sich wie auf die Batteriesystemlebensdauer auswirken, weichen stark voneinander ab. Verschiedene Betrachtungen, die sich typischerweise auf Netzanwendungen referenzieren (100/120 Hz), widersprechen sich diesbezüglich und gehen entweder von positiven (Chen, Chen, Ho, Wu, & Shieh, 2013) oder leicht negativen Effekten (Uddin, Moore, Barai, & Marco, 2016) aus. Unabhängig davon kann festgehalten werden, dass verschiedene, bereits kommerziell verfügbare Batteriespeichersysteme mit gepulsten Strömen von 100/120 Hz geladen bzw. entladen werden.

Auch bei M2B-Systemen weisen die Ladeströme der Module die doppelte Frequenz der Ausgangsströme an den M2B-Terminals auf. Nun schafft die parallele Modulkonnektivität jedoch neue Möglichkeiten, um Ausgleichsmaßnahmen zu treffen. Da die Batteriemodule kontinuierlich zu jedem Betriebszustand des Systems beitragen, wird der Ausgangsstrom zumeist von mehr als nur einem M2B-Modul getragen. Konkret kann insbesondere dann, wenn der darzustellende Ausgangsstrom den maximal möglichen deutlich unterschreitet, die Belastung der einzelnen Module signifikant verringert werden. Im Ergebnis – die coulomb'sche Effizienz korreliert mit den Lade- und Entladeströmen – kann die Effizienz der Ladezyklen gesteigert werden (Liu, et al., 2014).

Abbildung 4-20 zeigt das Simulationsergebnis der Stromlast eines einzelnen Batteriemoduls innerhalb eines netzgekoppelten einphasigen M2B-Systems, welches sich in Summe aus acht Modulen je 48 V zusammensetzt. Immer dann, wenn einzelne Module auch parallel konfiguriert werden können, ist der von ihnen geführte Strom (blaue Kurve) kleiner als der Systemstrom an den Batterieterminals (schwarze Kurve).

Ergänzend ist zu erwähnen, dass verschiedene Studien auf folgenden Zusammenhang hinweisen: Lebensdauer und nutzbare Kapazität von Lithium-Ionen-Batteriezellen lassen sich durch das Laden (Chen, Wu, Shieh, & Chen, 2013) oder Entladen (Chen, Chen, Ho, Wu, & Shieh, 2013) mit sinusförmigen oder gepulsten Strömen, deren Frequenzen so nahe wie möglich an das Impedanzminimum der Module heranreichen, maximieren. Ihr Minimum im Impedanzverlauf weisen Lithium-Ionen-Zellen in einem Bereich von 1 kHz bis 1,1 kHz auf. Jedoch ist der Kurvenverlauf im gesamten Bereich von 100 Hz bis 1,1 kHz sehr flach (Zhu, Sun, Wei, & Dai, 2015). Dementsprechend konnte der wissenschaftliche Nachweis geführt werden, dass sich Sinus- oder Puls-ladeströme im Bereich von 120 Hz positiv auf Kapazität, Effizienz und thermisches Verhalten des Systems auswirken (Chen, Chen, Ho, Wu, & Shieh, 2013) (Chen, Wu, Shieh, & Chen, 2013).

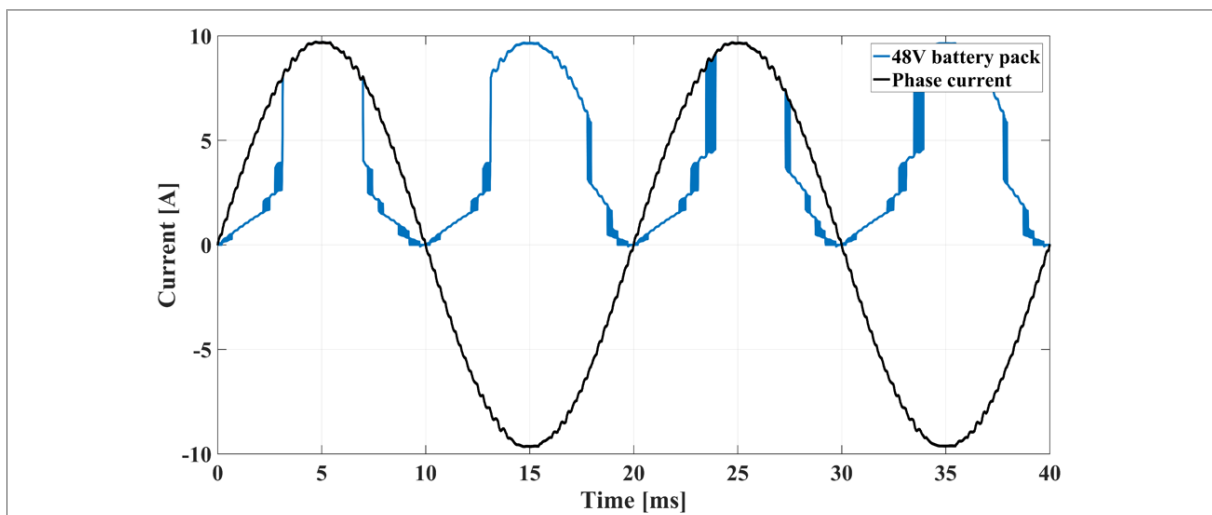


Abbildung 4-20: Simulationsergebnis des Stromrippels durch ein 48 V Batteriemodul (blaue Kurve) und dem zugehörigen Phasenstrom eines M2B-Systems (schwarze Kurve) mit insgesamt acht Modulen je 48 V (Helling, Glück, Singer, Pfisterer, & Weyh, 2019).

4.3.4 Auswirkungen auf Systemarchitektur und Fahrzeugeigenschaften

Das gesamte Batteriespeichersystem sowie alle Umrichter eines konventionellen EVs lassen sich durch ein M2B-System ersetzen. Die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Eigenschaften stellen die Grundbefähigung für ein überlegenes Balancingverfahren dar, welches auch als „Proactive Balancing“ bezeichnet wird (Helling, Glück, Singer, & Weyh, 2016). Durch Angleichen der SOC's der Batteriemodule während des Betriebs und somit simultan zur Leistungsabgabe des M2B-Systems, wird keine Energie innerhalb dedizierter Balancing-Schaltungen verschwendet: Module mit höherem SOC tragen auch in höherem Maße zum Ausgangsstrom der M2B bei. Sie werden schneller entladen, wohingegen schwächere Zellen entlastet werden (vgl. Kapitel 4.3.3). Das gesamte Balancingverfahren ist somit vollständig verlustfrei.

Insgesamt vereinfacht der Einsatz eines M2B-Systems im EV den Antriebsstrang ebenso wie das Ladesystem maßgeblich (vgl. Abbildung 4-21), da es Batteriespeichersystem und Leistungsumrichter integriert. Die M2B formt als Technologie die Basis für eine hochintegrierte Leistungselektronik, die Antriebsumrichter, Batterieladesystem und Batteriemanagementsystem in sich vereint. Dreiphasige Systeme arbeiten dabei mit verschiedensten Spannungscharakteristika und -systemen, da sowohl AC- (ein- oder dreiphasig) als auch DC-Quellen oder Lasten an ihren Terminals eingesetzt werden können. Dadurch werden alle Konvertierungsstufen herkömmlicher Systeme, wie sie in Kapitel 4.1.2 beschrieben sind, obsolet. Gleichzeitig resultiert daraus – solange die Ladesystemspannung die M2B-Phasenspannung nicht übersteigt – die Interoperabilität mit Mode 1- bis 4-Ladesystemen.

Zusätzlich geht der Einsatz von M2B-Systemen im EV mit weiteren inhärenten und gleichzeitig wettbewerbsdifferenzierenden Funktionen einher. Während sie das Ladesystem für den bidirektionalen Ladebetrieb befähigen, steigern sie ebenso das Leistungsniveau signifikant. Die realisierbare Ladeleistung entspricht stets der maximal möglichen Antriebsleistung des Systems und übersteigt somit die übliche Dimensionierung konventioneller Ladesysteme um ein Vielfaches.

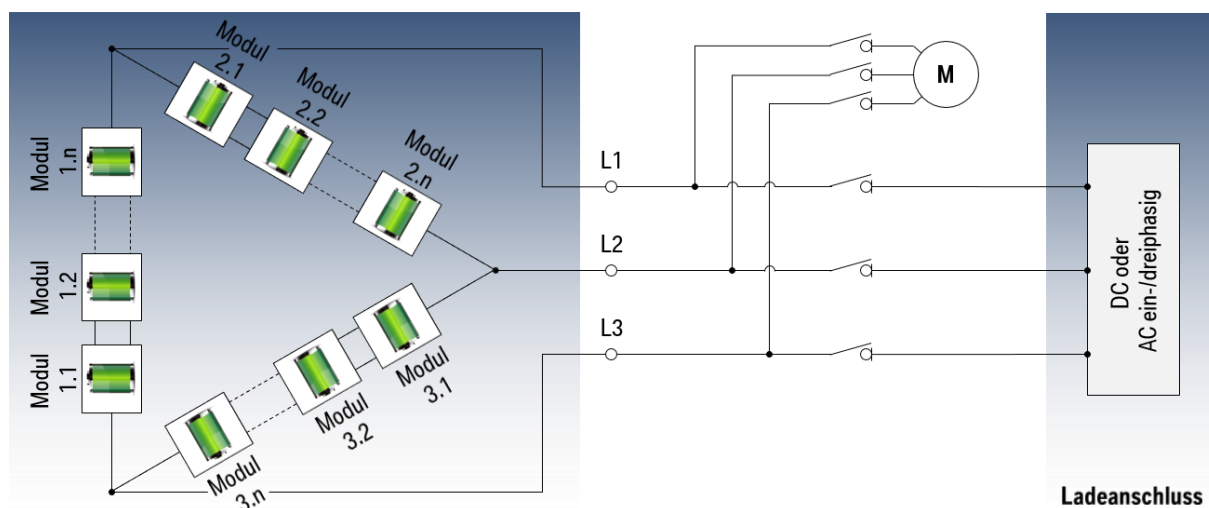


Abbildung 4-21: EV Systemarchitektur auf Basis M2B (vereinfacht; eigene Darstellung)

Die Systemspannung des Energieversorgungssystems, und somit die von Mode 2- und 3-Ladestationen, ist in der Regel im Bereich des Betriebskennfeldes der eingesetzten elektrischen Maschine. Aus diesem

Grund können die drei Phasenarme eines M2B-Systems ohne Adaption auch direkt an einem dreiphasigen Netzanschlusspunkt angebunden werden (vgl. Abbildung 4-21). Gleichzeitig stellt das System seine Interoperabilität mit einphasigen AC-Quellen sowie mit DC-Ladesäulen sicher. Hierfür erfolgt der Netzanschluss über nur zwei der M2B-Phasenkonnektoren. Ein Phasenarm wird so parallel zu den beiden anderen Armen betrieben, die zueinander in Serie agieren (vgl. Abbildung 4-22 (a)). Je nachdem, welche M2B-Topologie das System aufweist (vgl. Kapitel 4.3.2), welche zusätzlichen Bauelemente vorgesehen sind und welche Konnektoren aus dem M2B-System herausgeführt und somit zugänglich gemacht werden, sind zahlreiche weitere Konfigurationen während des Ladebetriebs denkbar (vgl. Abbildung 4-22). Die Adaptionsfähigkeit des Ladesystems an standard- sowie länderspezifische Anforderungen ist dadurch gegeben. Je Konfiguration ist eine geeignete Ladebetriebsstrategie zu wählen.

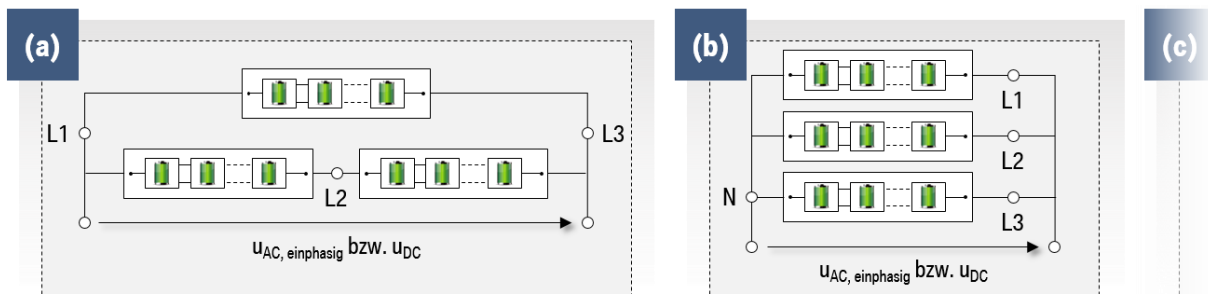


Abbildung 4-22: Durch Rekonfiguration ihrer Umrichterarme kann die Interoperabilität von M2B-Systemen mit AC- und DC-Spannungsquellen sichergestellt werden. Die Darstellung zeigt mögliche Varianten auf Basis von M2B-Systemen in (a) Delta-Konfiguration sowie (b) Sternkonfiguration. Je nach M2B-Topologie und durch den Einsatz entsprechender zusätzlicher Trennschalter und Konnektoren sind (c) weitere Konfigurationen denkbar. (eigene Darstellung)

Um auch künftige Schnellladeanwendungsfälle zu ermöglichen, die mit Spannungen oberhalb der maximal darstellbaren Phasenspannung eines M2B-Stranges arbeiten (z.B. Mode 4-Laden), können alle drei Phasenarme auch seriell konfiguriert werden. Abbildung 4-23 veranschaulicht dies. Hierdurch können Spannungen an den beiden netzgekoppelten M2B-Terminals dargestellt werden, welche die der einzelnen M2B-Arme um das bis zu Dreifache überschreiten, ohne dass dazu zusätzliche Hochsetzsteller eingesetzt werden müssen. Zum exakten Angleichen der Spannung des M2B-Speichersystems an die vorgegebene DC-Spannung der Ladestation kann wiederum – sofern erforderlich – eine zusätzliche PWM überlagert werden.

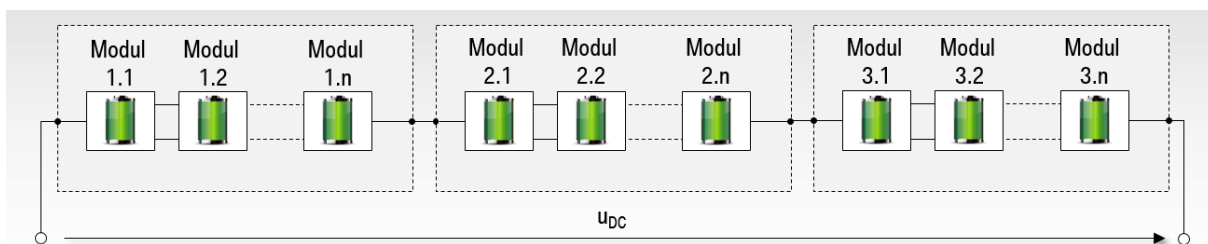


Abbildung 4-23: Rekonfiguration der M2B-Umrichterarme ermöglicht ausreichend hohe Systemspannungen für DC-Schnellladen (eigene Darstellung)

Immer dann, wenn ein EV mit dem Energieversorgungsnetz verbunden werden soll, – dies gilt sowohl für das ungesteuerte Laden des HochvoltSpeichers als auch das Bereitstellen von vernetzten Ladediensten – muss dies gemäß DIN EN 50160 erfolgen (DIN EN 50160:2011-02, 2011). Um die Überlegenheit der M2B als Technologie zu demonstrieren, wird eine Untersuchung des Oberschwingungsgehaltes (THD) mit einer exemplarisch gewählten Last von 10Ω und $0,1 \text{ mH}$ bei einer Spannung von 230 V AC

herangezogen (Helling, Glück, Singer, & Weyh, 2016). Dimensioniert man das System so, dass einzelne Batteriezellen innerhalb der M2B-Submodule eingesetzt werden, ergibt sich ein THD-Wert des Stromes an den Batteriterminals von nur 0,7 % (vgl. Abbildung 4-24 (a)). Ein für die Elektromobilität realistischeres Szenario ist eine Submodulspannung von 48 V, was einer seriellen Konfiguration von etwa zwölf Zellen entspricht. Hierfür ergibt sich bei ausschließlicher Stufenschaltung (ohne PWM) ein THD-Wert von 9,35 % (vgl. Abbildung 4-24 (b)). Das zusätzliche Überlagern einer PWM kann diesen Oberschwingungsgehalt weiter reduzieren. Die in diesem Beispiel gewählte Modulation mit einer Frequenz von 10 kHz erzielt einen Wert von nur 7,66 % (vgl. Abbildung 4-24 (c)). Vergleicht man diese Ergebnisse mit einem herkömmlichen Dreipunktumrichter, für den sich eine THD von 37,45 % ergibt, so ist die vermutete Verbesserung deutlich erkennbar (vgl. Abbildung 4-24 (d)).

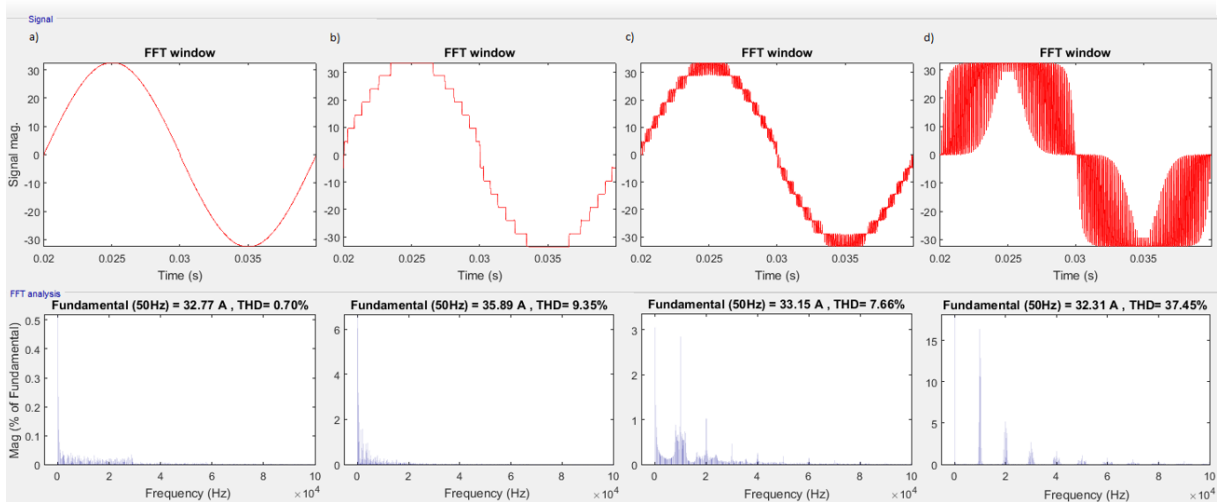


Abbildung 4-24: Simulation (Matlab/Simulink) des Oberschwingungsgehaltes des induzierten Stromverlaufes eines M2B-Umrichterarmes: Hierfür wurden Submodulspannungen von (a) 3,5 V bzw. 48 V (b) ohne und (c) mit überlagertem PWM (10 kHz) gewählt. Als Referenz dient (d) ein herkömmlicher Dreipunktumrichter mit einer Modulationsfrequenz von ebenfalls 10 kHz. Das Umrichter- bzw. Batteriesystem wird jeweils mit einer Last von 10 Ω / 100 μ H betrieben (Helling, Glück, Singer, & Weyh, 2016).

Trotz des signifikant geringeren Oberschwingungsgehaltes bei M2B-Systemen empfiehlt sich für Netzanwendungen in der Regel der Einsatz eines zusätzlichen Filters. Dieser kann zunächst aber entsprechend kleiner dimensioniert werden. Im Vergleich zu herkömmlichen Dreipunktumrichtern verringert sich die Stufenhöhe der PWM auf das Spannungsniveau der M2B-Submodule. Da Filter nicht zuletzt auch teure elektrische Bauteile sind, ist es ratsam, den Filteraufwand – soweit möglich – weiter zu reduzieren. Eine entsprechende Maßnahme zur Minimierung von Gewicht und Materialkosten kann die Nutzung der bereits vorhandenen Induktivitäten der elektrischen Maschine zur Filterung sein (Bertoluzzo, Buja, & Pedé, 2013) (Tsrinomeny & Rufer, 2015).

Insgesamt hat der Einsatz von M2B-Systemen im EV eine außerordentlich hohe Anpassungsfähigkeit des Gesamtsystems zur Folge, die bisher nur durch signifikante Komplexitäts- und Variantenmehrung zu erreichen war. Die inhärente Interoperabilität des Umrichter- und Batteriespeichersystems mit allen gängigen Lademodi, wie sie IEC 61851-1 (IEC 61851-1:2010, 2010) und IEC 61851-23 (IEC 61851-23:2014, 2014) beschreiben, ist ein wichtiges Alleinstellungsmerkmal. Dieses basiert auf zwei wesentlichen Spezifika der Technologie: Eines ist die modulare Architektur von Multilevel-Systemen. Das andere ist die Adaptionsfähigkeit ihrer Ansteuerung, da diese im Wesentlichen softwarebasiert und somit ohne Anpassung der M2B-Hardware updatefähig ist.

Ein und dieselbe Technologie findet für verschiedenste elektrische Maschinen, Leistungsklassen und Ladeinterfaces ihre Anwendung. Die maximal mögliche Systemspannung lässt sich durch den Einsatz zusätzlicher Batteriemodule vergleichsweise einfach erhöhen, während der gewünschte Spannungsverlauf an den Batterieklemmen weiterhin per Software vorgegeben werden kann. Darüber hinaus ist nun ein kombinierter Betrieb von Batteriezellen mit unterschiedlichen Eigenschaften möglich, da jede von ihnen individuell eingebunden werden kann. Auch ist es deutlich einfacher Batteriemodule einer M2B zu tauschen oder ein Upgrade des Systems durchzuführen. Nicht zuletzt stellen Submodulspannungen im Bereich der Schutzkleinspannung eine einfache Wartbarkeit des Systems sicher.

4.4 Modellierung und Simulation

Das vorangehende Kapitel (vgl. Kapitel 4.3) beschreibt M2B-Systeme als Weg, um bestehende Technologierestriktionen von EVs (vgl. Kapitel 4.2) zu überwinden. Dabei wurden zunächst der Aufbau solcher Systeme im Detail beschrieben und deren Eigenschaften diskutiert. Ergänzend soll nun simulativ der Machbarkeitsnachweis für diese Technologie erbracht werden.

Kapitel 4.4 stellt zunächst verschiedene Prämissen für die Dimensionierung eines M2B-Systems dar, das sich für die Automotive-Anwendung eignet (vgl. Kapitel 4.4.1). Darauf aufbauend wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens ein Simulationsmodell (Matlab/Simulink) erstellt, dessen Funktionsweise und Struktur beschrieben wird (vgl. Kapitel 4.4.2). Ebenso werden die dem Modell zugrundeliegenden Algorithmen und Berechnungsverfahren – insbesondere auch im Hinblick auf das Balancingverfahren – kurz dargestellt (vgl. Kapitel 4.4.3). Da im Kontext der vorliegenden Arbeit das Ladesystem des EVs im Vordergrund steht, erfolgt in der Simulation eine Untersuchung verschiedener Arbeitspunkte sowie die Bewertung auf ihre Effizienz hin (vgl. Kapitel 4.4.4). Nicht zuletzt gibt die Arbeit kurze Ausblicke auf die Realisierung des Antriebsstranges (vgl. Kapitel 4.4.5) und eine effiziente Auskopplung des Niederspannungs-Bordnetzes (12 V) (vgl. Kapitel 4.4.6).

4.4.1 Prämissen zur Systemdimensionierung

Die unternehmerische Praxis hat einen breiten Standardbaukasten etabliert, aus welchem sich die Industrie bereits heute bedienen kann. Folglich ähneln sich EVs – auch verschiedener OEMs – im Hinblick auf ihre Systemspezifikation. Um dem Industriestandard zu genügen, wird (in Abwandlung) auf ein in Serienproduktion befindliches Referenzfahrzeug als Dimensionierungsziel zurückgegriffen. Aus Geheimhaltungsgründen wird an dieser Stelle auf dessen Nennung und auf den entsprechenden Quellenverweis verzichtet.

Hochvoltpeicher werden in der Regel für Systemnennspannungen von etwa 350 - 400 V ausgelegt. Je nach Ladezustand weichen die tatsächlichen Klemmenspannungen an den Terminals des HVS entsprechend ab. Die eingesetzten Li-Ionen-Zellen haben üblicherweise Nennspannungen von 3,5 - 3,7 V. Ein Automotive-HVS besteht somit aus wenigstens 100 Batteriezellen in Serie. Kapazitäten von 120 Ah und Innenwiderstände in Höhe von 0,032 m Ω je Zelle sind heute üblich.

Die Leistungen der Hochvoltkomponenten orientieren sich üblicherweise an verschiedenen Fahr- und Betriebszyklen. Die für den Fahrbetrieb notwendigen maximalen Entladeleistungen können in der Regel

für stark begrenzte Zeiträume bereitgestellt werden – zumeist nur für wenige Sekunden. Aus vordergründig thermischen Gesichtspunkten werden Seriensysteme für vergleichsweise geringe Dauerbelastungen ausgelegt. Diese liegen im Bereich von 50 - 100 kW für den HVS.

4.4.2 Aufbau und Struktur des Simulationsmodells

Zum Aufbau des Simulationsmodells für das zu untersuchende M2B-System wurde, wie auch bei den vorangehenden Betrachtungen, Matlab/Simulink genutzt. Um den Batteriespeicher für den dreiphasigen Betrieb zu befähigen, wurde eine Dreiecksschaltung von drei M2B-Umrichterarmen gewählt. Jeder der Stränge setzt sich dabei aus insgesamt zehn Modulen zusammen, die mit 48 V-Batteriemodulen bestückt sind, und kann dadurch Ausgangsspannungen von bis zu ca. 480 V erzeugen. Zur leistungselektronischen Ansteuerung der Module wird hier auf die in Kapitel 4.3.1 beschriebene M2B-Modultopologie mit neun Schaltern zurückgegriffen (vgl. Abbildung 4-25).

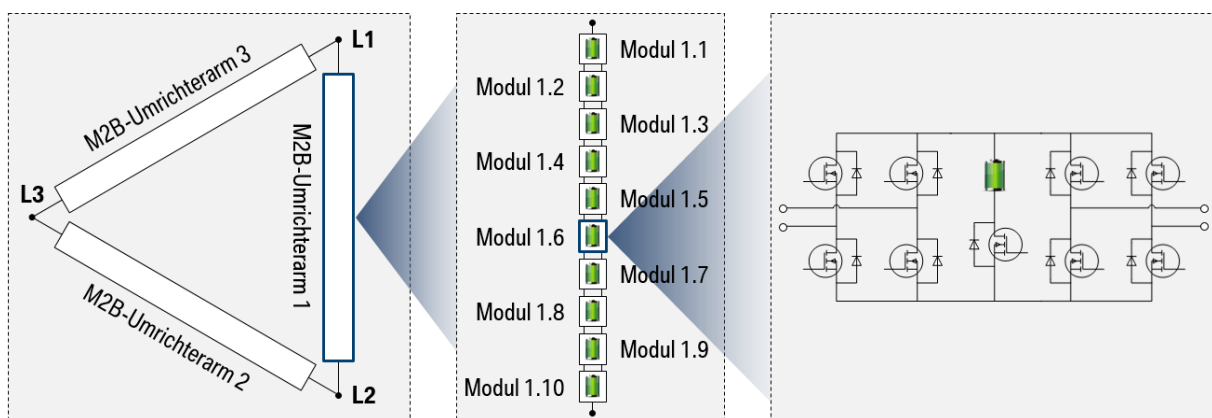


Abbildung 4-25: Aufbau des Matlab/Simulink-Simulationsmodells zur Untersuchung eines dreiphasigen M2B-Systems (eigene schematische Darstellung)

Sowohl bei der Darstellung von Spannungsniveaus in der Höhe konventioneller Batteriespeichersysteme (350 - 400 V DC) als auch bei Niederspannungsnetzanwendungen (230/400 V AC) behält sich das vorgeschlagene System ausreichende Redundanzen vor, wodurch Fehlerfälle kompensiert werden können oder der Normalbetrieb durch vermehrte Parallelisierung effizienter gestaltet wird. So entstehen gegenüber dem Industriebaukasten keinerlei dimensionierungsbedingte Restriktionen.

Kernfunktionalität des Simulationsmodells ist das Nachbilden einer extern vorgegebenden Sollspannung je Umrichterstrang. Durch entsprechende Konfiguration aller Batteriemodule werden die so definierten Spannungsniveaus an den Batterieterminals dargestellt. Über eine entsprechende Regelschleife können in Abhängigkeit des Untersuchungsgegenstandes verschiedene Betriebspunkte eingestellt werden. Die Steuerungslogik¹⁸ der drei Umrichterarme lässt sich wie folgt beschreiben:

1. Zunächst werden das M2B-System und jeder seiner Umrichterarme in einen definierten Ausgangszustand gebracht. Alle Batteriemodule werden in den Schaltzustand ‚Bypass mit aktiver Nullspannungsverbindung‘ versetzt. Die Klemmenspannungen ergeben sich dadurch initial zu 0 V.
2. Sowohl die Amplitude als auch die Polarität der Sollspannung sind zu bestimmen.

¹⁸ Als ‚Sample Time‘ zur Berechnung des Simulationsmodells in Matlab/Simulink wurden 10^{-5} s gewählt.

3. Immer dann, wenn die Sollspannung die Istspannung um mehr als das 0,5-fache der Stufenhöhe des M2B-Systems (Modulspannung) über- oder unterschreitet, wird ein neuer Status für den zugehörigen Umrichterarm ermittelt. Kapitel 4.4.3 beschreibt das zugehörige Berechnungsverfahren.
4. Weicht der Sollstatus vom Iststatus eines Umrichterarms ab, werden die Schaltsignale der eingesetzten MOSFETs neu gesetzt.
5. Gleichzeitig wird der Abgleich von Soll- und Istspannung zur Ermittlung des Pulsweitenmodulationsbedarfes herangezogen. In Abhängigkeit des Vorzeichens dieser Differenz wird zwischen aktuellem und nächst höherem Status bzw. nächst niedrigerem Status alterniert. Als Referenz dient ein Sägezahnverlauf mit einer Taktfrequenz von 25 kHz.

4.4.3 Modulbalancing

Jedem Umrichterstrang wird stets eine Sollspannung vorgegeben, der er entsprechen muss. Wie die zugehörige interne Konfiguration (Status) jedes M2B-Armes bestimmt wird, beschreibt der folgende Abschnitt. Das gewählte Balancingverfahren ist dabei durch die Steuerungsalgorithmen kondensatorbasierter Multilevel-Systeme mit paralleler Modulkonnektivität inspiriert (Götz, Peterchev, & Weyh, 2015).

Kernaufgabe des vorgestellten Schemas ist es, die SOC's aller Batteriemodule innerhalb des M2B-Systems stets aneinander anzugleichen. Alleine das Parallelisieren dieser ist in der Lage, die Ladezustände der Module zu balancieren, ohne dass hierfür ein Laststrom ausgebildet werden muss, der wiederum das gesamte Umrichtersystem belastet. Es wird von folgendem Zusammenhang Gebrauch gemacht: Einheiten parallel konfigurierter Batteriemodule besitzen eine effektiv höhere Kapazität als Einzelmodule. Die Batteriemodule in den Parallelblöcken entladen sich entsprechend langsamer. Ihre Lade- und Entladeraten sind daher von der dynamischen Modulkonfiguration innerhalb eines Umrichterarmes abhängig.

Grundsätzlich ist es vor jedem Ermitteln neuer Schaltzustände – also auch über die Systemlaufzeit hinweg – notwendig, den SOC und die Spannung jedes Batteriemoduls zu kennen¹⁹. Sie fließen als Parameter in die Betriebsstrategie mit ein. Ebenso müssen die aktuell gültigen Schaltzustände aller Submodule bekannt sein.

Nun ist zwischen zwei verschiedenen Fällen zu unterscheiden: Im Vergleich zum aktuellen Status eines Umrichterstranges kann die Ausgangsspannung entweder um eine Stufe verringert oder um eine Stufe erhöht werden.

Reduktion der Ausgangsspannung um eine Stufe

Wird das M2B-System geladen, so fließt Energie in Richtung der Batteriemodule – aus Sicht der Energiequelle ist das Produkt aus Spannung und Strom hier negativ. Es sollen nun immer die Module stärker geladen werden, die den vergleichsweise niedrigsten SOC aufweisen. Hierfür wird zunächst unter allen Modulen eines Stranges dasjenige Modul ermittelt, welches sich (unabhängig von der Polarität) im Status ‚serielle Konnektivität‘ befindet und den höchsten Ladezustand aufweist. Dieser kann in Annäherung

¹⁹ Im Simulationsmodell werden die Nennspannungen aller Batteriemodule zu je 48 V definiert. Ihr SOC wird in einer Höhe von 70 % initialisiert. Da in den folgenden Untersuchungen immer nur wenige Sinusperioden betrachtet werden, ist nicht von einem Auseinanderdriften der SOC's auszugehen. Dessen Einfluss ist daher im Rahmen der durchgeführten Simulation zweitrangig. Dennoch wurden Sie in den Berechnungsverfahren mitberücksichtigt, da sie insbesondere für reale Systeme essenziell sind.

z.B. durch Messung der Modulspannung bestimmt werden. Dieses Modul wird nun parallel zu demjenigen Nachbarn geschaltet, dessen Spannung am wenigsten abweicht. Gibt es kein Modul, das nicht bereits in einem Parallelblock agiert, ist innerhalb dieser Blöcke zu bestimmen welches Modul den höchsten SOC aufweist bzw. welcher der Blöcke die höhere Spannung hat. Auch hier wird nun genau dieser Block mit dem benachbarten Block parallelisiert, dessen Spannung ihm am meisten ähnelt. Für den Fall, dass es keine geeigneten Kandidaten für einen gemeinsamen parallelen Betrieb des Moduls oder Modulblocks gibt, werden diese gebypassst. Wird das M2B-System nun entladen, lassen sich die genannten Regeln analog anwenden. Es ist lediglich anstatt des Moduls oder Modulblocks mit dem höchsten SOC stets der Kandidat mit dem niedrigsten SOC zu ermitteln und bevorzugt parallel zu betreiben.

Erhöhen der Ausgangsspannung um eine Stufe

Im einfachsten Fall sind im Ausgangszustand alle Module eines Strangs gebypassst und seine Terminalspannung gleich Null. Um die Spannung hier um eine Stufe zu erhöhen, reicht es aus, alle Module des Umrichterstrangs zu parallelisieren. Ist dies nicht der Fall, so ist eine differenziertere Betrachtung erforderlich. Gehen wir auch hier zunächst von einem ladenden M2B-System aus, so ist zunächst das Modul unter allen Gebypasssten oder Passiven zu bestimmen, das den niedrigsten SOC hat. Dieses kann dann direkt in Serie konfiguriert werden. Befindet es sich aber in einem Parallelblock, so ist dieser möglichst in der Mitte aufzuteilen. Die resultierenden Fragmente werden wiederum in Serie geschaltet. Genau wie zuvor gilt für das Entladen des Systems dasselbe Vorgehen mit entsprechend entgegengesetzter Logik bei der Bestimmung der SOCs.

Theoretisch ist es auch möglich, dass sich die Sollausgangsspannung zwischen zwei Berechnungen weder erhöht noch reduziert. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass diese Phasen vernachlässigbar kurz sind – insbesondere bei Wechselstromanwendungen. Dabei werden für diesen Fall die Schaltzustände des vorangehenden Berechnungszyklus der Einfachheit halber beibehalten. Ein Auseinanderdriften der SOCs ist nicht zu befürchten.

Das beschriebene Berechnungsverfahren ist zu Beginn jedes Schaltzyklus durchzuführen. Sollte die erforderliche Sollausgangsspannung um mehr als ein Inkrement von der aktuellen Ausgangsspannung abweichen, ist es nötig, sich durch mehrfache Berechnung iterativ an diese anzunähern. In beiden Fällen werden nach erfolgreicher Bestimmung der optimalen Strangkonfiguration die resultierenden Schaltzustände aller MOSFETs gesetzt.

Ergänzend sei angemerkt, dass verschiedene Abwandlungen des vorgestellten Berechnungsverfahrens denkbar und möglich sind. Im Kern ist es das Ziel des obigen Algorithmus, den Zusammenhang auszunutzen, dass die geringeren Lade- und Entladeraten von Batteriemodulen in parallel konfigurierten Blöcken inhärent das Entstehen eines Ungleichgewichts der SOCs vermeiden. Eben deshalb versucht das Regelwerk zu jedem Zeitpunkt ein Bypassen von Modulen zu vermeiden und sie möglichst lange in parallel konfiguriertem Status zu belassen. Ebenso wird bevorzugt versucht, einzelne Module mit serieller Konnektivität in parallele Blöcke einzubringen. Erst nachgelagert findet eine entsprechende Abfrage für bestehende Blöcke statt.

Ein Beispiel für ein Optimierungsziel, das andere Balancingstrategien erfordert, ist das Vermeiden von Ausgleichsströmen (Tu, Xu, & Xu, 2011), welche sich in dreiphasigen Systemen auch zwischen den

Umrichterarmen ausbilden können. Derartige Effekte sind im Rahmen der Simulation nicht zu berücksichtigen, da weiterhin von symmetrischen Lasten sowie identischen Batteriemodulparametern ausgegangen wird.

4.4.4 Ladesystem

Das bisher dargestellte Simulationsmodell ist in der Lage, drei Phasen eines M2B-Systems darzustellen und jeden Phasenarm auf einen entsprechenden Arbeitspunkt einzuregeln. Abbildung 4-26 zeigt exemplarisch die Spannungsverläufe an den Terminals eines dreiphasigen Batteriespeichersystems für Netzanwendungen mit einer vorgegebenen Sollspannung von 230 V AC und einer Frequenz von 50 Hz. Der Phasenversatz ist zu je 120° definiert.

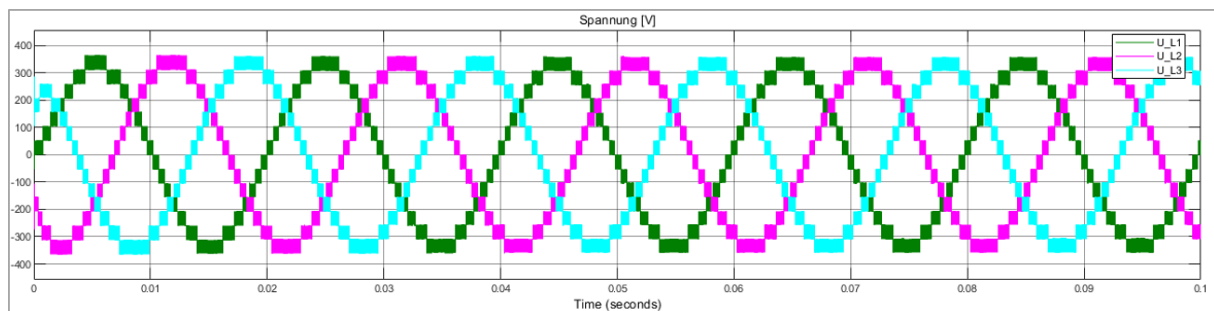


Abbildung 4-26: Simulation der Spannungsverläufe eines dreiphasigen M2B-Systems mit einer vorgegebenen Sollspannung von 230 V AC (50 Hz) je Umrichterarm (eigene Darstellung)

Aufgrund der weiterhin symmetrischen Anordnung des Simulationsmodells und zur einfacheren Darstellung sollen nun drei Arbeitspunkte von nur einer Phase des Ladesystems beschrieben werden. Die Abbildungen 4-27 ($P_{\text{Speicher}} = 1,0 \text{ kW}$), 4-28 ($P_{\text{Speicher}} = 3,9 \text{ kW}$) und 4-29 ($P_{\text{Speicher}} = 6,1 \text{ kW}$) zeigen diese. Skaliert man die Simulationsergebnisse zu einem dreiphasigen System, so ergeben sich insgesamt drei Arbeitspunkte von 3,0 kW bis 18,3 kW. Die Leistungsregelung erfolgte durch Vorgabe einer Sollspannung je Phasenarm jeweils über einen P-Regler, der entsprechend parametrisiert wurde. Das resultierende Einschwingverhalten ist jeweils zu Beginn der dargestellten Spannungs- und Leistungsverläufe erkennbar.

Gleichzeitig erfolgte eine dynamische Berechnung der auftretenden Verlustleistungen des M2B-Systems, die aus vorzugebenden MOSFET-Daten, der Ausgangsleistung, den Schaltzuständen der Leistungsschalter sowie der Schaltfrequenz abgeleitet werden konnten²⁰. Dabei wurden verschiedene Verlustleistungsarten berücksichtigt:

- **SCHALTVERLUSTE:** Für die mathematische Beschreibung der Schaltverluste wird vereinfachend angenommen, dass sich der Widerstand des MOSFETs sowohl während des Einschaltens auch während des Ausschaltvorganges linear ändert. Darüber hinaus werden Durchlassverluste zunächst nicht berücksichtigt. Die Schaltverluste ergeben sich in Näherung für induktive Lasten somit zu:

²⁰ Die an den MOSFETs anliegenden Drain-Source-Spannungen (U_{ds}) sowie Drain-Source-Ströme (I_{ds}) werden für die Berechnung der Schaltverlustleistung (P_s) zur Laufzeit bestimmt. Zur Vereinfachung werden Ein- und Ausschaltverluste nicht separat voneinander berechnet – es wird eine kumulierte Ein-/Ausschaltzeit (Δt) von insgesamt 100 ns angenommen. Ebenso ist von einer nicht gleichbleibenden Schaltfrequenz (f_s) der MOSFETs auszugehen. Die Schaltverluste werden daher nur immer dann berechnet, wenn tatsächlich ein Schaltvorgang erfolgt und sich die Steuersignale eines M2B-Moduls ändern.

$$P_S = \frac{U_{ds} \times I_{ds}}{2} \times \Delta t \times f_s \quad (25)$$

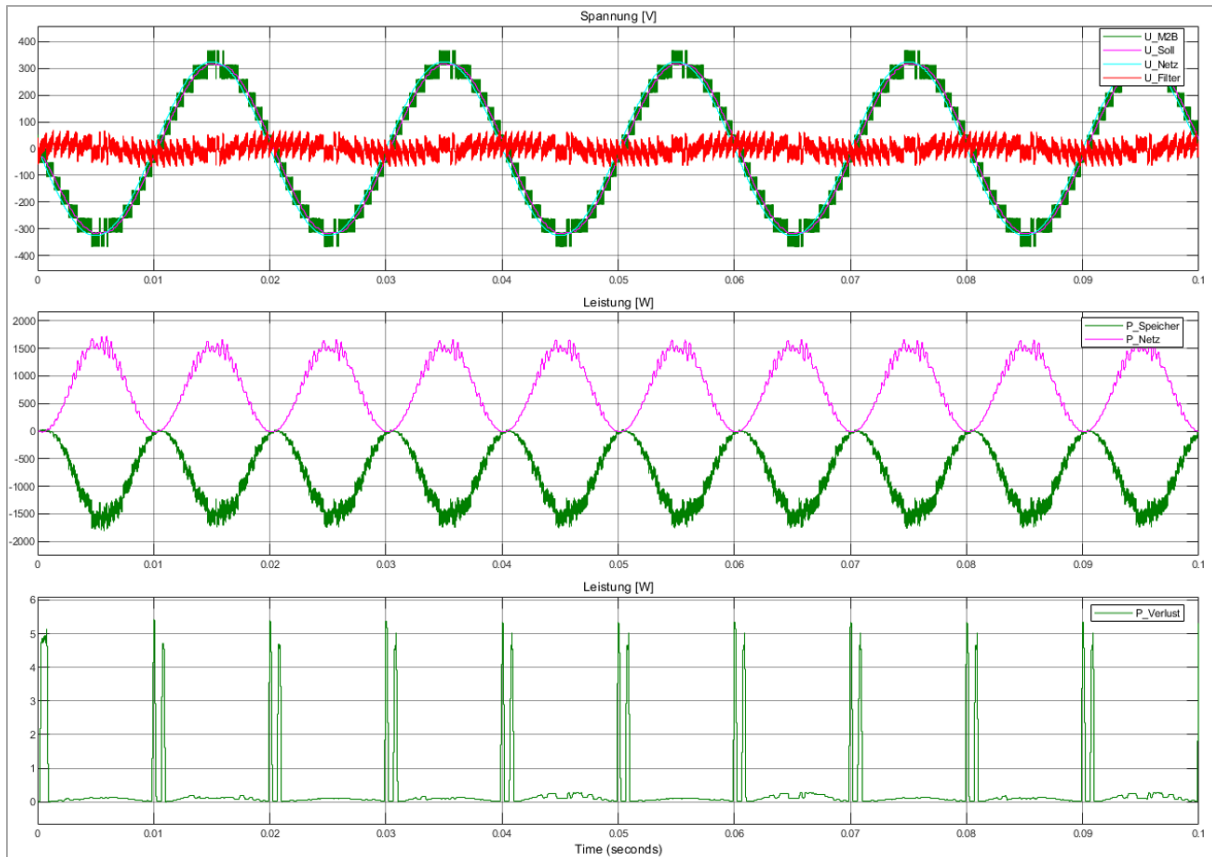


Abbildung 4-27: Simulation der Spannungs- und Leistungsverläufe eines einphasigen M2B-Systems mit einer Ladeleistung von 1,0 kW (RMS). Die Darstellung zeigt die Spannungen an den Terminals des M2B-Phasenarmes, seine durch eine P-Regelung vorgegebene Sollspannung, die zugehörige Netzspannung sowie den Spannungsverlauf am Netzfilter (oben). Ebenso werden die Leistungsverläufe von Speichersystem und Netz (mitte) sowie die Verlustleistungsanteile (unten) visualisiert. (eigene Darstellung)

- **DURCHLASSVERLUSTE:** Die Leitungsverluste der MOSFETs wurden je nach Betriebszustand differenziert betrachtet. Für überbrückte Module wurden die vier im ‚passiven Zustand‘ bzw. ‚Bypass mit aktiver Nullspannungsverbindung‘ durchgeschalteten MOSFETs mit ihrer jeweiligen Stromlast berücksichtigt. Für aktiv betriebene M2B-Module werden neben den Durchlassverlusten der MOSFETs auch die durch die Innenwiderstände der Li-Ionen-Speichermodule induzierten Verluste in Abhängigkeit der Strombelastung mitberechnet. Dabei ergaben sich die Durchlassverluste (P_{on}) jeweils zu²¹:

$$P_{on} = R_{on} \times I^2 \quad (26)$$

- **VERLUSTE DURCH PARASITÄRE KAPAZITÄTEN:** Zusätzlich wurden bei der Berechnung der Verlustleistungen auch das Umladen der parasitären Streukapazität²² zwischen Drain und Source des MOSFETs mitberücksichtigt. Sie ergeben sich aus folgender Gleichung:

$$P_{par} = \frac{1}{2} \times C_{ds} \times f_s \quad (27)$$

²¹ Für den Durchlasswiderstand der MOSFETs wurde ein Wert von 3 mΩ angenommen. Der Innenwiderstand der in der Simulation verwendeten Li-Ionen-Batteriemodule wurde wie bereits beschrieben mit 32 mΩ definiert.

²² Im Simulationsmodell werden die Streukapazitäten C_{ds} in Höhe von 1,5 nF berücksichtigt.

Für jeden der ausgewerteten Betriebspunkte ist deutlich erkennbar, wie die Klemmenspannungen an den Phasenarmen des M2B-Systems stufenförmig der vorgegebenen Sollspannung folgen. Insbesondere aufgrund von Netzinduktivitäten (im Modell 5 mH) ergibt sich gleichzeitig ein geringer Phasenversatz zur Netzspannung. Aus den Vorzeichen der Leistungsverläufe ist ersichtlich, dass ein Energiefluss in Richtung des Batteriespeichersystems stattfindet. Aufgrund des eingesetzten Filters (s.u.) ist dabei der Leistungsverlauf des Netzbezuges deutlich glatter als der des M2B-Stranges.

Nicht weniger ergibt sich aus den hier extrahierten Simulationsergebnissen, dass es zu nur sehr geringen Verlusten innerhalb des M2B-Systems kommt. Oben hergeleitete Verlustarten kumulieren sich für jeden der Betriebspunkte auf durchschnittlich unter 5 W. Das System erweist sich mit der gewählten Parametrisierung als äußerst effizient.

Ergänzend ist anzumerken, dass auch das hier modellierte M2B-System das Versorgungsnetz mit nur sehr geringen Oberschwingungsströmen belastet. Dennoch wurde für eine mögliche weitere Verbesserung der Netzqualität bzw. um diese bei Bedarf auf das zulässige Maß zu steigern, ein passiver Netzfilter vorgesehen. Das Modell verwendet einen LCL-Filter in T-Schaltung (Tiefpass). Die Abbildungen 4-27, 4-28 und 4-29 stellen jeweils die an ihm auftretenden Spannungen dar.

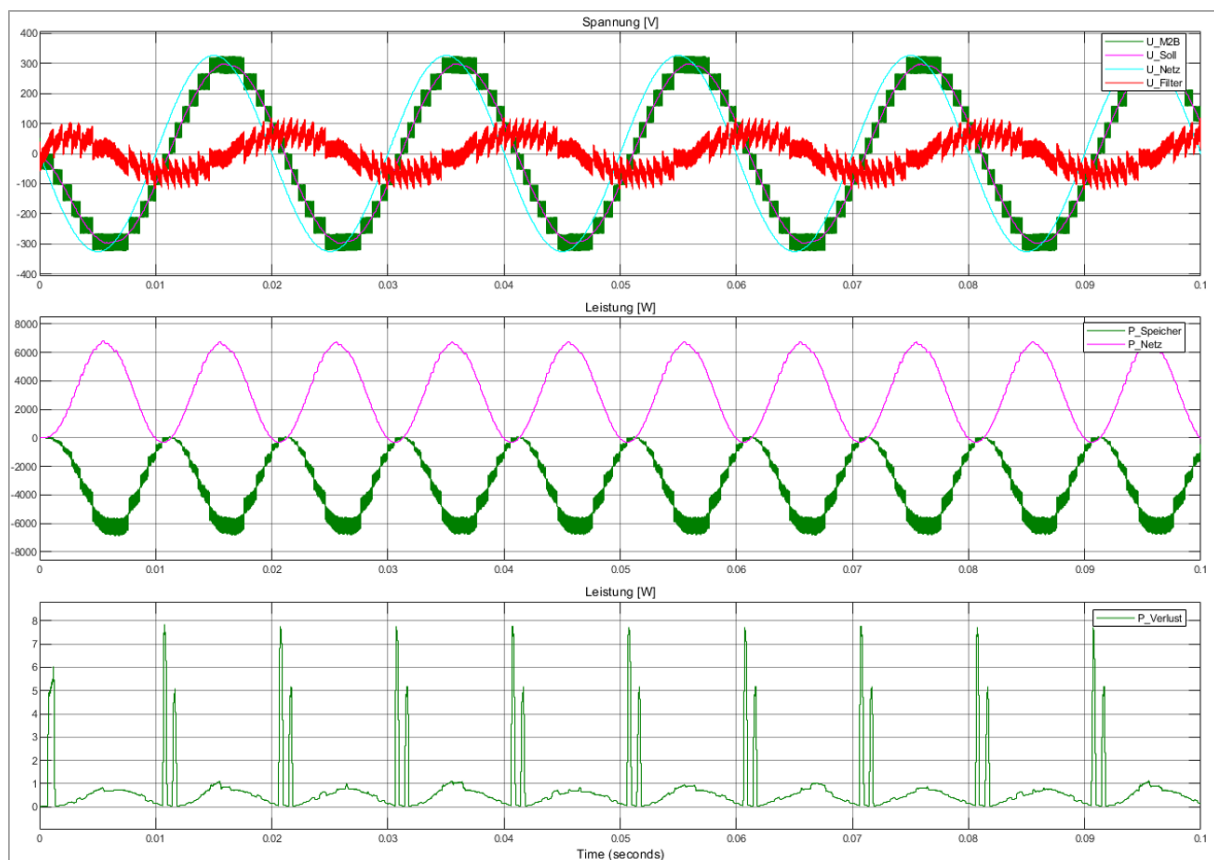


Abbildung 4-28: Simulation der Spannungs- und Leistungsverläufe eines einphasigen M2B-Systems mit einer Ladeleistung von 3,9 kW (RMS). Die Darstellung zeigt die Spannungen an den Terminals des M2B-Phasenarmes, seine durch eine P-Regelung vorgegebene Sollspannung, die zugehörige Netzspannung sowie den Spannungsverlauf am Netzfilter (oben). Ebenso werden die Leistungsverläufe von Speichersystem und Netz (mitte) sowie die Verlustleistungsanteile (unten) visualisiert. (eigene Darstellung)

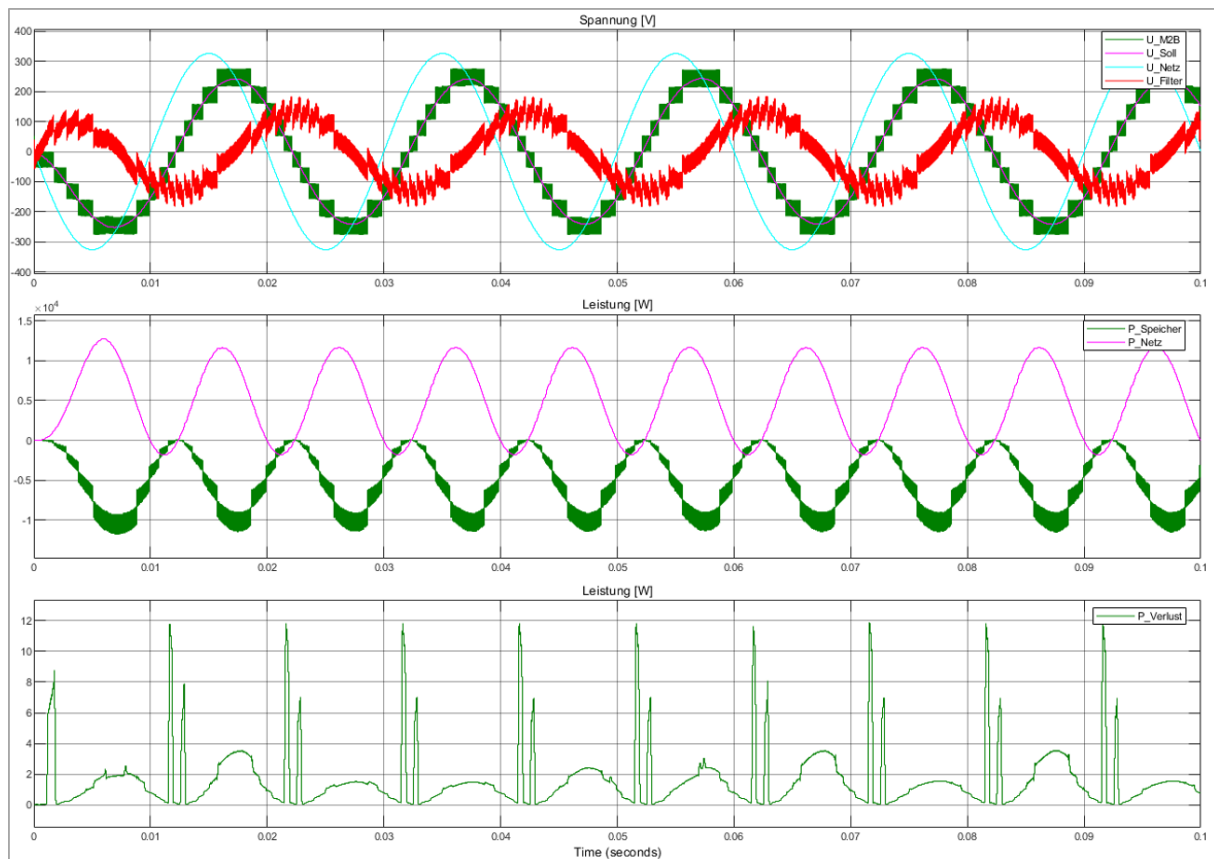


Abbildung 4-29: Simulation der Spannungs- und Leistungsverläufe eines einphasigen M2B-Systems mit einer Ladeleistung von 6,1 kW (RMS). Die Darstellung zeigt die Spannungen an den Terminals des M2B-Phasenarmes, seine durch eine P-Regelung vorgegebene Sollspannung, die zugehörige Netzspannung sowie den Spannungsverlauf am Netzfilter (oben). Ebenso werden die Leistungsverläufe von Speichersystem und Netz (mitte) sowie die Verlustleistungsanteile (unten) visualisiert. (eigene Darstellung)

Nun soll der Zusammenhang zwischen Effizienz und Ausgangsleistung dediziert herausgearbeitet werden. Hierfür werden die Ergebnisse einer weiteren Simulation herangezogen, welche wiederum die Batterieverluste berücksichtigt und den Vergleich zu bisherigen MMC-basierten „Split Battery“ Systemen zieht (vgl. Abbildung 4-30). Auch sie wurde mit Hilfe von Matlab/Simulink durchgeführt und betrachtet zunächst ein einphasiges M2B-System (230 V, 50 Hz), das acht 48 V Module verwendet. Im Speziellen wurde eine für den Vierquadrantenbetrieb befähigte MMC-Topologie mit der M2B-Neunschaltertopologie verglichen – jeweils mit und ohne überlagerte PWM. Da die erforderliche Peakspannung mit nur sieben der acht Module darstellbar ist, bleibt eines von ihnen redundant. Bei bisherigen „Split Battery“ Systemen bedeuten zusätzliche Module den Verlust von Effizienz. Jedes redundante Modul – sie werden üblicherweise gebypassed – verursacht im Normalbetrieb unnötige Verluste. M2B-Systeme verwandeln diesen vermeintlichen Nachteil in einen Vorteil, da eben diese Verluste durch dynamisches Parallelisieren reduziert werden können. So kann den Batteriemodulen des Systems zu einem höheren Nutzungsgrad verholfen werden. Die Folge sind niedrigere durchschnittliche Ströme durch jedes der Li-Ionen-Packs und somit auch geringere ohmsche Verluste. Dies ist insbesondere für Hochleistungsanwendungen oder Arbeitspunkte mit niedrigen Leistungsfaktoren von Vorteil.

Bereits in den vorangegangenen Kapiteln wurde hergeleitet, dass die Strombelastung der Batteriepaks für einen Großteil der Systemverluste verantwortlich ist. Der mittlere Strom durch die Batteriemodule

ist in jenen Systemen vergleichsweise kleiner, die parallele Modulkonnektivität als zusätzlichen Freiheitsgrad ermöglichen. Deshalb ist deren Effizienz im Vergleich zu anderen „Split Battery“ Systemen insbesondere für hohe Ausgangsleistungen signifikant höher (vgl. Abbildung 4-30). Bei geringeren Ausgangsleistungen werden die Effizienzgewinne durch Parallelisierung teilweise durch die Schaltverluste der zusätzlichen Halbleiterschalter von M2B-Systemen kompensiert.

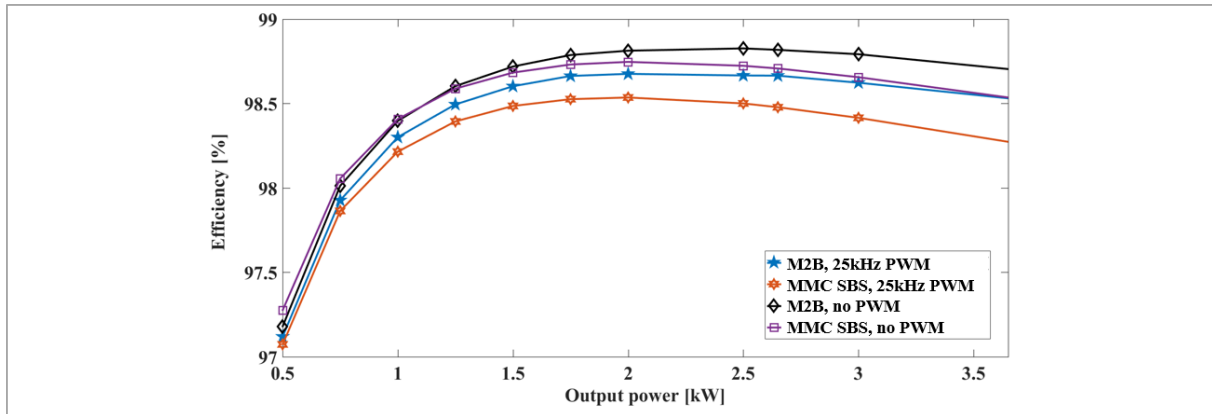


Abbildung 4-30: Gegenüberstellung der Systemeffizienz eines einphasigen, netzgekoppelten MMC-basierten „Split Battery“ Systems mit einem M2B-System. Jedes davon arbeitet mit acht Umrichter-Submodulen und setzt 48 V Li-Ionen-Batteriemodule ein. Die Batterieverluste werden mitberücksichtigt. Gleichzeitig wird der Einfluss einer überlagerten Pulsweitenmodulation quantifiziert. (Helling, Glück, Singer, Pfisterer, & Weyh, 2019)

4.4.5 Antriebsstrang

Kerneigenschaft der modularen Multilevel-Batterie ist es, dass sie nicht nur die Ladeelektronik konventioneller EVs hochintegriert. Sie macht auch eine separate Antriebselektronik obsolet (vgl. Abbildung 4-21). Der Antriebsstrang erfordert ein deutlich weiteres Spektrum an Betriebspunkten – die erforderlichen Last- und Drehzahlbereiche sind im Vergleich zum Ladesystem deutlich breiter. Daher sollen nun zunächst Grundüberlegungen für den motorischen Betrieb von M2B-Systemen dargestellt und ein Ausblick gegeben werden, inwiefern auch das Antriebssystem von der Technologie profitieren kann. Da der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit im Bereich vernetzter Ladedienste und somit auf dem Ladesystem von EVs liegt, stehen die folgenden Betrachtungen nicht im Fokus des Forschungsgegenstandes – eine weiterführende Untersuchung und wissenschaftliche Analyse ist nötig.

Die Abbildungen 4-31 und 4-32 zeigen zwei exemplarische Spannungsverläufe des simulierten dreiphasigen Systems. Einer davon mit hoher Frequenz (150 Hz) und hoher Peakspannung (450 V), der andere mit niedriger Frequenz (30 Hz) und niedrigerer Peakspannung (250 V). Das System ist problemlos in der Lage, auf diese beiden Betriebspunkte zu regeln.

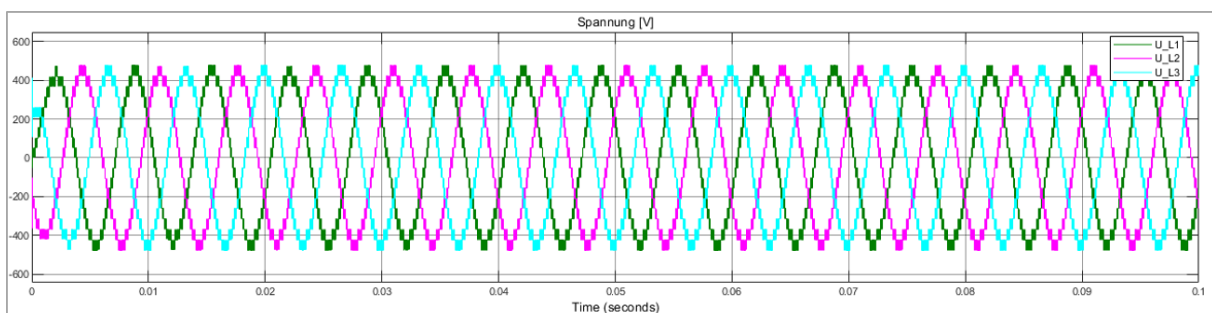


Abbildung 4-31: Simulation der Spannungsverläufe eines dreiphasigen M2B-Systems mit einer vorgegebenen Sollpeakspannung von 450 V (150 Hz) je Umrichterarm (eigene Darstellung)

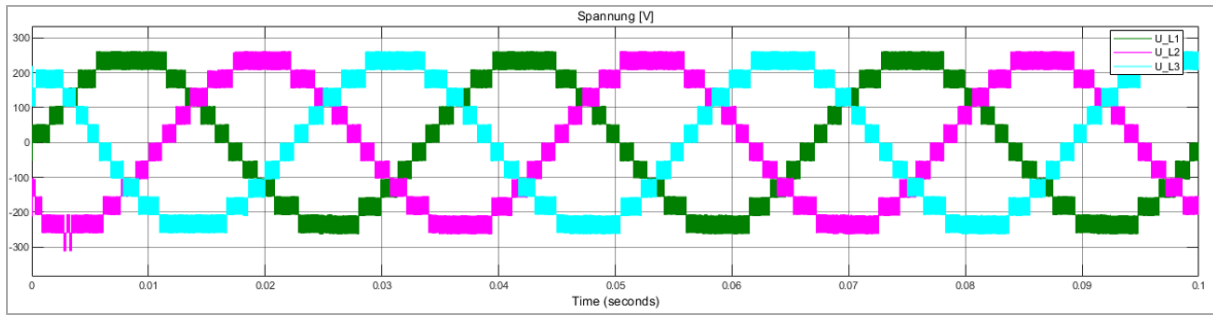


Abbildung 4-32: Simulation der Spannungsverläufe eines dreiphasigen M2B-Systems mit einer vorgegebenen Sollpeakspannung von 250 V (30 Hz) je Umrichterarm (eigene Darstellung)

Es wird deutlich, dass Situationen, in denen mehr Module als nötig zur Darstellung des geforderten Spannungsverlaufes zur Verfügung stehen, nicht nur dann auftreten, wenn beim Systemdesign für den Nennbetrieb des Systems Redundanzen vorgesehen wurden. Arbeitspunkte mit reduzierten Ausgangsspannungen (Teillastbetrieb) sind in der Antriebstechnik die Regel. Abbildung 4-33 zeigt auf Basis der in Kapitel 4.3.3 erarbeiteten Vorgehensweise, dass sich die Batterieverluste im Vergleich zu „Split-Battery“ Systemen mit ausschließlich serieller Modulkonnektivität bereits bei einem Quotienten von $\hat{U}_{Last}/U_{Batt} = 0,5$ mehr als halbieren lassen.

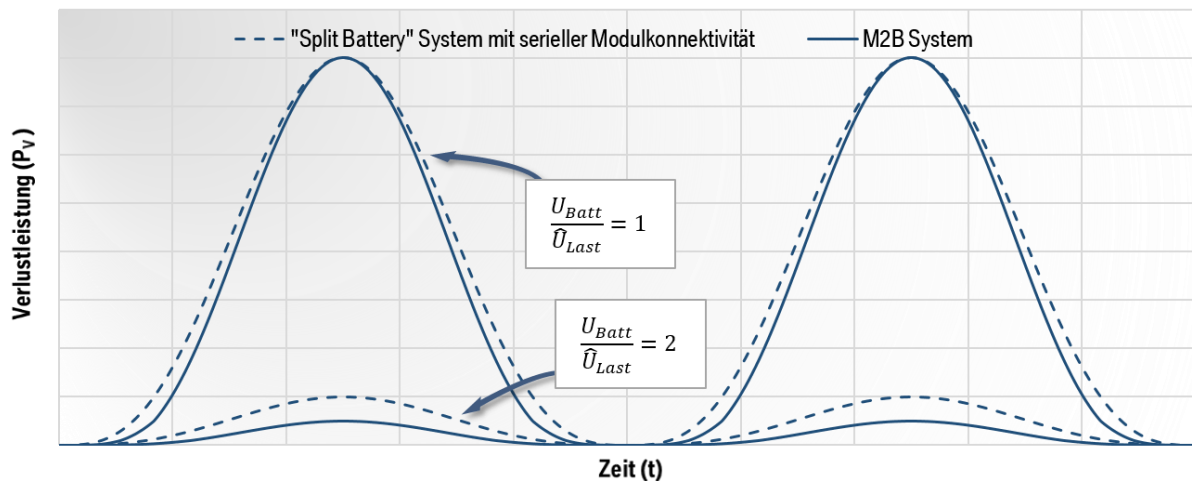


Abbildung 4-33: Ergänzendes Simulationsergebnis auf Basis der vergleichenden Betrachtung der Batterieverluste eines „Split Battery“ Systems mit ausschließlich serieller Modulkonnektivität und einem M2B System (vgl. Abbildung 4-18). Bei geringeren Ausgangsspannungen reduzieren sich die Batterieverluste von M2B Systemen überproportional. Der Effizienzgewinn beläuft sich für $\hat{U}_{Last} = U_{Batt}$ auf 8,3 % und steigt im Beispiel für $\hat{U}_{Last} = \frac{1}{2} U_{Batt}$ bereits auf über 55 % an.

Ergänzend zeigt Abbildung 4-34 eine Verlustbetrachtung bei einer im Vergleich zu Abbildung 4-30 verringerten Ausgangsspannung von 115 V und 50 Hz (beide Berechnungen beruhen auf demselben Simulationsmodell). Auch hier wurden eine PWM mit 25 kHz überlagert und die Batterieverluste mitberücksichtigt.

Weiterhin wirkt es sich vorteilhaft aus, dass bei elektrischen Maschinen als induktive Lasten die Stromspitzen phasenversetzt zum Spannungsverlauf auftreten ($\cos \varphi$). Die höchsten Ströme treten immer dann auf, wenn die Klemmenspannungen vergleichsweise niedrig sind und viele der Batteriemodule parallel konfiguriert werden können. Dies hat einen zusätzlichen positiven Effekt auf die Batterieverluste. Deren Höhe ist von der Dimensionierung des Gesamtsystems abhängig. Gleichzeitig ergeben sich maschinenseitig durch reduzierte Stromrippel auch geringere Eisen- und Kupferverluste sowie ein geglätteter

Drehmomentrippel. Dies hat nicht zuletzt eine geringere Geräuschentwicklung zur Folge. Flachere Spannungsflanken (dV/dt) wirken sich zudem positiv auf die Isolationsbeanspruchung innerhalb der Antriebsmaschine aus (D'Errico, Lidozzi, Serrao, & Solero, 2009) (Kshirsager & Krishnan, 2012).

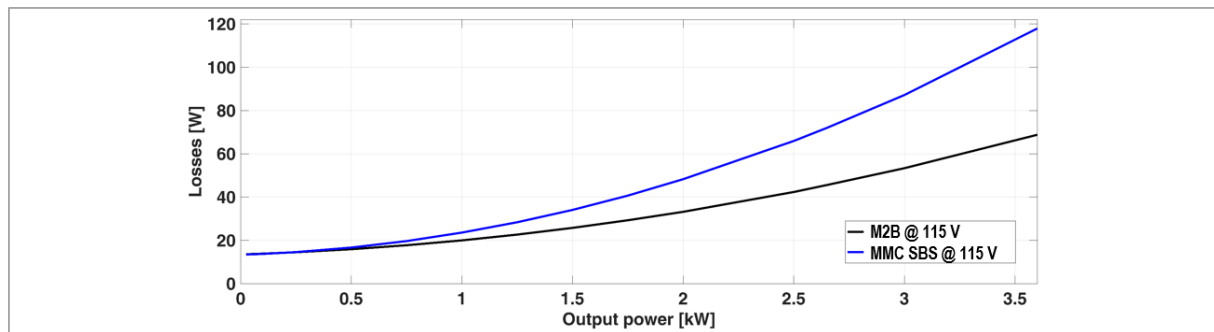


Abbildung 4-34: Vergleichende Betrachtung der Systemverluste eines einphasigen MMC-basierten "Split Battery" Systems und einer M2B; Es wurden je acht 48 V-Batteriemodule eingesetzt; Die Batterieverluste wurden mitberücksichtigt; Die Spannung an den Batterieterminals wurde mit 115 V vorgegeben (bei 50 Hz und überlagerter PWM mit einer Taktung von 25 kHz) (Helling, Glück, Singer, Pfisterer, & Weyh, 2019)

Die dargestellten Ergebnisse und getroffenen Aussagen werden bereits durch einen ersten wissenschaftlichen Beitrag gestützt. Korte, et al. (2017) vergleichen modulare Batteriespeichersysteme mit paralleler Modulkonnektivität nicht nur mit herkömmlichen „Split Battery“ Systemen. Sie ziehen auch den Vergleich zu konventionellen spannungsgeführten Zweipunktumrichtern und kommen ebenfalls zu dem Ergebnis, dass „Split Battery“ Systeme – egal ob nur seriell oder auch parallel – einen Effizienzvorteil gegenüber herkömmlichen Umrichtersystemen haben. Dies gilt insbesondere für niedrige Ausgangsleistungen. Die besondere Eignung für automobiler Anwendungen wird auch hier aufgrund der Lastverläufe bestehender Fahrzyklen festgestellt.

Insbesondere wird konstatiert, dass spannungsgeführte Zweipunktumrichter bei großem Drehmoment und hohen Geschwindigkeiten am effizientesten sind, während Multileveltopologien bei niedrigeren Lasten ihr Effizienzoptimum aufweisen. Bei ersteren gibt es keine Möglichkeit, die hohen Halbleiterverluste (Schalt- und Durchlassverluste) im Teillastbetrieb zu kompensieren. Erst bei hohen Ausgangsleistungen werden sie von den Batterieverlusten dominiert und fallen nicht länger ins Gewicht. Somit ist auch festzustellen, dass zumindest herkömmliche „Split Battery“ Systeme in Bezug auf ihre Effizienz in hohen Leistungsbereichen nicht mit Zweipunktumrichtern konkurrieren können. Die Batterieverluste sind hierfür zu hoch. Der Grund ist, dass der gesamte Motorstrom immer auch durch die Batteriezellen fließen muss, wenn diese in Serie konfiguriert sind. Bei Zweipunktumrichtern fungieren die Halbbrücken je Phase als Tiefsetzsteller, weshalb – während die Ausgangsströme fließen – die Spannung des Systems geringer als die des Batteriespeichersystems ist. Die Batterieströme sind daher ebenso wie die Verluste bei hohen Leistungen geringer. Gleichzeitig wurde aber auch nachgewiesen, dass Systeme mit zusätzlich paralleler Modulkonnektivität – also auch die M2B – diesen Nachteil aufwiegen können. Ihre Effizienz reicht auch für hohe Ausgangsleistungen an die herkömmlicher Zweipunktumrichter heran. (Korte, Specht, Hiller, & Götz, 2017)

4.4.6 DC-Zwischenkreisaukopplung zur Versorgung des Niederspannungsbordnetzes

Die bisherigen Ausführungen zur M2B lassen zunächst vollkommen außer Acht, dass weiterhin auch verschiedenste Niedervoltverbraucher im EV angebunden und mit Spannung versorgt werden müssen

(vgl. Kapitel 4.1.4). Bislang wurden nur Lade- und Antriebssystem betrachtet. Der im Folgenden beschriebene Lösungsansatz wurde nicht im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens entwickelt – da aber für ein stimmiges Gesamtfahrzeugkonzept eine geeignete Technologie für die Energieversorgung der Peripherie unabdingbar ist, wird nun zusammenfassend auf ein von Helling, et al. (2018) entwickeltes Konzept zur Auskopplung eines Niederspannungsbordnetzes aus M2B-Systemen verwiesen (vgl. Abbildung 4-35).

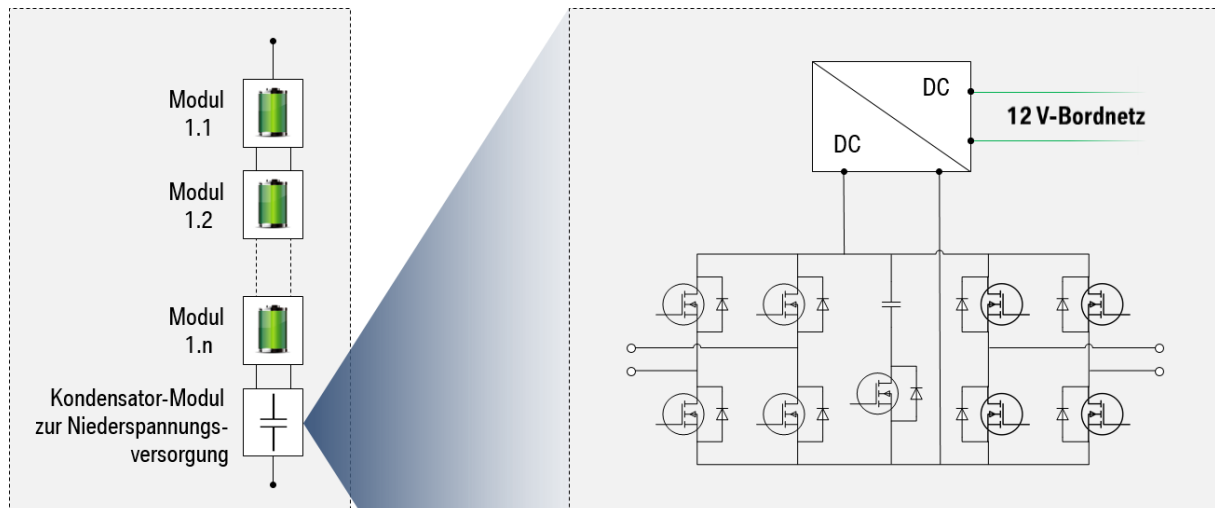


Abbildung 4-35: Schematische Darstellung der Makro- (links) und Mikrotopologie (rechts) des von Helling, et al. entwickelten Konzeptes zur effizienten Auskopplung einer Niederspannungsquelle aus M2B-Systemen im EV (eigene Darstellung in Anlehnung an Helling, Kuder, Singer, Schmid & Weyh (2018))

Bislang wurden Niederspannungsbordnetze in Elektrofahrzeugen über dedizierte DC/DC-Wandler aus einem HV-Bus (DC) versorgt. In M2B-basierten Fahrzeugtopologien ist dieser nicht länger vorhanden, weshalb eine neue Möglichkeit zu suchen ist, wie periphere Verbraucher effizient aus der Traktionsbatterie mit Energie versorgt werden können. Es gibt nur wenige SBS-Varianten, die bereits das Auskopplern eines Niedervoltsystems ermöglichen – ein restriktionsfreier Lösungsansatz existierte bislang nicht. Keiner von ihnen stellt eine Verfügbarkeit in allen Betriebszuständen (Fahren, Laden und Parken/Stillstand) sicher.

Helling, et al. (2018) beschreiben in ihren Ausführungen einen effizienten Ansatz zur Realisierung der Niederspannungsversorgung in EVs, die M2B-Systeme einsetzen. Dabei denkt die vorgeschlagene Lösung den modularen Ansatz der modularen Multilevel-Batterie konsequent weiter. Nur durch das Hinzufügen eines einzelnen kondensatorbasierten Umrichtermoduls je M2B-Strang wird die Möglichkeit geschaffen, Energie bidirektional und verlustarm zwischen der Traktionsbatterie und dem NV-Bordnetz auszutauschen. Der Energiespeicher des kondensatorbasierten Umrichtermoduls wird dabei entweder direkt oder über einen zusätzlichen DC/DC-Wandler mit dem Niederspannungsbuss verbunden. Die zu den M2B-Submodulen analoge Mikrotopologie ermöglicht auch hinsichtlich der Kapazität einen Vierquadrantenbetrieb.

Das Funktionsprinzip beruht auf einer Betriebsstrategie, die den Kondensator durch dynamische Rekonfiguration (,seriell‘, ,anti-seriell‘, ,bypass‘ oder ,parallel‘) in den Strompfad der bereits bekannten M2B-Umrichterarme miteinbindet. Die ohnehin auftretenden Ströme in den Strängen des M2B-Systems werden genutzt, um den Ladezustand bzw. die Energiezufuhr in das NV-Modul sicherzustellen. Eine

detailliertere Beschreibung des Funktionsprinzips ist der referenzierten Literatur zu entnehmen (Helling, Kuder, Singer, Schmid, & Weyh, 2018).

4.5 Ergebnisse

Kapitel 4 gibt eine detaillierte Antwort auf Forschungsfrage 3.1 und zeigt auf, wie eine mögliche M2B-basierte Makrotopologie für EVs vergleichend zu konventionellen Umrichter-Topologien zu gestalten ist. Abbildung 4-36 rekapituliert das M2B-Konzept und verweist zusammenfassend auf die ihm zugrundeliegende Idee.

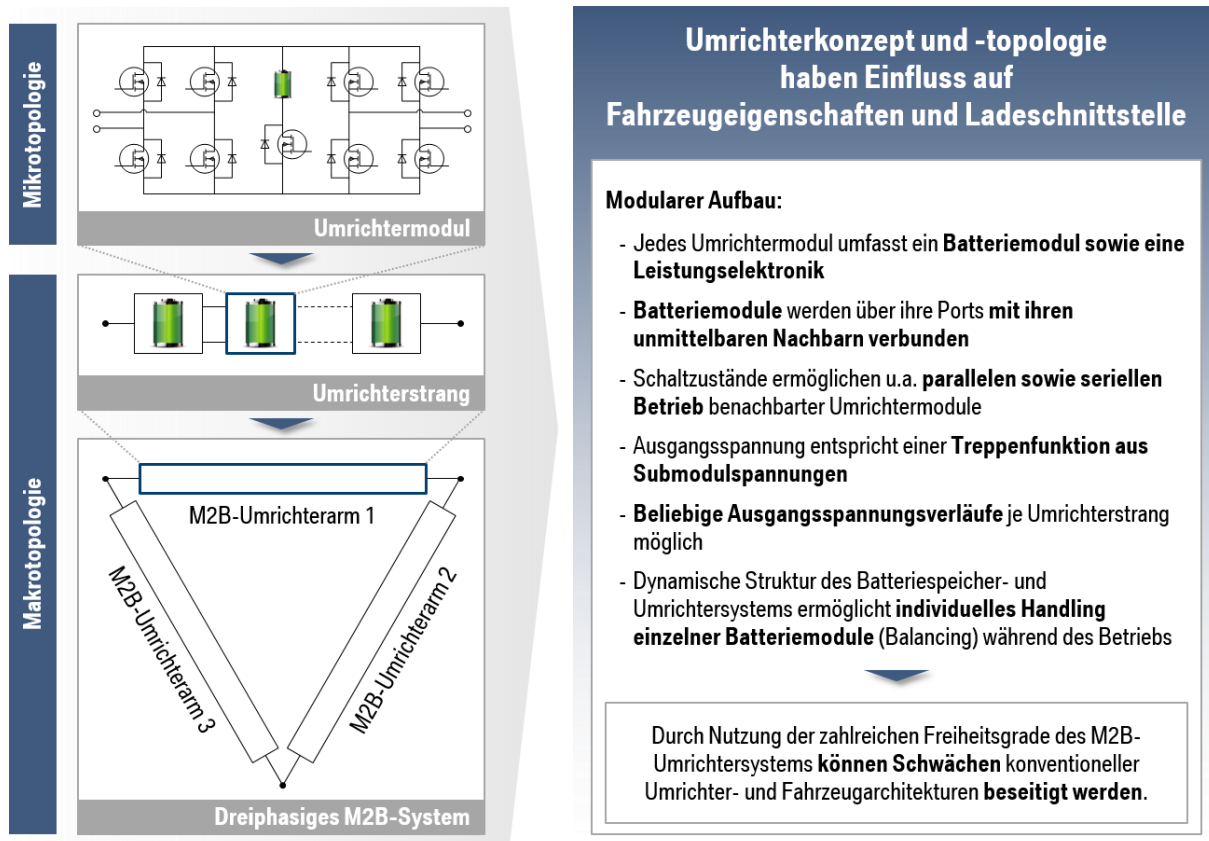


Abbildung 4-36: Zusammenfassende Darstellung des M2B-Konzepts und der aus seinem modularen Aufbau resultierenden Eigenschaften (eigene Darstellung)

Die erläuterten Freiheitsgrade können dabei auf verschiedenste Arten einen Mehrwert für das EV stiften. Beispiele hierfür sind:

- Optimierte Betriebsstrategie der einzelnen Batterieumrichtermodule; Kein Einfluss der schwächsten Zelle auf die Gesamtsystemperformance
- Kombinationsmöglichkeit verschiedener Batterietechnologien, -kapazitäten und -hersteller in einem System
- Dimensionierung der Batteriesysteme für Anwendungen mit genau der benötigten Kapazität im Sinne einer Leistungselektronik-Baukastenlösung
- Schnellademöglichkeit durch direkten Austausch der Module
- Bei Ausfällen einzelner Batteriezellen müssen jeweils nur die betroffenen Module ausgetauscht werden und nicht der gesamte Hochvoltspeicher; Betroffene Module bzw. Zellen haben keine negativen Auswirkungen auf das gesamte Batteriesystem

- Sequenzielles Upgrade auf die neuesten, am Markt verfügbaren Speichertechnologien; Einsatz von 2nd-Life-Batteriezellen möglich
- Wesentlich bessere Möglichkeiten der Überwachung einzelner Zellen/Module
- Fehlertoleranz durch Redundanz

Von besonderer Bedeutung und dem Kern des Forschungsgegenstandes entsprechend sind jedoch die zahlreichen Ladesystemimplikationen, die der Einsatz einer modularen Multilevel-Batterie im EV bedingt (vgl. Abbildung 4-37). Das Fahrzeug wird inhärent für das Laden und Entladen mit hohen Leistungen befähigt – ohne zusätzlichen Hardwareaufwand. Die Hochintegration des Umrichtersystems in den Batteriespeicher bedingt, dass sich die Spezifikation und Leistungsdimensionierung des Antriebsstranges auch unmittelbar auf das Ladesystem auswirken. Die Ladeleistung entspricht der (Dauer-)Antriebsleistung. Zudem schafft die M2B aufgrund ihres softwarebasierten Betriebs Flexibilität im Hinblick auf Spannungslevel, -frequenz und -form. Damit einher geht die Interoperabilität des Ladesystems mit allen gängigen Ladestandards (AC- (ein-/dreiphasig) sowie DC-Ladestandards unterschiedlicher Leistungs- und Spannungsklassen). Sogar eine direkte Netzkopplung ohne dediziertes EVSE ist möglich und vermeidet zusätzliche Wandlungsverluste, spart Hardware und somit Gewicht.

Laden als komplexe und verteilte Fahrzeugfunktion mit Querwirkungen und Abhängigkeiten zu fast allen Fahrzeugdomänen

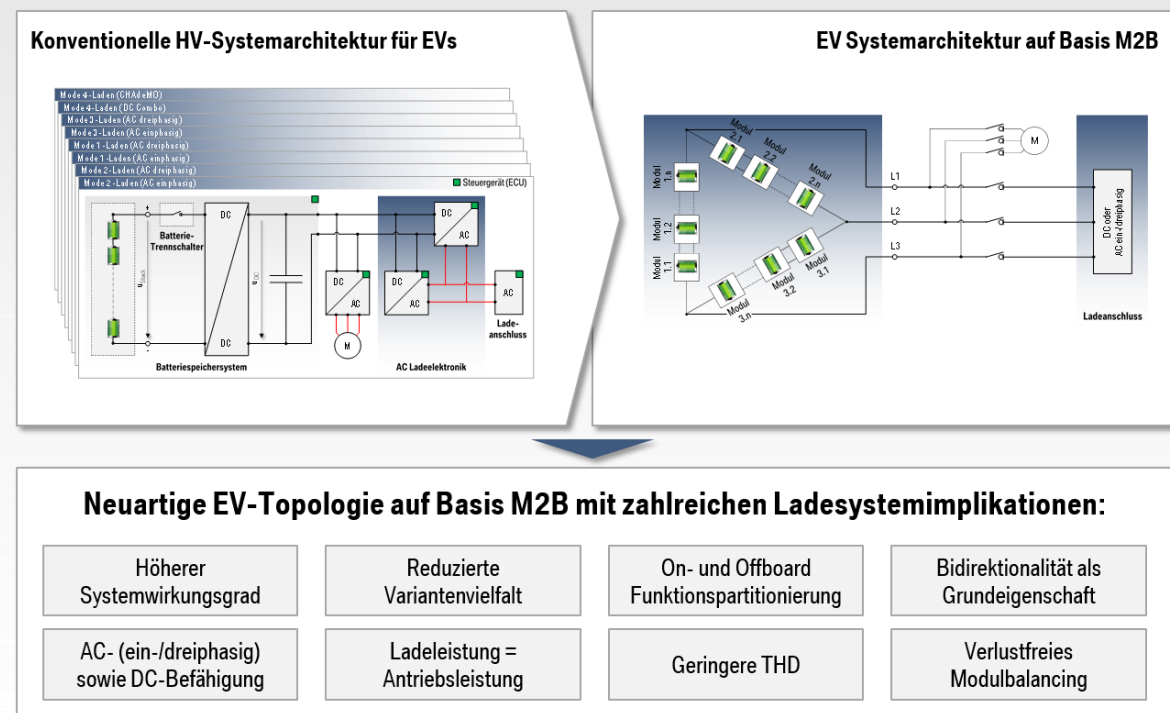


Abbildung 4-37: Ladesystemimplikationen durch den Einsatz von M2B-Systemen im EV (eigene Darstellung)

Weitere Faktoren wirken sich positiv auf das Einsatzpotenzial der M2B aus. Das vorgestellte „Proactive Balancing“ (vgl. Kapitel 4.3.4) ist die bislang einzige Methode für ein tatsächlich verlustfreies Balancing von Batteriespeichern. Ebenso wird durch geringe THD-Werte das Risiko betriebsgefährdender Netzurückwirkungen minimiert. Auch wenn das Oberschwingungsverhalten bei der Netzkopplung von EVs bislang und mittelfristig als nicht systemkritisch eingestuft wird (vgl. Kapitel 2.3.3), ist diese Eigenschaft für sämtliche Netzanwendungen von Vorteil.

Im Hinblick auf die Industrialisierung von M2B-Systemen können sich weitere Vorteile gegenüber dem Stand der Technik ergeben. Das Design und die Fertigung der Leistungselektronik erfolgen zusammen mit dem Speichermodul – Skaleneffekte durch eine integrierte Fertigung sind zu erwarten. Zudem verspricht die Technologie zukunftsfähiger zu sein, da sie unabhängig von Batterietechnologien, Ladeverfahren und Ladestandards ist. Im Hinblick auf ihre geometrische Integration in das Fahrzeug sind nun verteilte Batteriesysteme möglich und eröffnen Lösungsräume für neuartige Fahrzeugkonzepte. Weiterhin verspricht die M2B eine verbesserte Wartbarkeit. Submodule können auf Schutzkleinspannungsniveau dimensioniert werden, was Aufwände für Arbeitssicherheit und Mitarbeiterqualifikation minimiert. Schutzkonzepte werden vereinfacht, da die eingesetzten MOSFETs als Leistungsschalter eine zusätzliche Sicherungsinstanz im Fehlerfall darstellen.

Vor allem aber gilt: Die vereinfachte EV-Systemarchitektur auf Basis der M2B macht Varianten der HV-Architektur obsolet. Somit sind auch keine spezifischen Lösungen zur Optimierung des energie-wirtschaftlichen Potenzials erforderlich – vielmehr bringt jedes Fahrzeug alle Voraussetzungen bereits mit.

4.6 Diskussion

Die M2B formt als Technologie die Basis für eine hochintegrierte Leistungselektronik, die Antriebsumrichter, Batterieladesystem und Batteriemanagementsystem in sich vereint. Sie vereinfacht den Antriebsstrang ebenso wie das Ladesystem maßgeblich. Die im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit durchgeführten Untersuchungen und Simulationen erarbeiten das technische Potenzial der modularen Multilevel-Batterie im Elektrofahrzeug und erbringen den Machbarkeitsnachweis. Zudem wurde zu den Handlungsbedarfen, die sich aus dem Geschäftsfeld vernetzter Ladedienste für den OEM ergeben, Bezug genommen. M2B-Systeme eröffnen insbesondere mit ihrer inhärent bidirektionalen und leistungsfähigen Ladeschnittstelle einen vielversprechenden Lösungsraum für die Automobilindustrie.

Regelalgorithmen, Bauteildimensionierung und die Gesamtsystemauslegung im Allgemeinen müssen stets für den Einzelfall betrachtet werden. Sie haben den spezifischen Systemanforderungen gerecht zu werden. Dabei kann der Einsatz von M2B-Systemen gegenüber herkömmlichen ‚off-the-shelf‘ Technologien nicht pauschal präferiert werden. Alle Vorteile, die die Multileveltechnologie mit sich bringt, gehen mit einer um Größenordnungen höheren Komplexität des Batteriespeichersystems einher. Der Regelaufwand wächst entsprechend.

Nichtsdestotrotz konnten am Lehrstuhl für elektrische Energieerzeugung und -verteilung der Universität der Bundeswehr München von Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Weyh bereits erste Prototypen – zunächst für die stationäre Anwendung von M2B-Systemen – erfolgreich umgesetzt werden. Komplexität und Regelaufwand erweisen sich als handhabbar. Abbildung 4-38 zeigt links ein Foto der prototypischen Umsetzung des M2B-Systems und rechts exemplarisch eine zugehörige Messung²³.

²³ Dargestelltes Bildmaterial und Screenshot wurden dankenswerterweise von Dipl.-Ing. Arthur Singer, MBA, wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand am Lehrstuhl von Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Weyh, zur Verfügung gestellt.

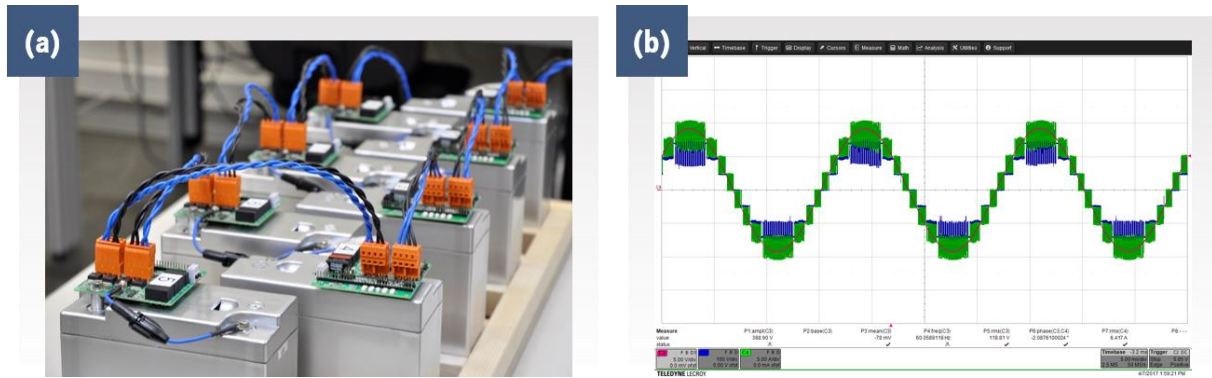


Abbildung 4-38: (a) Prototypische Umsetzung eines auf Multilevel-Technologie basierenden Batteriespeichersystems; (b) Messung von Spannung (C3/blau) und Strom (C4/grün) eines Systems, das mit vier Batteriemodulen je 48 V ausgestattet ist und eine ohmsche Last (20 Ω) speist. Es wurde eine PWM mit 20 kHz überlagert. C2 (rot) zeigt die mit Hilfe einer dSpace MicroLabBox generierte Referenzspannung. (eigene Darstellung)

Durch anforderungsgerechte Dimensionierung sollte ein Optimum für die Automotive-Anwendung von M2B-Systemen gefunden werden. Die weitere Forschung muss im Zusammenspiel mit der Serienentwicklung insbesondere eine differenzierende Analyse und Gegenüberstellung verschiedener Mikro- und Makrotopologievarianten durchführen. Nur so können fundierte Handlungsempfehlungen für die Automobilindustrie ausgesprochen werden. Nicht zuletzt sollte die künftige Forschungstätigkeit auch folgende Aspekte thematisieren:

- **DEFINITION DER SUBMODULSPANNUNG:** Die Anforderungen an Kosten, Effizienz und Oberschwingungsverhalten bedingen einen Zielkonflikt. Höhere M2B-Submodulspannungen korrelieren mit einer geringeren Anzahl an Hardwarekomponenten und einer einfacheren Systemstruktur. Gleichzeitig werden aber die inhärenten Vorzüge der Technologie, wie zum Beispiel die niedrige THD und die Überflüssigkeit eines dedizierten Batteriemanagementsystems, abgeschwächt.
- **BETRIEBSSTRATEGIEN:** Die gewählte Betriebsstrategie beeinflusst die Systemperformance sowie die Belastung der Batteriezellen. In die Berechnungsverfahren sollten neben anderen Parametern auch Grenzwerte für Balancingströme oder Spannungsdifferenzen miteinfließen. Es empfiehlt sich, anwendungsspezifische Betriebsstrategien zu erarbeiten, die den jeweiligen Anforderungen gerecht werden, und diese zu optimieren.
- **HYBRIDE BATTERIESPEICHERSYSTEME:** Durch Nutzung seiner zusätzlichen Freiheitsgrade ist ein M2B-System befähigt, simultan Batteriemodule mit verschiedenen Zelltechnologien einzusetzen. Die künftige Forschung sollte quantifizieren, inwiefern sich dies auf Lebensdauer und andere Systemeigenschaften auswirkt.

Zusammenfassend ist die M2B ein vielversprechender Ansatz, um bestehende Limitationen konventioneller Batteriespeicher- und Umrichtersysteme zu überwinden. Ihre Effizienz und der Zugewinn an Flexibilität sind durch die softwaregestützten Funktionen des Systems begründet und definieren einen neuen Maßstab. Intelligente Steuerungsalgorithmen ermöglichen ein überlegenes Batteriemangement, das unter anderem ein echt verlustfreies Balancing ermöglicht. Nicht zuletzt aber definiert sich das System durch seine Skalierbarkeit und dynamische Konfiguration. Die Kehrseite sind höhere Komplexität, Bauteilaufwand und wachsender Regelbedarf.

5. Schlussfolgerungen

Ausgangspunkt der vorliegenden Arbeit ist, dass bisherige Vorgehensmodelle im Rahmen der Forschung und Entwicklung in der Automobilindustrie im Kontext der Elektromobilität zunehmend in Frage gestellt werden müssen. Das Produkt „Mobilität“ besteht nicht länger nur aus dem Fahrzeug. Es wird zusammen mit seinen Servicekomponenten komplexer, gleichzeitig aber auch kundenwertiger. Kern des Forschungsinteresses war es, diese Entwicklung im Kontext des sich etablierenden Geschäftsfeldes vernetzter Ladedienste zu beleuchten, denn bislang gibt es kein durchgängiges Konzept zur wirtschaftlichen und technischen Integration von Elektrofahrzeugen in das Energiesystem. Die folgenden Ausführungen fassen den Ergebnisbeitrag sowie Erkenntnisgewinn der vorliegenden Arbeit kurz zusammen und werten diese.

Die aktuelle Marktsituation stellt sich wie folgt dar: Sowohl die mangelnden technischen Voraussetzungen als auch die fehlende Interoperabilität zwischen den derzeit proprietären Kundenangeboten vernetzter Ladedienste (vgl. Kapitel 1.1.3) verhindern, dass das energiewirtschaftliche Potenzial bestehender und künftiger EV-Flotten vollumfänglich ausgeschöpft werden kann. Es ist derzeit nicht möglich, die kunden- und energievorsorgungssystemseitigen Anforderungen konsequent im Angebot vernetzter Ladedienste abzubilden. Bislang fehlen dem OEM, der Energiewirtschaft sowie den Service Providern die hierfür notwendigen strategischen Handlungsoptionen. Den Grundstein für eine anforderungsgerechte und homogene technische Befähigung von EVs zur Maximierung ihres energiewirtschaftlichen Beitrags kann nur und muss der OEM legen. Er muss dazu bereit sein, hierfür in Vorleistung zu gehen.

Übergeordnetes Ziel der Forschungsarbeit ist es, einen Lösungsraum zur Effizienzsteigerung im Verteilnetz aufzuzeigen, ohne den Fahrzeugnutzer hierfür in seinem präferierten Mobilitätsverhalten einzuschränken. Hieraus leitet sich ein Handlungsbedarf für die Angebotsgestaltung und die Fahrzeugbefähigung ab. Dieser definiert den Forschungsgegenstand.

In Bezug auf eine erfolgreiche Angebotsgestaltung legen die Forschungsergebnisse lokale Energiemanagementkonzepte als gangbaren Weg zur erfolgreichen Markteinführung vernetzter Ladedienste nahe. Zu einem späteren Zeitpunkt können verbleibende Restflexibilitäten während des Ladens der Fahrzeuge für großskalige Anwendungen, wie zum Beispiel Regelleistungsprodukte, eingesetzt werden. Diese Einschätzung beruht auf qualitativen und explorativen Untersuchungen und verspricht vor allem aufgrund des gewählten Forschungsdesigns valide zu sein. Das bislang am Markt befindliche Produktangebot sowie die nach und nach sichtbar werdenden Barrieren und Hemmnisse bestätigen dies.

In einem zweiten Schritt kann die vorliegende Arbeit ein Produkt-Service-System definieren, das die künftige strategische Positionierung eines OEMs herleitet und die Anforderungen an die Fahrzeug-schnittstelle zur Lade- und Kommunikationsinfrastruktur aufzeigt. Im Ergebnis ist das wettbewerbsdifferenzierende Merkmal für den OEM nicht der Ladedienst selbst, da dieser zumeist auch mit bestehender Technologie dargestellt werden kann. Ein privatökonomischer und energiewirtschaftlicher Mehrwert vernetzter Ladedienste ergibt sich erst dann, wenn ihre Konkurrenzfähigkeit zu alternativen Produkten am Energiemarkt sichergestellt werden kann. Hierfür müssen hohe Energiemengen zuverlässig und kostengünstig abgerufen werden können. Voraussetzung dafür sind eine hohe Marktdurchdringung und das damit verbundene Lastverschiebungspotenzial sowie eine breite Kundenakzeptanz.

Nicht zuletzt leistet das beschriebene PSS auch einen strukturierenden Beitrag und ermöglicht die Schlussfolgerung von Handlungsbedarfen aus den Ergebnissen der explorativen Studie (vgl. Kapitel 2). Aus Sicht des OEMs hängt das Potenzial eines vernetzten Ladedienstes von verschiedenen Erfolgsfaktoren ab. Zunächst muss seine Flotte ein maximales Lastverschiebungspotenzial – dieses ist gleichzusetzen mit einer möglichst hohen Flexibilität im Ladeverhalten des EVs – bieten. Gleichzeitig muss jede Leistungsentnahme und -bereitstellung effizient erfolgen (Wirkungsgrad).

Als Handlungsfeld für den OEM ergibt sich die technologische Befähigung des Ladesystems. Hocheffiziente, leistungsfähige und bidirektionale Ladeschnittstellen sind in der Lage, das Potenzial eines vernetzten Ladedienstes signifikant zu steigern. Skaleneffekte müssen gezielt genutzt werden. Möglichst jedes EV sollte technisch für ein Angebot von Ladediensten befähigt und zu einer technischen Einheit aggregierbar sein. Proprietäre Lösungen sind zu vermeiden. Ebenso muss das Ziel sein, dass ein späteres Produktangebot von Ladediensten nicht von bestimmten Sonderausstattungsvarianten abhängt und sich so nur ein bestimmter Teil der Fahrzeugkunden sich dafür qualifiziert.

Die Analyse technologischer Trends in der Leistungselektronik (insbesondere der Multileveltechnologie) und Vorarbeiten des Lehrstuhls für elektrische Energieerzeugung und -verteilung der Universität der Bundeswehr München legten die ausführliche Prüfung der im weiteren Verlauf der Arbeit als „modulare Multilevel-Batterie“ bezeichneten Technologie auf ihr Einsatzpotenzial hin nahe. Sie formt die Basis für eine hochintegrierte Leistungselektronik, die Antriebsumrichter, Batterieladesystem und Batteriemanagementsystem in sich vereint. Sie vereinfacht den Antriebsstrang ebenso wie das Ladesystem maßgeblich. HV-Systemarchitekturen können mit ihrer Hilfe maßgeblich entfeinert werden. Entsprechende Bestrebungen werden vor allem aus Kostengründen in der unternehmerischen Praxis mit zunehmendem Nachdruck verfolgt.

M2B-Systeme werden zusammen mit ihren Eigenschaften in vielerlei Hinsicht durch die eingesetzte Software und ihre Regelalgorithmen definiert. Aus diesem Grund kann sich ein und dieselbe Hardware – in Abhängigkeit der Betriebsstrategie – für verschiedene Anwendungen eignen. Dabei ist die Technologie in mehrerlei Hinsicht nicht nur konkurrenzfähig gegenüber konventionellen Batteriespeicher- und Umrichtersystemen. Sie kann sie sogar übertreffen (vgl. Kapitel 4). Besonders hervorzuheben ist ihre Interoperabilität mit verschiedenen Spannungscharakteristika. Eine M2B kann an einer deutlich größeren Bandbreite existierender Ladeinfrastrukturen geladen werden als bisherige EVs. Ihr bidirektionales Ladeinterface eignet sich gut für V2G-Anwendungen. Zudem verfügt sie über die Fähigkeit, asymmetrische Lasten zu versorgen und Blindleistung zu kompensieren. Insgesamt eignen sich M2B-Systeme im EV zur Darstellung einer großen Bandbreite der im Rahmen der vorliegenden Arbeit identifizierten vernetzten Ladedienste. Sie verfügt über die notwendigen technischen Voraussetzungen. Dabei ist es nicht weniger wichtig, dass sie auch Bestandsfunktionalitäten (Laden, Antrieb sowie Leistungsversorgung der Peripherie) effizient und aus architektonischer Sicht konsequent darstellen kann.

Die im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit durchgeführten Untersuchungen und Simulationen erarbeiten das technische Potenzial der modularen Multilevel-Batterie im Elektrofahrzeug und erbringen den Machbarkeitsnachweis. Zudem wurde auf die Handlungsbedarfe, die sich aus dem Geschäftsfeld vernetzter Ladedienste für den OEM ergeben, Bezug genommen. Ihr positiver Einfluss auf das energie-wirtschaftliche Potenzial des EVs kann deutlich gezeigt werden. Im Ergebnis eröffnen M2B-Systeme

insbesondere mit ihrer inhärent bidirektionalen und leistungsfähigen Ladeschnittstelle einen vielversprechenden Lösungsraum für die Automobilindustrie.

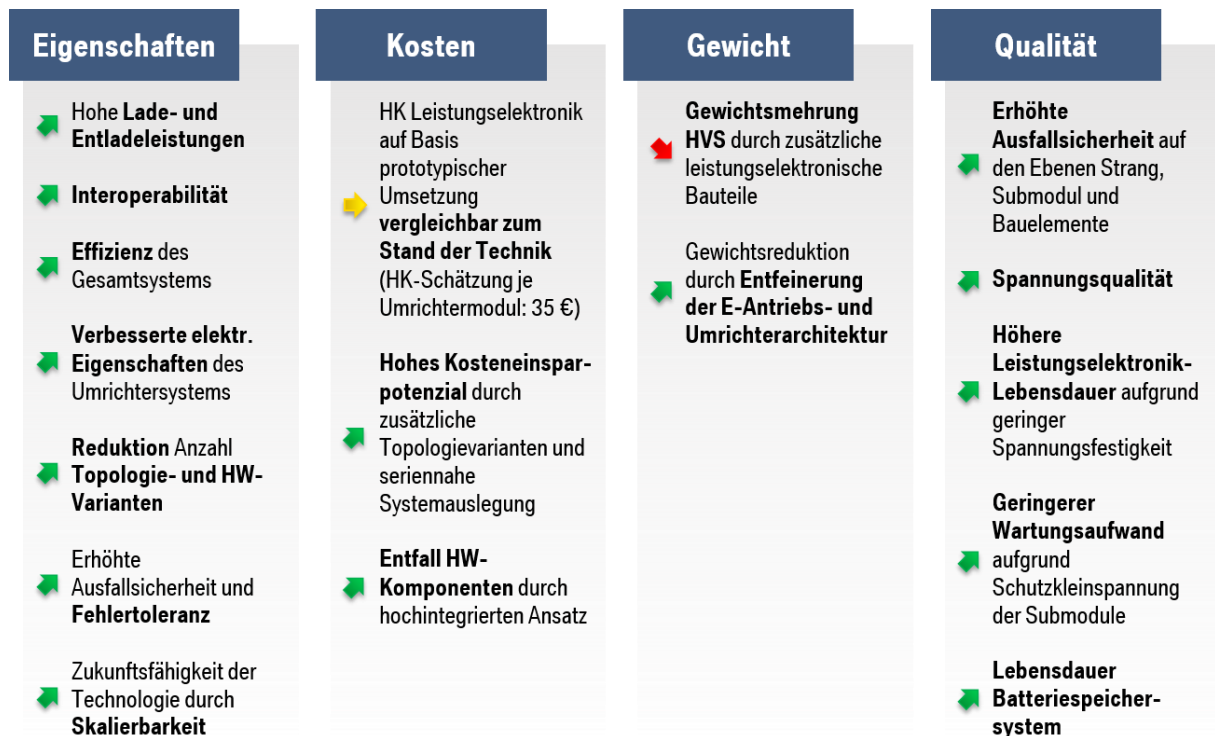


Abbildung 5-1: Qualitative EKGQ-Bewertung der modularen Multilevel-Batterie im Elektrofahrzeug (eigene Darstellung)

Abschließend zeigt Abbildung 5-1 eine qualitative Einschätzung, inwiefern sich der Einsatz der modularen Multilevel-Batterie im EV auf Eigenschaften, Kosten, Gewicht und Qualität des Fahrzeugs auswirken kann. Solche sogenannten ‚EKGQ-Bewertungen‘ sind in der unternehmerischen Praxis eine gängige Methode zur Konzeptplausibilisierung sowie zur Prüfung, ob der Untersuchungsgegenstand den geforderten Beitrag zur Zielerreichung leistet. Sie erfolgte im Rahmen eines gemeinschaftlichen Vorentwicklungsprojektes in Zusammenarbeit mit einem OEM auf Basis des in Kapitel 4.4.1 zitierten Referenzfahrzeuges.

Aufbauend auf den Ergebnissen der vorliegenden Forschungsarbeit kann ergänzend festgestellt werden, dass die M2B als technisches Lösungskonzept positive Auswirkungen auf mehr als nur das energiewirtschaftliche Potenzial des EVs hat. Auch wenn die initialen Entwicklungsaufwände, Hardwarekosten, Gewichtsimplicationen und die Systemkomplexität zunächst ein Technologiehemmnis darstellen, lohnt sich im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung der weitere wissenschaftliche Diskurs in enger Zusammenarbeit mit der Automobilindustrie.

6. Resümee

Der wissenschaftliche Erkenntnisgewinn im Hinblick auf die Angebotsgestaltung vernetzter Ladedienste und die strategische Positionierung des OEMs stehen im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit. Mit der Adaption bestehender Multilevel-Umrichtertechnologien für die Automotive-Anwendung eröffnet sie ein neues Vorgehen für eine anforderungsgerechte technische Fahrzeugbefähigung. Abschließend folgt nun mit Hilfe von je einer Kurzantwort auf die vier forschungsleitenden Fragestellungen eine Rückschau auf die erarbeiteten Lösungsvorschläge.

Forschungsfrage 1:

Welche vernetzten Ladedienste leisten durch Nutzung des Lastverschiebungspotenzials von Elektrofahrzeugflotten einen wirtschaftlichen und technischen Beitrag zur Dezentralisierung des deutschen Energieversorgungssystems?

Eine gezielte Angebotsgestaltung vernetzter Ladedienste ist aufgrund hoher Marktunsicherheiten und sich verändernden regulatorischen Rahmenbedingungen sehr schwierig. Die mangelnde Marktdurchdringung der Elektromobilität und die fehlende Kundenakzeptanz schaffen herausfordernde Rahmenbedingungen für eine erfolgreiche Produktdefinition. Die durchgeführte qualitative Studie ist trotz der vorherrschenden Unsicherheiten aufgrund der hohen Expertise und Diversität des Probandenkollektivs gut geeignet, den Forschungsgegenstand zu explorieren. Das Ergebnis empfiehlt, initial lokale Energiemanagementprodukte für EV-Kunden zu etablieren. Erst zu einem späteren Zeitpunkt kann das Produktangebot um weitere Services ausgedehnt werden.

Forschungsfrage 2:

Wie sieht ein Systemmodell aus, das identifizierte Ladedienste, strategische Positionierung eines OEMs sowie Anforderungen an die Fahrzeugschnittstelle zur Lade- und Kommunikationsinfrastruktur beschreibt?

Bislang fließen die Anforderungen vernetzter Ladedienste an das Fahrzeugkonzept nicht direkt oder zu spät in den Produktentstehungsprozess mit ein. Maßgeschneiderte Lösungen, die auf ein späteres Angebot vernetzter Ladedienste optimiert sind oder diese zumindest explizit berücksichtigen, existieren daher nicht. Vielmehr setzt die unternehmerische Praxis vernetzte Ladedienste als Produkt in der Regel auf existierende Fahrzeugkonzepte auf. Um eine handlungsleitende Orientierungshilfe zu schaffen, modelliert die vorliegende Arbeit ein Produkt-Service-System – ein Rahmenkonzept, das aus der Produktentwicklung bereits bekannt ist. Ihm lässt sich entnehmen, wie die verschiedenen Bausteine eines vernetzten Ladedienstes interagieren und auf welche Kompetenzen bzw. Ressourcen sie zurückgreifen. Darauf aufbauend konnte eine Handlungsempfehlung für die strategische Positionierung des OEMs ausgesprochen werden. Dieser entsprechend sollte er sich zunächst auf die technische Fahrzeugbefähigung konzentrieren. Energiemanagement- und Energiemarktcompetenzen sind für ihn zweitrangig.

Forschungsfrage 3.1:

Wie ist eine mögliche M2B-basierte Makrotopologie für EVs vergleichend zu konventionellen Umrichter-Topologien zu gestalten?

Bisherige Forschungsergebnisse lassen ein hohes technisches Potenzial von M2B-Systemen in Elektrofahrzeugen vermuten. Die vorliegende Forschungsarbeit greift das Konzept von „Split-Battery“ Systemen auf, verfeinert dieses und setzt es in ein Verhältnis zum vorherrschenden Stand der Technik. Sowohl Mikro- als auch Makrotopologie der M2B werden im Detail beschrieben. Gemeinsam definieren sie ein dreiphasiges Batteriespeichersystem, das sich für den Einsatz im EV eignet.

Forschungsfrage 3.2:

Welche Implikationen hat die beschriebene Topologie im Hinblick auf identifizierte Anforderungen an die Fahrzeugschnittstelle sowie auf das energiewirtschaftliche Potenzial des EVs?

Mittelfristig ist davon auszugehen, dass die Automobilindustrie die Anforderungen vernetzter Ladedienste in ihren Entwicklungsprozessen nicht explizit berücksichtigen kann. Das zu erwartende Marktpotenzial liefert hierfür keine ausreichende Begründung. Die modulare Multilevel-Batterie verändert die Systemarchitektur des Elektrofahrzeuges fundamental. Die Auswirkungen ihres Einsatzes reichen dabei deutlich über einen positiven Einfluss auf das energiewirtschaftliche Potenzial eines EVs hinaus. Genau dieser Zusammenhang stellt ihre Chance dar. Die vorliegende Arbeit identifiziert Systemvorteile, die den Einsatz eines im Vergleich komplexeren M2B-Systems rechtfertigen können.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Herkömmliche Wertschöpfungskette in der Automobilindustrie (in Anlehnung an Kley, Lerch, & Dallinger, 2011) 2

Abbildung 1-2: Veränderungen in der automobilen Wertschöpfungskette durch Elektromobilität (in Anlehnung an Kley, Lerch, & Dallinger, 2011) 3

Abbildung 1-3: Adaption der Typologie von Tukker (2004) auf Geschäftsmodelle für Mobilitätskonzepte (Kley, 2011)..... 4

Abbildung 1-4: Übersicht über exogene und endogene Herausforderungen für die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten der OEMs im Bereich Elektromobilität (eigene Darstellung)..... 5

Abbildung 1-5: Strukturwandel in der Energieversorgung - Intelligente dezentrale Systeme setzen sich durch (eigene Darstellung)..... 7

Abbildung 1-6: Integration von Elektrofahrzeugflotten als Beitrag zur erfolgreichen Dezentralisierung des Energieversorgungssystems (eigene Darstellung) 8

Abbildung 1-7: Zulassungszahlen von BEVs und PHEVs in Deutschland (GoingElectric, 2019) 9

Abbildung 1-8: Exemplarischer Auszug aus dem aktuellen Angebot vernetzter Ladedienste: Dargestellt sind (a) Kiwigrid mit „Das situative Auto“ (Kiwigrd, 2017), (b) LichtBlick mit „Fahrstrom“ (LichtBlick, 2017), (c) Greencom mit „Energy IoT Plattform“ (Greencom, 2017), (d) The Mobility House mit „Vehicle-to-Grid (V2G)“ (The Mobility House, 2017) sowie (e) BMW mit „BMW Digital Charging Service“ (BMW Group, 2017) 10

Abbildung 1-9: Zentrale Herausforderungen bei der Integration von EV Flotten in dezentrale Energieversorgungssysteme (eigene Darstellung) 13

Abbildung 1-10: Aufbau und Struktur der Arbeit (eigene Darstellung) 16

Abbildung 2-1: Mögliche Vorgehensweisen explorativer Forschung (eigene Darstellung in Anlehnung an Bortz & Döring (2006))..... 20

Abbildung 2-2: Paradigmenwechsel im Energieversorgungssystem: Insbesondere die Strukturen in den unteren Spannungsebenen wandeln sich zu aktiven, kleinteiligen Systemen (3M, 2018)..... 24

Abbildung 2-3: Abstraktes Modell einer IKT-basierten Architektur künftiger Energieversorgungsstrukturen inklusive exemplarischer Anwendungsbereiche und Funktionalitäten innerhalb ihrer Ebenen (eigene Darstellung in Anlehnung an Appelrath, Kagermann, & Mayer (2012)) 25

Abbildung 2-4: Intelligente dezentrale Energiesysteme ermöglichen durch Aggregation physischer Systemkomponenten und Vermittlungstechnologien ein Angebot intelligenter Markt- und Netzdienste (eigene Darstellung in Anlehnung an Appelrath, Kagermann, & Mayer (2012))..... 26

Abbildung 2-5: Marktübliche Ladestandards und Steckertypen für Elektrofahrzeuge (eigene Darstellung) 27

Abbildung 2-6: Divergierende Forschungsergebnisse zu Netzzrückwirkungen von EVs aufgrund großer Bandbreite verwendeter Modellierungsansätze und Inputparameter (eigene Darstellung) 29

Abbildung 2-7: Übersicht über Anwendungsfälle vernetzter Ladedienste in der bestehenden wissenschaftlichen Literatur (eigene Darstellung) 33

Abbildung 2-8: Bereitstellung von Regelreserven innerhalb der UCTE (eigene Darstellung in Anlehnung an Oudalov, Chartouni, & Ohler (2007))..... 36

Abbildung 2-9: Zusammensetzung des Expertenkollektivs der durchgeführten Stakeholder-Analyse (eigene Darstellung).. 38

Abbildung 2-10: Inhalte der durchgeführten explorativen Studie (eigene Darstellung)..... 39

Abbildung 2-11: Handlungsfelder für die erfolgreiche Dezentralisierung des deutschen Energieversorgungssystems sowie die Förderung vernetzter Ladedienste (eigene Darstellung) 40

Abbildung 2-12: Usecases vernetzter Ladedienste mit hohem technischen und wirtschaftlichen Potenzial (eigene Darstellung) 42

Abbildung 2-13: Priorisierung des technischen und ökonomischen Potenzials der identifizierten vernetzten Ladedienste (eigene Darstellung) 43

Abbildung 2-14: Schlüsselrollen innerhalb eines Marktes vernetzter Ladedienste und ihre Zuordnung zu den beteiligten Stakeholdern (eigene Darstellung) 44

Abbildung 2-15: Voraussetzungen für das Einbinden von Elektrofahrzeugen in den Markt vernetzter Ladedienste (eigene Darstellung)..... 45

Abbildung 2-16: Konkurrierende Marktpositionierung von Service Providern und OEMs zu etablierten Marktteilnehmern (eigene Darstellung) 46

Abbildung 2-17: Handlungsbedarfe für Service Provider und OEMs (eigene Darstellung)..... 47

Abbildung 3-1: PSS Schichtenmodell (eigene Darstellung in Anlehnung an Schenkl et al. (2014)) 49

Abbildung 3-2: Lösungsschicht innerhalb eines Produkt-Service-Systems (eigene Darstellung in Anlehnung an Schenkl et al. (2014))..... 50

Abbildung 3-3: PSS sind dazu in der Lage, Technologien entweder (a) zu verbessern oder (b) ihnen zum Durchbruch zu verhelfen (eigene Darstellung in Anlehnung an Schenkl et al. (2014)) 51

Abbildung 3-4: Vereinfachter Algorithmus zur Berechnung eines stündlichen Ladeplans zur Sicherstellung der Netzstabilität (eigene Darstellung) 54

Abbildung 3-5: Exemplarisches Ressourcenmodell eines vernetzten Ladedienstes als Bestandteil des Servicekonzeptes (eigene Darstellung)..... 55

Abbildung 3-6: Produktkomponenten vernetzter Ladedienste (eigene Darstellung)..... 56

Abbildung 3-7: Exemplarisches Sequenzdiagramm zur Authentifizierung des EVs und Verhandlung eines Ladeplans (eigene Darstellung)..... 57

Abbildung 3-8: Handlungsbedarfe für den OEM, um ein kundenwertes und wettbewerbsdifferenzierendes Angebot vernetzter Ladedienste zu ermöglichen (eigene Darstellung)..... 58

Abbildung 4-1: Aufbau und Struktur heutiger Batteriespeichersysteme (eigene Darstellung)..... 62

Abbildung 4-2: HV-Systemarchitektur konventioneller EVs (eigene Darstellung) 64

Abbildung 4-3: Lademodi und Länderspezifika induzieren zahlreiche Varianten in der HV-Systemarchitektur (eigene Darstellung)..... 65

Abbildung 4-4: Einfache Antriebsstrangtopologie (eigene Darstellung) 65

Abbildung 4-5: Der HV-Bus speist zahlreiche weitere elektrische Verbraucher im Gesamtfahrzeugsystem mit Energie; Bestehende NV-Verbraucher werden über einen zusätzlichen DC/DC-Wandler gekoppelt (eigene Darstellung als Ergänzung zu Abbildung 4-2) 67

Abbildung 4-6: Vergleichende Darstellung der betrachteten Batterieumrichterkonzepte (eigene Darstellung)..... 70

Abbildung 4-7: Die modulare Multilevel-Batterie prägt sowohl das Lade- als auch das Antriebssystem eines EVs entscheidend (eigene Darstellung). 71

Abbildung 4-8: M2B-Modultopologie mit neun Schaltern (eigene Darstellung)..... 72

Abbildung 4-9: Einphasige M2B mit insgesamt vier Vierquadranten-Modulen: Die rot dargestellten Strompfade visualisieren mögliche Schaltzustände. Modul 1 ist in Serie zu den beiden parallel betriebenen Modulen 2 und 4, während Modul 3 überbrückt ist. Die reultierende Konfiguration ist im Bild unten rechts zu sehen. (eigene Darstellung) 73

Abbildung 4-10: Spannungsverlauf (120 V, 60 Hz) und THD-Charakteristik einer einphasigen M2B mit insgesamt 50 Batteriemodulen: Jedes davon ist mit nur einer Batteriezelle ausgestattet. (Helling, Glück, Singer, Pfisterer, & Weyh, 2019) 74

Abbildung 4-11: THD einer einphasigen M2B ohne zusätzliche Filter als Funktion über der Batteriemodulspannung und eingesetzter PWM-Frequenz (Helling, Glück, Singer, Pfisterer, & Weyh, 2019) 74

Abbildung 4-12: Systemtopologie eines dreiphasigen M2B-Systems mit (a) Sternkonfiguration und optional herausgeführtem Sternpunkt, (b) Deltakonfiguration und (c) reduzierter Strangkonfiguration (eigene Darstellung in Anlehnung an Helling, et al. (2019))..... 75

Abbildung 4-13: Wahl der Anzahl der Submodule ist abhängig vom Optimierungsziel eines M2B-Systems (eigene Darstellung)..... 77

Abbildung 4-14: Konventionelle Umrichtersysteme nutzen statische Batteriespeichersysteme und generieren gewünschte Ausgangsspannungen mittels Pulsweitenmodulation. (eigene Darstellung)..... 77

Abbildung 4-15: Exemplarischer Spannungsverlauf eines "Split Battery" Systems mit serieller Modulkonnektivität und Darstellung der zugehörigen Submodulkonfigurationen. (eigene Darstellung)..... 78

Abbildung 4-16: Exemplarischer Spannungsverlauf einer M2B mit serieller und paralleler Modulkonnektivität sowie Darstellung der zugehörigen Submodulkonfigurationen. (eigene Darstellung)..... 79

Abbildung 4-17: Je nach gewünschter Ausgangsspannung an den Terminals eines M2B-Systems sind unterschiedliche Submodulkonfiguration möglich und erforderlich. Als Grundlage für die mathematische Verlustbetrachtung werden diese für (a) $UBatt \geq ULast \geq UBatt/2$ und (b) $UBatt/2 > ULast \geq UBatt/3$ näher beschrieben. Hierfür wurde eine M2B mit insgesamt acht Submodulen als Beispiel herangezogen. 80

Abbildung 4-18: Simulationsergebnis einer vergleichenden Betrachtung der Batterieverluste eines „Split Battery“ Systems mit ausschließlich serieller Modulkonnektivität und einem M2B-System. Abhängig von der Anzahl der Submodule ergeben sich bei letzterem bereits für $ULast = UBatt$ bis zu ca. 8,3 % geringere Batterieverluste. 81

Abbildung 4-19: Ablaufdiagramm einer einfachen Betriebsstrategie mit dem Ziel hohe Balancingströme zwischen M2B-Modulen aufgrund von Spannungsabweichungen zu vermeiden (eigene Darstellung) 82

Abbildung 4-20: Simulationsergebnis des Stromrippels durch ein 48 V Batteriemodul (blaue Kurve) und dem zugehörigen Phasenstrom eines M2B-Systems (schwarze Kurve) mit insgesamt acht Modulen je 48 V (Helling, Glück, Singer, Pfisterer, & Weyh, 2019). 84

Abbildung 4-21: EV Systemarchitektur auf Basis M2B (vereinfacht; eigene Darstellung) 85

Abbildung 4-22: Durch Rekonfiguration ihrer Umrichterarme kann die Interoperabilität von M2B-Systemen mit AC- und DC-Spannungsquellen sichergestellt werden. Die Darstellung zeigt mögliche Varianten auf Basis von M2B-Systemen in (a) Deltakonfiguration sowie (b) Sternkonfiguration. Je nach M2B-Topologie und durch den Einsatz entsprechender zusätzlicher Trennschalter und Konnektoren sind (c) weitere Konfigurationen denkbar. (eigene Darstellung)..... 86

Abbildung 4-23: Rekonfiguration der M2B-Umrichterarme ermöglicht ausreichend hohe Systemspannungen für DC-Schnellladen (eigene Darstellung)..... 86

Abbildung 4-24: Simulation (Matlab/Simulink) des Oberschwingungsgehaltes des induzierten Stromverlaufes eines M2B-Umrichterarmes: Hierfür wurden Submodulspannungen von (a) 3,5 V bzw. 48 V (b) ohne und (c) mit überlagerter PWM (10 kHz) gewählt. Als Referenz dient (d) ein herkömmlicher Dreipunktumrichter mit einer Modulationsfrequenz von ebenfalls 10 kHz. Das Umrichter- bzw. Batteriesystem wird jeweils mit einer Last von $10 \Omega / 100 \mu H$ betrieben (Helling, Glück, Singer, & Weyh, 2016). 87

Abbildung 4-25: Aufbau des Matlab/Simulink-Simulationsmodells zur Untersuchung eines dreiphasigen M2B-Systems (eigene schematische Darstellung) 89

Abbildung 4-26: Simulation der Spannungsverläufe eines dreiphasigen M2B-Systems mit einer vorgegebenen Sollspannung von 230 V AC (50 Hz) je Umrichterarm (eigene Darstellung)..... 92

Abbildung 4-27: Simulation der Spannungs- und Leistungsverläufe eines einphasigen M2B-Systems mit einer Ladeleistung von 1,0 kW (RMS). Die Darstellung zeigt die Spannungen an den Terminals des M2B-Phasenarmes, seine durch eine P-Regelung vorgegebene Sollspannung, die zugehörige Netzspannung sowie den Spannungsverlauf am Netzfilter (oben). Ebenso werden die Leistungsverläufe von Speichersystem und Netz (mitte) sowie die Verlustleistungsanteile (unten) visualisiert. (eigene Darstellung) 93

Abbildung 4-28: Simulation der Spannungs- und Leistungsverläufe eines einphasigen M2B-Systems mit einer Ladeleistung von 3,9 kW (RMS). Die Darstellung zeigt die Spannungen an den Terminals des M2B-Phasenarmes, seine durch eine P-Regelung vorgegebene Sollspannung, die zugehörige Netzspannung sowie den Spannungsverlauf am Netzfilter (oben). Ebenso werden die Leistungsverläufe von Speichersystem und Netz (mitte) sowie die Verlustleistungsanteile (unten) visualisiert. (eigene Darstellung) 94

Abbildung 4-29: Simulation der Spannungs- und Leistungsverläufe eines einphasigen M2B-Systems mit einer Ladeleistung von 6,1 kW (RMS). Die Darstellung zeigt die Spannungen an den Terminals des M2B-Phasenarmes, seine durch eine P-Regelung vorgegebene Sollspannung, die zugehörige Netzspannung sowie den Spannungsverlauf am Netzfilter (oben). Ebenso werden die Leistungsverläufe von Speichersystem und Netz (mitte) sowie die Verlustleistungsanteile (unten) visualisiert. (eigene Darstellung) 95

Abbildung 4-30: Gegenüberstellung der Systemeffizienz eines einphasigen, netzgekoppelten MMC-basierten „Split Battery“ Systems mit einem M2B-System. Jedes davon arbeitet mit acht Umrichter-Submodulen und setzt 48 V Li-Ionen-Batteriemodule ein. Die Batterieverluste werden mitberücksichtigt. Gleichzeitig wird der Einfluss einer überlagerten Pulsweitenmodulation quantifiziert. (Helling, Glück, Singer, Pfisterer, & Weyh, 2019) 96

Abbildung 4-31: Simulation der Spannungsverläufe eines dreiphasigen M2B-Systems mit einer vorgegebenen Sollpeakspannung von 450 V (150 Hz) je Umrichterarm (eigene Darstellung) 96

Abbildung 4-32: Simulation der Spannungsverläufe eines dreiphasigen M2B-Systems mit einer vorgegebenen Sollpeakspannung von 250 V (30 Hz) je Umrichterarm (eigene Darstellung) 97

Abbildung 4-33: Ergänzendes Simulationsergebnis auf Basis der vergleichenden Betrachtung der Batterieverluste eines „Split Battery“ Systems mit ausschließlich serieller Modulkonnektivität und einem M2B System (vgl. Abbildung 4-18). Bei geringeren Ausgangsspannungen reduzieren sich die Batterieverluste von M2B Systemen überproportional. Der Effizienzgewinn beläuft sich für $U_{Last} = U_{Batt}$ auf 8,3 % und steigt im Beispiel für $U_{Last} = 12U_{Batt}$ bereits auf über 55 % an..... 97

Abbildung 4-34: Vergleichende Betrachtung der Systemverluste eines einphasigen MMC-basierten "Split Battery" Systems und einer M2B; Es wurden je acht 48 V-Batteriemodule eingesetzt; Die Batterieverluste wurden mitberücksichtigt; Die Spannung an den Batterieterminals wurde mit 115 V vorgegeben (bei 50 Hz und überlagerter PWM mit einer Taktung von 25 kHz) (Helling, Glück, Singer, Pfisterer, & Weyh, 2019)..... 98

Abbildung 4-35: Schematische Darstellung der Makro- (links) und Mikrotopologie (rechts) des von Helling, et al. entwickelten Konzeptes zur effizienten Auskopplung einer Niederspannungsquelle aus M2B-Systemen im EV (eigene Darstellung in Anlehnung an Helling, Kuder, Singer, Schmid & Weyh (2018))..... 99

Abbildung 4-36: Zusammenfassende Darstellung des M2B-Konzeptes und der aus seinem modularen Aufbau resultierenden Eigenschaften (eigene Darstellung) 100

Abbildung 4-37: Ladesystemimplikationen durch den Einsatz von M2B-Systemen im EV (eigene Darstellung) 101

Abbildung 4-38: (a) Prototypische Umsetzung eines auf Multilevel-Technologie basierenden Batteriespeichersystems; (b) Messung von Spannung (C3/blau) und Strom (C4/grün) eines Systems, das mit vier Batteriemodulen je 48 V ausgestattet ist und eine ohmsche Last (20 Ω) speist. Es wurde eine PWM mit 20 kHz überlagert. C2 (rot) zeigt die mit Hilfe einer dSpace MicroLabBox generierte Referenzspannung. (eigene Darstellung)..... 103

Abbildung 5-1: Qualitative EKGQ-Bewertung der modularen Multilevel-Batterie im Elektrofahrzeug (eigene Darstellung) 106

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Anforderungen der UCTE an das Angebot von Regelreserven (OpHB-Team, 2009).....	36
Tabelle 3-1: Detaillierung exemplarischer Produktmodelle zu ausgewählten Usecases vernetzter Ladedienste.....	52
Tabelle 4-1: Lademodi und Leistungsniveaus entsprechend IEC 61851-1 und IEC 61851-23	62

Literaturverzeichnis

- 3M. (2018, Januar 06). *Smart Grid - Connected, Efficient and Sustainable Energy*. Retrieved from http://solutions.3m.com/wps/portal/3M/en_EU/SmartGrid/EU-Smart-Grid/
- Albers, A., Kurrle, A., & Moeser, G. (2014). Modellbasiertes Anforderungsmanagement von Systems-of-Systems am Beispiel vernetztes Fahrzeug. In M. Maurer, & S.-O. Schulze, *Tag des Systems Engineering 2014* (pp. 373-382). Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.
- Allebord, S., Hamerski, R., & Marquardt, R. (2008). New transformerless, scalable modular multilevel converters for HVDC-transmission. *IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC)*, pp. 174-179.
- Andersen, P., Mathews, J., & Rask, M. (2009). Integrating private transport into renewable energy policy: the strategy of creating intelligent recharging grids for electric vehicles. *Energy Policy* 37, pp. 2481-2486.
- Appelrath, H.-J., Kagermann, H., & Mayer, C. (2012). *Future Energy Grid. Migrationspfade ins Internet der Energie (acatech Studie)*. Heidelberg: Springer Verlag.
- Atia, R., & Yamada, N. (2015). More accurate sizing of renewable energy sources under high levels of electric vehicle integration. *Renewable Energy*, 81, pp. 918-925.
- Aurich, J. C., Mannweiler, C., & Schweitzer, E. (2010). How to design and offer services successfully. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* (2), pp. 136-143.
- Babrowski, S., Heinrichs, H., Jochem, P., & Fichtner, W. (2014). Load shift potential of electric vehicles in Europe. *Journal of power sources*, 255, pp. 283-293.
- Baines, T., Lightfoot, H. W., Evans, S., Neely, A., Greenough, R., & Peppard, J. (2007). State-of-the-art in product-service systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* (59), pp. 1543-1552.
- Baumhöfer, T., Brühl, M., Rothgang, S., & Sauer, D. U. (2014). Production caused variation in capacity aging trend and correlation to initial cell performance. *Journal of Power Sources*, 247, pp. 332-338.
- Benze, J., Hübner, C., & Kießling, A. (2011). Das intelligente Energiesystem als zukünftige Basis für ein nachhaltiges Energiemanagement. *Tagungsband der Informatik*, pp. 1-17.
- Bertoluzzo, M., Buja, G., & Pede, G. (2013). Design considerations for fast AC battery chargers. *World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)*, 1-8.
- Bitsch, R. (2006). Integration von erneuerbaren Energiequellen und dezentralen Erzeugungen in bestehende Elektro-Energiesysteme. *2nd Leibniz Conference of Advanced Science - Solarzeitalter*.
- Blaabjerg, F., & Ionel, D. M. (2015). Renewable energy devices and systems - state-of-the-art technology, research and development, challenges and future trends. *Electric Power Components and Systems*, vol. 43, no. 12, pp. 1319-1328.
- Blaabjerg, F., & Ma, K. (2013). Future on power electronics for wind turbine systems. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 1, no. 3, pp. 139-152.
- BMW. (2016, Mai 26). *Ziel in Reichweite. Energie in Reserve. Absolut alltagstauglich - Reichweite & Laden mit dem BMW i3*. Retrieved from <http://www.bmw.de/de/neufahrzeuge/bmw-i/i3/2015/reichweite-laden.html>
- BMW Group. (2017, Dezember 16). *BMW Digital Charging Service*. Retrieved from <https://charging.bmwgroup.com/web/360electric-international/bmw-digital-charging-services>
- Bortz, J., & Döring, N. (2006). *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler*. Heidelberg: Springer Medizin Verlag.
- Bosch Mobility Solutions. (2017, November 11). *eAchse - Der modulare eAchsenantrieb*. Retrieved from <http://www.bosch-mobility-solutions.de/de/produkte-und-services/pkw-und-leichte-nutzfahrzeuge/antriebssysteme/elektroantrieb/eachse/>

- Brito, F. P., Martins, J., Pedrosa, D. D., Monteiro, V. D., & Afonso, J. L. (2013). Real-life comparison between diesel and electric car energy consumption. (C. A. Monteiro da Silva, Ed.) *Grid electrified vehicles: performance, design and environmental impacts*, pp. 209-232.
- Brooks, A. (2002). *Vehicle-to-grid demonstration project: grid regulation ancillary service with a battery electric vehicle*. San Dimas, California: Air Resources Board and the California Environmental Protection Agency.
- Bullinger, H.-J. (1994). *Einführung in das Technologiemanagement - Modell, Methoden, Praxisbeispiele*. Stuttgart: Teubner.
- Bullinger, H.-J., Fähnrich, K.-P., & Meiren, T. (2003). Service engineering - methodical development of new service products. *International Journal of Production Economics* (85), pp. 275-287.
- Bundesregierung. (2016). *Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende*. Bonn: Bundesgesetzblatt Jahrgang 2016 Teil I Nr. 43.
- Bundesregierung. (2017, Dezember 16). *Leitmarkt und Leitanbieter für Elektromobilität*. Retrieved from https://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Energiewende/Mobilitaet/podcast/_node.html
- Canzler, W., Wentland, A., & Simon, D. (2011). Wie entstehen neue Innovationsfelder? Vergleich der Formierung- und Formungsprozesse in der Biotechnologie und Elektromobilität. *Discussion Paper*.
- Chang, F., Iliina, O., Hegazi, O., Voss, L., & Lienkamp, M. (2017). Adopting MOSFET Multilevel Inverters to Improve the Partial Load Efficiency of Electric Vehicles. *19th Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe)*, pp. 1-13.
- Channegowda, J., Pathipati, V. K., & Williamson, S. S. (2015, Juni). Comprehensive review and comparison of DC fast charging converter topologies: Improving electric vehicle plug-to-wheels efficiency. *IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, pp. 263-268.
- Chen, L. R., Chen, J. J., Ho, C. M., Wu, S. L., & Shieh, D. T. (2013). Improvement of Li-ion battery discharging performance by pulse and sinusoidal current strategies. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(12), 5620-5628.
- Chen, L. R., Wu, S. L., Shieh, D. T., & Chen, T. R. (2013). Sinusoidal-ripple-current charging strategy and optimal charging frequency study for Li-ion batteries. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(1), pp. 88-97.
- Christensen, C. M. (1992). Exploring the limits of the technology S-curve. Part I: component technologies. *Production and Operations management* (1), pp. 334-357.
- Christensen, C. M. (1997). *The Innovator's Dilemma*. München: Vahlen.
- Christensen, C. M., Grossmann, J. H., & Hwang, M. D. (2009). *The Innovator's Prescription: A Disruptive Solution for Health Care*. New York: McGraw-Hill.
- Clement-Nyns, K., Haesen, E., & Driesen, J. (2010). The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid. *IEEE Transactions on Power Systems*, 25(1), pp. 371-380.
- Clement-Nyns, K., Haesen, E., & Driesen, J. (2011). The impact of vehicle-to-grid on the distribution grid. *Electric Power Systems Research*, 81(1), pp. 185-192.
- Cuhls, K., Breiner, S., & Grupp, H. (1995). *Delphi-Bericht 1995 zur Entwicklung von Wissenschaft und Technik - Mini-Delphi*. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung.
- Das, T., & Aliprantis, D. C. (2008). Small-Signal Stability Analysis of Power System Integrated with PHEVs. *Energy 2030 Conference*, pp. 1-4.
- Debnath, U. K., Ahmad, I., Habibi, D., & Saber, A. Y. (2015). Energy storage model with gridable vehicles for economic load dispatch in the smart grid. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 64, pp. 1017-1024.
- Degner, T., Arnold, G., Brandl, R., Portula, M., Scheidler, A., Bäuml, G., . . . Leifert, T. (2013). Intelligente Netzanbindung von Elektrofahrzeugen zur Erbringung von Systemdienstleistungen. *Internationaler ETG-Kongress (Vol. 5, No. 06.11)*, p. 2013.

- Deloitte. (2017, Dezember 13). *Konvergenz in der Automobilindustrie: Mit neuen Ideen Vorsprung sichern*. Retrieved from http://www.deloitte.com/assets/DcomGermany/LocalAssets/Documents/de_mfg_studie_konvergenz-automobilindustrie.pdf
- Denholm, P., & Short, W. (2006). *An evaluation of utility system impacts and benefits of optimally dispatched plug-in hybrid electric vehicles*. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.
- D'Errico, L., Lidozzi, A., Serrao, V., & Solero, L. (2009). Multilevel converters for high fundamental frequency applications. *13th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'09)*, pp. 1-14.
- Dharmakeerthi, C. H., Mithulananthan, N., & Saha, T. K. (2011). *Overview of the Impacts of Plug-in Electric Vehicles on the Power Grid*. Brisbane: IEEE.
- Diekmann, A. (2007). *Empirische Sozialforschung: Grundlagen, Methoden, Anwendungen* (4. Auflage ed.). Hamburg: Rohwohlt Verlag.
- DIN EN 50160:2011-02. (2011). Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks; German version EN 50160:2010 + Cor. :2010.
- DREWAG. (2015, September 1). *Stromversorgungsqualität*. Retrieved from http://www.drewag.de/media/pdf/de/pk_dp_stromversorgungsqualitaet.pdf
- Du, Y., Lukic, S., Jacobson, B., & Huang, A. (2011, September). Review of high power isolated bi-directional DC-DC converters for PHEV/EV DC charging infrastructure. (IEEE, Ed.) *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 553-560.
- Eaves, S., & Eaves, J. (2004). A cost comparison of fuel-cell and battery electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 130(1-2), pp. 208-212.
- EEX. (2017). *Kontraktsspezifikationen*. Leipzig: EEX Group.
- Ekman, C. (2011). On the synergy between large electric vehicle fleet and high wind penetration - an analysis of the Danish case. *Renewable Energy* 36, pp. 546-553.
- Esmaili, M., & Goldoust, A. (2015). Multi-objective optimal charging of plug-in electric vehicles in unbalanced distribution networks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 73, pp. 644-652.
- Farmer, C., Hines, P., Dowds, J., & Blumsack, S. (2010). Modeling the Impact of Increasing PHEV Loads on the Distribution Infrastructure. *43rd Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, pp. 1-10.
- Fasugba, M. A., & Krein, P. T. (2011, September). Gaining vehicle-to-grid-benefits with unidirectional electric and plug-in hybrid vehicle chargers. (IEEE, Ed.) *Vehicle Power and Propulsion Convergence (VPPC)*, pp. 1-6.
- Fernandez, L. P., Roman, T. G., Cossent, R., Domingo, C. M., & Frias, P. (2011). Assessment of the Impact of Plug-in Electric Vehicles on Distribution Networks. *IEEE Transactions on Power Systems* vol. 26, pp. 206-213.
- Frankfurter Allgemeine Zeitung. (2017, August 19). *Stromnetz und Ladestationen: Würden massenhaft E-Autos Deutschland überfordern?* Retrieved August 22, 2017, from Frankfurter Allgemeine Zeitung: <http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/stromnetz-und-ladestationen-wuerden-massenhaft-e-autos-deutschland-ueberfordern-15158518.html>
- Garvin, D. A. (1987). Competing on the eight dimensions of quality. *Harvard Business Review* (65), pp. 101-109.
- Gerbaulet, C., Schill, W.-P., & Kasten, P. (2014, November). Elektromobilitätsszenarien für Deutschland und ihre Auswirkungen auf das deutsche Stromsystem bis 2030. *Synthesebericht DEFINE - Development of an Evaluation Framework for the Introduction of Electromobility*, pp. 8-15.
- Ghasemi, A., Mortazavi, S. S., & Mashhour, E. (2016). Hourly demand response and battery energy storage for imbalance reduction of smart distribution company embedded in electric vehicles and wind farms. *Renewable Energy*, 85, pp. 124-136.

- Glück, J., Brandt, L. S., & Weyh, T. (2017). Connected Charging Services for Electric Vehicles: A Stakeholder Analysis for Identifying Smart Charging Strategies in Distributed Energy Systems. In *NEIS Conference 2016* (pp. 83-88). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Gogoana, R., Pinson, M. B., Bazant, M. Z., & Sarma, S. E. (2014). Internal resistance matching for parallel-connected lithium-ion cells and impacts on battery pack cycle life. *Journal of Power Sources*, 252, pp. 8-13.
- GoingElectric. (2019, September 29). Retrieved from Zulassungszahlen von Elektroautos und Plug-in Hybriden: <https://www.goingelectric.de/zulassungszahlen/>
- Götz, S. M., Peterchev, A. V., & Weyh, T. (2015). Modular multilevel converter with series and parallel module connectivity: Topology and control. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30(1), pp. 203-215.
- Green, R., Wang, L., & Alam, M. (2011). The impact of plug-in hybrid electric vehicles on distribution networks: a review and outlook. *Renewable Sustainable Energy Review* 15, pp. 544-553.
- Greencom. (2017, Dezember 16). *Energy IoT Platform*. Retrieved from <https://www.greencom-networks.com/energy-iot-platform/>
- Groenveld, P. (1997). Roadmapping integrates business and technology. *Research-Technology Management*, 40(5), pp. 48-55.
- Guille, C., & Cross, G. (2009). A conceptual framework for the vehicle-to-grid (V2G) implementation. *Energy Policy* 37, pp. 4379-4390.
- Habib, S., Kamran, M., & Rashid, U. (2015). Impact analysis of vehicle-to-grid technology and charging strategies of electric vehicles on distribution networks - a review. *Journal of Power Sources*, 277, pp. 205-214.
- Häder, M. (2009). *Delphi-Befragungen. Ein Arbeitsbuch*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Häder, M., & Häder, S. (1995). Delphi und Kognitionspsychologie: Ein Zugang zur theoretischen Fundierung der Delphi-Methode. *ZUMA-Nachrichten*, pp. 8-34.
- Hartmann, N., & Özdemir, E. D. (2011). Impact of different utilization scenarios of electric vehicles on the German grid in 2030. *Journal of power sources*, 196 (4), pp. 2311-2318.
- Haverkort, B. (2013). The Dependable Systems-of-Systems Design Challenge. In *Security & Privacy, Vol. 11, No. 5*. IEEE.
- Headley, S. (2006). *Impact of plug-in hybrid vehicles on the electric grid*. Oak Ridge, TN: Oak Ridge National Laboratory.
- Heinrichs, H. U. (2014). *Analyse der langfristigen Auswirkungen von Elektromobilität auf das deutsche Energiesystem im europäischen Energieverbund (Vol. 5)*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.
- Helling, F., Glück, J., Singer, A., & Weyh, T. (2016, September). Modular multilevel Battery (M2B) for electric vehicles. *18th European Conference on Power Electronics and Applications (IEEE EPE'16 ECCE Europe)*, pp. 1-9.
- Helling, F., Glück, J., Singer, A., Pfisterer, H. J., & Weyh, T. (2019). The AC battery - A novel approach for integrating batteries into AC systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 104, pp. 150-158.
- Helling, F., Kuder, M., Singer, A., Schmid, S., & Weyh, T. (2018). Low Voltage Power Supply in Modular Multilevel Converter based Split Battery Systems for Electrical Vehicles. *2018 20th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'18 ECCE Europe)*, pp. 1-10.
- Helling, F., Pfaeffl, M., Huber, J., Goetz, S., & Weyh, T. (2014). Modular Multilevel Parallel Converter (M2PC) for electrically driven vehicles. *Proceedings of International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management (PCIM Europe)*, 1-8.
- Hillers, A., & Biela, J. (2013). Optimal design of the modular multilevel converter for an energy storage system based on split batteries. *15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, pp. 1-11.
- Hodge, B., Huang, S., Shukla, A., Pekny, J., & Reklaitis, G. (2010). The effects of vehicle-to-grid systems on wind power integration in California. *Computer Aided Chemical Engineering* 28, pp. 1039-1044.
- IEC. (2017). *Electric vehicle conductive charging system*. Genf: International Electrotechnical Commission.

- IEC 61851-1:2010. (2010). Electric vehicle conductive charging system - Part 1: General requirements. 3.0.
- IEC 61851-23:2014. (2014). Electric vehicle conductive charging system - Part 23: DC electric vehicle charging station. (3.0).
- ISO/IEC. (2017). *Road vehicles - Vehicle to grid communication interface*. Genf: International Electrotechnical Commission.
- ITU-T. (2012). *Overview of the Internet of things - Series Y: Global information infrastructure, internet protocol aspects and next-generation networks*. Genf: Telecommunication Standardization Sector of ITU. Retrieved from <http://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=y.2060>
- Jauch, F., & Biela, J. (2014). Novel isolated cascaded half-bridge converter for battery energy storage systems. *16th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, pp. 1-10.
- Jochem, P., Kaschub, T., Paetz, A.-G., & Fichtner, W. (2012). Integrating Electric Vehicles into the German Electricity Grid - an Interdisciplinary Analysis. *EVS26*, pp. 1-8.
- Juul, N., & Meibom, P. (2011). Optimal configuration of an integrated power and transport system. *Energy* 36, pp. 3523-3530.
- Kampker, A., Vallée, D., & Schnettler, A. (2013). *Elektromobilität: Grundlagen einer Zukunftstechnologie*. Springer-Verlag.
- Kawakami, N., Ota, S., Kon, H., Konno, S., Akagi, H., Kobayashi, H., & Okada, N. (2014). Development of a 500-kW Modular Multilevel Cascade Converter for Battery Energy Storage Systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 6, pp. 3902-3910.
- Kelly, L., Rowe, A., & Wild, P. (2009). Analyzing the impacts of plug-in electric vehicles on distribution networks in British Columbia. *Electrical Power & Energy Convergence (EPEC)*, pp. 1-6.
- Kempton, W., & Kubo, T. (2000). Electric-drive vehicles for peak power in Japan. *Energy Policy* 28, pp. 9-18.
- Kempton, W., Udo, W., Huber, K., Komara, K., Letendre, S., & Baker, S. (2008). *A test of vehicle-to-grid (V2G) for energy storage and frequency regulation in the PJM system*. Delaware: University of Delaware.
- Kenney, B., Darcovich, K., MacNeil, D. D., & Davidson, I. J. (2012). Modelling the impact of variations in electrode manufacturing on lithium-ion battery modules. *Journal of Power Sources*, 213, pp. 391-401.
- Kim, J., Shin, J., Chun, C., & Cho, B. (2012). Stable configuration of a Li-ion series battery pack based on a screening process for improved voltage/SOC balancing. *IEEE Transactions on Power Electronics* 27(1), pp. 411-424.
- Kiviluoma, J., & Meibom, P. (2011). Methodology for modeling plug-in electric vehicles in the power system and cost estimates for a system with either smart or dumb electric vehicles. *Energy* 36, pp. 1758-1767.
- Kiwigrid. (2017, Dezember 16). *Das situative Auto - Das intelligente Fundament der Elektromobilität*. Retrieved from <https://www.kiwigrid.com/portfolio/das-situative-auto/>
- Kley, F. (2011). Neue Geschäftsmodelle zur Ladeinfrastruktur. In *Working paper sustainability and Innovation (No. S5/2011)* (No. S5/2011 ed.).
- Korte, C., Specht, E., Hiller, M., & Götz, S. (2017). Efficiency evaluation of MMSPC/CHB topologies for automotive applications. *2017 IEEE 12th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, pp. 324-330.
- Korthauer, R. (2013). *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Kraftfahrt-Bundesamt. (2017, Dezember 16). *Bestand am 1. Januar 2017 nach Umwelt-Merkmalen*. Retrieved from https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/umwelt_node.html
- Kristofferson, T., Capión, K., & Meibom, P. (2011). Optimal charging of electric drive vehicles in a market environment. *Applied Energy* 88, pp. 1940-1948.
- Kshirsager, P., & Krishnan, R. (2012). High-efficiency current excitation strategy for variable-speed nonsinusoidal back-pmf pmsm machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 48(6), pp. 1875-1889.
- Lee, Y., Jeon, S., & Bae, S. (2016). Comparison on Cell Balancing Methods for Energy Storage Applications. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(17).

- Leou, R. C., Su, C. L., & Lu, C. N. (2014). Stochastic analyses of electric vehicle charging impacts on distribution network. *IEEE Transactions on Power Systems*, 29(3), pp. 1055-1063.
- Leou, R.-C., Su, C.-L., & Lu, C.-N. (2014, May). Stochastic Analyses of Electric Vehicle Charging Impacts on Distribution Network. *IEEE Transactions on Power Systems Vol. 29, No. 3*, pp. 1055-1063.
- Lesnicar, A., & Marquardt, R. (2003). An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range. *Power Tech Conference Proceedings*(vol. 3).
- LichtBlick. (2017, Dezember 16). *Elektrofahrzeuge stabilisieren die Stromnetze*. Retrieved from <https://www.lichtblick.de/schwarmenergie/schwarmmobilitaet/>
- Linssen, J., Schulz, A., Mischinger, S., Maas, H., Günther, C., Weinmann, O., . . . Waldowski, P. (2012). *Netzintegration von Fahrzeugen mit elektrifizierten Antriebssystemen in bestehende und zukünftige Energieversorgungsstrukturen*. Jülich: Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Energie & Umwelt, Volume 150.
- Liu, D., Liu, X., Wang, Q., Zhang, Y., Sun, J., & Zhu, C. (2014). Thin Plate Spline-Based Coulombic Efficiency Prediction of Lithium Battery. *Fourth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC)*, pp. 315-319.
- Löffler, K., & Boutellier, R. (2009). Managing technological limits. *International Journal of Technoentrepreneurship* (2), pp. 134-155.
- Lopes, J. A., Soares, F. J., & Almeida, P. M. (2011). Integration of electric vehicles in the electric power system. *Proceedings of the IEEE*, 99(1), pp. 168-183.
- López, M. A., De la Torre, S., Martín, S., & Aguado, J. A. (2015). Demand-side management in smart grid operation considering electric vehicles load shifting and vehicle-to-grid support. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 64, pp. 689-698.
- Lund, H., & Kempton, W. (2008). Integration of renewable energy into the transport and electricity sectors through V2G. *Energy Policy* 36, pp. 3578-87.
- Luther, M. (2011, Juli 15). Stromnetze im Wandel - Herausforderungen und Innovationen für eine nachhaltige Energiewende. *35. Tag der Elektrotechnik*.
- Maharjan, L., Inoue, S., Akagi, H., & Asakura, J. (2009). State-of-charge (SOC)-balancing control of a battery energy storage system based on a cascade PWM converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 6, pp. 1628-1636.
- Maier, M. W. (1998). Architecting Principles for System of Systems. In *Systems Engineering*, Vol. 1, No. 4 (pp. 267-284).
- Manbachi, M., Farhangi, H., Palizban, A., & Arzanpour, S. (2016). A novel Volt-VAR Optimization engine for smart distribution networks utilizing Vehicle to Grid dispatch. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 74, pp. 238-251.
- Marquardt, R. (2010). Modular Multilevel Converter: An universal concept for HVDC-Networks and extended DC-Bus-applications. *International Power Electronics Conference (IPEC)*, pp. 502-507.
- März, M., Eckardt, B., & Schletz, A. (2007). Mechatronische Integration von Hochleistungselektronik in Komponenten des Antriebsstrangs von Hybridfahrzeuge. *Neue elektrische Antriebskonzepte für Hybridfahrzeuge*, 80, p. 232.
- Mayring, P. (1993). *Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken*. Weinheim: Deutscher Studien Verlag.
- Mayring, P. (2002). *Einführung in die qualitative Sozialforschung. Eine Anleitung zu qualitativem Denken* (Vol. 5. Auflage). Weinheim: Beltz Verlag.
- McCarthy, D., & Wolfs, P. (2010). The HV system impacts of large scale electric vehicle deployments in a metropolitan area. *Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, pp. 1-6.
- McCoy, C. H., & Ofer, D. (2017). Differential current monitoring for parallel-connected batteries. *USA Patent 9678163*.
- Meier, H., Roy, R., & Seliger, G. (2010). Industrial Product-Service Systems - IPS2. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* (59), pp. 607-627.

- Miess, M. G., & Schmelzer, S. (2014). *Synthesebericht DEFINE - Development of an Evaluation Framework for the Introduction of Electromobility*. Wien: DEFINE Konsortium.
- Mont, O. (2002). Drivers and barriers for shifting towards more service-oriented businesses: Analysis of the pSS field and contributions from Sweden. *The Journal of Sustainable Product Design* (2), pp. 89-103.
- Mullen, S. K. (2009). *Plug-In Hybrid Electric Vehicles as a source of Distributed Frequency Regulation*. Minnesota: Faculty of Graduate School University of Minnesota.
- Mummel, J., Kurrat, M., & Karges, U. (2013). Analyse der Netzrückwirkungen von diversifizierten Fahrzeugflotten. *Internationaler ETG-Kongress*.
- Musavi, F., Edington, M., Eberle, W., & Dunford, W. G. (2012). Evaluation and efficiency comparison of front end AC-DC plug-in hybrid charger topologies. *IEEE Transactions on Smart grid* 3(1), pp. 413-421.
- Musk, E. (2015, April 30). The Missing Piece. *Tesla Energy Event*.
- Myers, M. D. (1997, Juni). Qualitative Research in Information Systems. *MIS Quarterly*.
- Omann, I. (2003). Service Systems and their Impacts on Sustainable Development. *Conference on European Applications in Ecological Economics*.
- Onar, O. C., & Khaligh, A. (2010). Grid interactions and stability analysis of distribution power network with high penetration of plug-in hybrid electric vehicles. *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp. 1755-1762.
- OpHB-Team, U. (2009). *UCTE Operation Handbook Policy 1: Load-Frequency Control and performance*. ENTSO-E. Retrieved from <http://www.entsoe.eu>.
- Oudalov, A., Chartouni, D., & Ohler, C. (2007). Optimizing a Battery Energy Storage System for Primary Frequency Control. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 22, No. 3, pp. 1259-1266.
- Papadopoulos, P., Skarvelis-Kazakos, S., Grau, I., Awad, B., Cipcigan, L. M., & Jenkins, N. (2010). Impact of residential charging of electric vehicles on distribution networks, a probabilistic approach. *45th Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, pp. 1-5.
- Pathmaperuma, D., & Schippl, J. (2012). Intelligente Stromnetze. In M. Decker, T. Fleischer, & N. Weinberger, *Zukünftige Themen der Innovations- und Technikanalyse, Methodik und ausgewählte Ergebnisse* (pp. 85-120). Karlsruhe: KIT Scientific Publishing.
- Pollok, T., Szczechowicz, E., Matrose, C., Schnettler, A., Stöckl, G., Kerber, G., . . . Behrens, P. (2010). Flottenversuch Elektromobilität, Netzmanagementstrategien mittels elektrifizierter Fahrzeugflotten. *VDE Kongress Leipzig (Vol. 8, No. 9)*.
- Ponn, J., & Lindemann, U. (2011). *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte (2. Auflage)*. Berlin: Springer.
- Probst, A., & Tenbohlen, S. (2010). Herausforderungen und Chancen für das Stromnetz durch Elektromobilität. In *VDE-Kongress 2010 - E-Mobility: Technologien - Infrastruktur - Märkte*. Leipzig.
- Psola, J.-H., Bode, C., & Henke, M. (2013, November). Modell zur Prognose der Speicher potentiale einer Flotte aus Elektro- und Hybridfahrzeugen. *Internationaler ETG-Kongress 2013*, pp. 1-6.
- Putrus, G. A., Suwanapingkarl, P., Johnston, D., Bentley, E. C., & Narayana, M. (2009). Impact of electric vehicles on power distribution networks. *Vehicle Power and Propulsion Conference*, pp. 827-831.
- PWC. (2010). *Elektromobilität - Herausforderungen für Industrie und öffentliche Hand*. Frankfurt am Main.
- Qian, K., Zhou, C., & Yuan, Y. (2015). Impacts of high penetration level of fully electric vehicles charging loads on the thermal ageing of power transformers. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 65, pp. 102-112.
- Reiner, U., Leibfried, T., Allerding, F., & Schmeck, H. (2009). Potenzial rückspeisefähiger Elektrofahrzeuge und steuerbarer Verbraucher im Verteilnetz unter Verwendung eines dezentralen Energiemanagementsystems. *Internationaler ETG-Kongress*, pp. 329-334.

- Richardson, D. B. (2013). Electric vehicles and the electric grid: A review of modeling approaches, Impacts, and renewable energy integration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 19, pp. 247-253.
- Schenkl, S. A., Behncke, F. G., Hepperle, C., Langer, S., & Lindemann, U. (2013). Managing Cycles of Innovation Processes of Product-Service Systems. *2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, pp. 918-923.
- Schenkl, S. A., Sauer, R. M., & Mörtl, M. (2014). A Technology-centered Framework for Product-Service Systems. *Procedia CIRP*, pp. 295-300.
- Schill, W.-P., & Gerbaulet, C. (2015). *Power System Impacts of Electric Vehicles in Germany: Charging with Coal or Renewables?* Berlin: Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung.
- Schroeder, M., Henninger, S., Jaeger, J., Ras, A., Rubenbauer, H., & Leu, H. (2013). Integration of batteries into a modular multilevel converter. *IEEE 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, pp. 1-12.
- Serban, I., & Marinescu, C. (2010). Active power decoupling circuit for a single-phase battery energy storage system dedicated to autonomous microgrids. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2717-2722.
- Short, W., & Denholm, P. A. (2006). *Preliminary assessment of plug-in hybrid electric vehicles on wind energy markets*. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.
- Singer, A., Helling, F., Weyh, T., Jungbauer, J., & Pfisterer, H.-J. (2017, September). Modular Multilevel Parallel Converter based Split Battery System (M2B) for Stationary Storage Applications. *19th European Conference on Power Electronics and Applications (IEEE EPE'17 ECCE Europe)*, pp. 1-10.
- Sood, A., & Tellis, G. J. (2005). Technological evolution and radical innovation. *Journal of Marketing* , pp. 152-168.
- Soong, T., & Lehn, P. (2014). Evaluation of Emerging Modular Multilevel Converters for BESS Applications. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 5, pp. 2086-2094.
- Sovacool, B., & Hirsch, R. (2009). Beyond batteries: an examination of the benefits and barriers to plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) and a vehicle-to-grid (V2G) transition. *Energy Policy* 39, pp. 1095-1103.
- The Mobility House. (2017, Dezember 16). *Vehicle-to-Grid (V2G)*. Retrieved from <http://www.mobilityhouse.com/de/vehicle-to-grid-und-vehicle-to-home/>
- Tomic, J., & Kempton, W. (2007). Using fleets of electric-drive vehicles for grid support. *Journal of Power Sources* 168, pp. 459-468.
- Töpfer, A. (2010). *Erfolgreich Forschen. Ein Leitfaden für Bachelor-, Master-Studierende und Doktoranden*. Berlin: Springer Verlag.
- Tovilovic, D. M., & Rajakovic, N. L. (2015). The simultaneous impact of photovoltaic systems and plug-in electric vehicles on the daily load and voltage profiles and the harmonic voltage distortions in urban distribution systems. *Renewable Energy*, 76, pp. 454-464.
- Tsirinomeny, M., & Rufer, A. (2015). Configurable Electric Vehicle (CEV) demonstrator. *Proceedings of International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, 1-8.
- Tu, Q., Xu, Z., & Xu, L. (2011). Reduced switching-frequency modulation and circulating current suppression for modular multilevel converters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 3, pp. 2009-2017.
- Tucker, A. (2004). Eight types of product-service systems: eight ways to sustainability? Experiences from SusProNet. *Business strategy and the environment*, pp. 246-260.
- Tukker, A., & Tischner, U. (2006). Product-services as a research field: past, present and future. Reflections from a decade of research. *Journal of Cleaner Production* (14), pp. 1552-1556.
- Turton, H., & Moura, F. (2008). Vehicle-to-grid systems for sustainable development: an integrated energy analysis. *Technological Forecasting & Social Change*, pp. 1091-1108.

- Uddin, K., Moore, A. D., Barai, A., & Marco, J. (2016). The effects of high frequency current ripple on electric vehicle battery performance. *Applied Energy*, 178, 142-154.
- Ulrich, H. (1981). Die Betriebswirtschaftslehre als anwendungsorientierte Sozialwissenschaft. In M. Geist, & R. (Köhler, *Die Führung des Betriebs* (pp. 1-25). Stuttgart.
- Uno, M., & Tanaka, K. (2011). Influence of high-frequency charge-discharge cycling induced by cell voltage equalizers on the life performance of lithium-ion cells. *IEEE Transactions on vehicular technology* 60(4), pp. 1505-1515.
- van Hoek, H., Boesing, M., van Treenk, D., Schoenen, T., & De Doncker, R. W. (2010, November). Power electronic architectures for electric vehicles. *IEEE Emobility-Electrical Power Train*, pp. 1-6.
- Vargo, S. L., & Lusch, R. F. (2004). Evolving to a new dominant logic for marketing. *Journal of Marketing* (68), pp. 1-17.
- Vasanth, G. V., Roy, R., Lelah, a., & Brissaud, D. (2012). A review of product service systems design methodologies. *Journal of Engineering Design* (221), pp. 1543-1552.
- Vasiladiotis, M., & Rufer, A. (2015). A Modular Multiport Power Electronic Transformer With Integrated Split Battery Energy Storage for Versatile Ultrafast EV Charging Stations. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 5, pp. 3213-3222.
- VDE Forum Netztechnik/Netzbetrieb. (2018). *Metastudie Forschungsüberblick Netzintegration Elektromobilität*. Aachen: FGH e.V.
- Velamuri, V. K., Neyer, A.-K., & Möslein, K. M. (2011). Hybrid value creation: a systematic review of an evolving research area. *J. Betriebswirtsch.* (61), pp. 3-35.
- Volkswagen. (2016). *Der e-Golf, Technik und Preise gültig für das Modelljahr 2017*. Wolfsburg: Volkswagen.
- Wallentowitz, H., Freialdenhoven, A., & Olschewski, I. (2009). *Strategien in der Automobilindustrie. Technologietrends und Marktentwicklungen*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- Wang, J., Liu, C., Ton, D., Thou, Y. K., & Vyas, A. (2011). Impact of plug-in hybrid electric vehicles on power systems with demand response and wind power. *Energy Policy* 39, pp. 4016-4021.
- Wirasingha, S. G., Gremban, R., & Emadi, A. (2012). Source-to-wheel (STW) analysis of plug-in hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(1), pp. 316-331.
- Wyman, O. (2017, Dezember 13). *Elektrofahrzeugen gehört die Zukunft*. Retrieved from http://www.oliverwyman.com/de/pdf/Oliver_Wyman_Automotivemanager_I_2010_DE.pdf
- Yilmaz, M., & Krein, P. T. (2013, Mai). Review of Battery Charger Topologies, Charging Power Levels, and Infrastructure for Plug-In-Electric and Hybrid Vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(8), pp. 2151-2169.
- Zheng, Z., Wang, K., Peng, L., Li, Y., & Xu, L. (2013). A hybrid cascaded multilevel converter for power storage systems. *15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, pp. 1-10.
- Zhu, J. G., Sun, Z. C., Wei, X. Z., & Dai, H. F. (2015). A new lithium-ion battery internal temperature on-line estimate method based on electrochemical impedance spectroscopy measurement. *Journal of Power Sources*, 274, pp. 990-1004.

Anhang

1. Leitfaden zur Durchführung und Dokumentation der Experteninterviews im Rahmen der explorativen Studie (vgl. Kapitel 2.4)

ALLGEMEINE ANGABEN

Für jedes der durchgeführten Interviews wurden die folgenden Basisdaten erfasst:

Interviewpartner:	[Name]
Branche:	[Freie Antwort]
Firma / Institut:	[Freie Antwort]
Anzahl der Mitarbeiter	[Freie Antwort]
Tätigkeitsbereich des Interviewpartners:	[Freie Antwort]
Dauer des Interviews:	[x] Minuten
Datum:	[Datum der Durchführung des Interviews]

ABLAUF DES INTERVIEWS

Der Gesprächsverlauf der Interviews untergliederte sich in folgende drei Abschnitte:

- Kurze Einführung** in das Thema und die Fragestellung(en) des Forschungsvorhabens
- Fragen zu den Personen (Experten)**, zu ihren Aufgaben / Projekten und zu ihrer Firma / ihrem Institut
- Inhaltliche Fragen**, die sowohl auf Basis persönlicher Einschätzungen beantwortet werden sollen als auch aus der Funktion des Experten heraus

Die Experten wurden gebeten, bei jeglichen Unklarheiten im Verlauf des Interviews unmittelbar Rückmeldung zu geben.

Zu a)



Kurzvorstellung des Forschungsvorhabens und Erläuterung der Zielsetzung des Interviews:

Die Energiewende und die zunehmende Dezentralisierung der Energieversorgung in Deutschland erfordern neue Ansätze zur technischen und wirtschaftlichen Systemintegration großflächig verteilter Energieerzeugungsanlagen. Ausgangspunkt dieser Ansätze sind stets intelligente dezentrale Energieversorgungssysteme.

Herausforderungen und zentrale Fragestellungen für die Elektromobilität:

- Wie können Elektrofahrzeugflotten als mobile Speicher den Strukturwandel im deutschen Energieversorgungssystem unterstützen und bestehende Hürden überwinden? Der Fokus der Arbeit ist insbesondere der Heimkundenbereich, also diejenigen Fahrzeuge, die verteilt im Energieversorgungsnetz zu integrieren sind.

- Wie können sich beteiligte Stakeholder innerhalb des Strukturwandels strategisch positionieren?

Bisherige wissenschaftliche Beiträge beschäftigen sich insbesondere mit:

- Analyse der Auswirkungen von Elektromobilität auf das Energieversorgungssystem bei ungesteuertem und gesteuertem Laden
- Analyse, Optimierung, Simulation und prototypische Umsetzung verschiedener Ladedienste und Ladestrategien (z.B. (1.) lokale Energieoptimierung zur Maximierung des Anteils erneuerbarer Energien zum Laden von EVs, (2.) gesteuertes Laden zur Minimierung elektrischer Verluste im elektrischen Verteilnetz, (3.) kostenoptimiertes Laden auf Basis variabler Stromtarife, etc.)

Diese Arbeiten haben gemein, dass ihr Ansatz entweder problemorientiert ist oder die „Lösung“ (= Optimierungsziel) auf Basis verschiedener Prämissen vorwegnimmt, um deren Nutzen zu maximieren oder ihre (technische) Umsetzbarkeit nachzuweisen.

Zusammengefasst:

Aktuell existiert kein durchgängiges Konzept zur wirtschaftlichen und technischen Integration von Elektrofahrzeugflotten in das Energieversorgungssystem in Praxis oder Wissenschaft.

Ziel des Forschungsvorhabens ist es daher im ersten Schritt, diejenigen Ladedienste und Optimierungsstrategien für das Laden von Elektrofahrzeugen zu identifizieren, die einen maximalen wirtschaftlichen und technischen Beitrag zur Dezentralisierung des deutschen Energieversorgungssystems leisten können. Hierfür wurde ein möglichst lösungsneutraler Ansatz in Form der Exploration mit Hilfe von Experteninterviews gewählt.

An dieser Stelle daher nochmals vielen Dank, dass Sie sich für das heutige Gespräch Zeit nehmen!

Gibt es hierzu Ihrerseits Rückfragen, bevor wir mit dem eigentlichen Interview beginnen?

Zu b)



Fragen zur Person:

- Können Sie kurz zusammengefasst die Aufgaben und Tätigkeitsbereiche Ihrer Firma / Ihres Instituts darlegen?
[Freie Antwort]
- Nun zu Ihrer Person: In welchem Bereich / welcher Funktion sind Sie derzeit tätig, an welchen Projekten haben sie gearbeitet bzw. arbeiten sie derzeit?
[Freie Antwort]
 - o Nachfrage: Können Sie die genannten Projektziele übergreifend zusammenfassen und ggf. ihre persönliche Motivation und Interessen in diesem Kontext kurz darlegen?
[Freie Antwort]

- Betrachten Sie nun die Schwerpunkte Ihrer bisherigen und aktuellen Arbeit im Bereich der Elektromobilität bzw. der elektrischen Energieversorgung: Wie würden Sie diese einordnen und positionieren? Inwiefern vertreten Sie die Sicht und Interessen eines Energieversorgers/Verteilnetzbetreibers, die eines OEMs, die des Kunden oder definieren Sie Ihre Rolle anders?

[Freie Antwort]

Zu c)



Inhaltliche Fragen zur Dezentralisierung des Energieversorgungssystems:

- Wie definieren Sie den Begriff „Dezentralisierung des Energieversorgungssystems“?
[Freie Antwort]
- Wo bzw. in welcher Hinsicht erkennt man schon heute ein höheres Maß an Dezentralisierung – Was haben wir schon geschafft und wo müssen wir hin?
[Freie Antwort]
- Wie definieren Sie den Begriff „intelligentes dezentrales Energieversorgungssystem“?
[Freie Antwort]
- Ein verbreiteter Ansatz zur Lösung für die Gestaltung intelligenter und nachhaltiger Energiesysteme liegt in der Vernetzung der zu integrierenden Energieerzeugungsanlagen und der Verbraucher sowie in der interdisziplinären Zusammenarbeit der beteiligten Stakeholder. Stimmen Sie mit dieser These überein? Wenn ja/nein, warum?

[Freie Antwort]

- o Nachfrage: Inwieweit sind alternative Lösungsansätze notwendig?



Information:

Betrachten wir nun den Fall der zunehmenden Verbreitung von Elektrofahrzeugen, die mittel- bis langfristig in großer Zahl insbesondere in das Verteilnetz (Use-Case Heimpladen) zu integrieren sind:

- Zunächst bieten Elektrofahrzeuge, unabhängig von der zur Verfügung stehenden Ladeleistung und unabhängig davon, ob ausschließlich unidirektional oder auch bidirektional geladen werden kann, ein gewisses Lastverschiebungspotenzial.
- Durch gezielte Nutzung dieses Lastverschiebungspotenzials können verschiedene Systemdienstleistungen dargestellt und zahlreiche Optimierungsstrategien mit dem Ziel verfolgt werden, zur Dezentralisierung des Energieversorgungssystems beizutragen.

- Beispiele hierfür sind: Netzfrequenzregelung, Peak-Shaving, lokale Energieoptimierung z.B. im Hinblick auf Maximierung des Eigenverbrauchsanteils dezentraler Energieerzeugungsanlagen, Blindleistungskompensation, Arbitrage, Regelleistungsbereitstellung, etc.



Inhaltliche Fragen zu vernetzten Ladediensten:

- Welche vernetzten Ladedienste und Optimierungsstrategien für Elektrofahrzeugflotten leisten potenziell einen Beitrag zur Dezentralisierung des deutschen Energieversorgungssystems?

[Freie Antwort]

- Nachfrage 1: Begründen Sie Ihre Antwort und erläutern Sie den jeweiligen Beitrag?
- Nachfrage 2: Haben Sie die Einschätzung eher aus Ihrer Funktion heraus formuliert? Unterscheidet sich diese ggf. von Ihrer persönlichen?
- Im Hinblick auf die (technische und wirtschaftliche) Realisierbarkeit und im Hinblick auf einen maximalen Beitrag zur Dezentralisierung: Welche der soeben genannten Use-Cases würden Sie als Primärziele definieren, welche als Sekundärziele?

[Freie Antwort]

- Nachfrage 1: Sehen Sie ggf. o.g. Use-Cases als technisch oder betriebswirtschaftlich nicht umsetzbar oder sinnvoll an?
- Nachfrage 2: Schließen sich bestimmte Use-Cases gegenseitig aus?
- Nachfrage 3: Sind Elektrofahrzeugflotten (etwa in direkter Konkurrenz zu stationären Speichersystemen) hier konkurrenzfähig?
- Worin sehen Sie die Rolle des Energieversorgers, OEMs oder Serviceproviders (= „unabhängiger“ Drittanbieter für vernetzte Ladedienste)?

[Freie Antwort]

- Welche Entwicklungen und Gründe sind denkbar, weshalb sich vernetzte Ladedienste im Kontext dezentraler Energieversorgungssysteme nicht durchsetzen?

[Freie Antwort]

- Nachfrage: Was sind demnach kritische Erfolgsfaktoren?
- Haben Sie bestimmte Aspekte und Fragestellungen vermisst oder haben Sie noch Anmerkungen zu den besprochenen Inhalten?

[Freie Antwort]

2. Delphi-Befragung zur Validierung der Untersuchungsergebnisse (vgl. Kapitel 2.4)

ANSCHREIBEN

Sehr geehrte Damen und Herren,

mit dieser Umfrage möchte ich Bezug auf die im letzten Jahr durchgeführte Studie zum Thema „Vernetzte Ladedienste“ nehmen. Die Interviews sind nun abgeschlossen und bilden auf Basis Ihres Know-How's eine solide Datenbasis, um fundierte Rückschlüsse auf die künftige Rolle der Elektromobilität in dezentralen Energieversorgungssystemen zu ziehen.

An dieser Stelle möchte ich mich nochmals recht herzlich für Ihre Bereitschaft und Ihr Mitwirken an der Studie im Rahmen meines Promotionsvorhabens bedanken.

In die Interviews miteinbezogen wurden sowohl Vertreter aus der unternehmerischen Praxis (Energieversorgungsunternehmen, Verteilnetzbetreiber, OEMs, Energiemanagement-Dienstleister) als auch Forschungsinstitute mit engem inhaltlichem Bezug. Dies ermöglichte es, ein unvoreingenommenes Bild des Themenkomplexes zu zeichnen und diesen aus unterschiedlichsten Blickwinkeln zu beleuchten.

Wie im Rahmen der Interviews angekündigt, sollen die Ergebnisse nun im Rahmen einer sogenannten „Delphi-Analyse“ validiert und quantifiziert werden. Hierzu werden die Kernergebnisse zunächst im Detail beschrieben, um einen gemeinsamen Kenntnisstand herzustellen. Basierend hierauf sollen einzelne Aspekte ein weiteres Mal kritisch hinterfragt werden.

Ich möchte Sie bitten, sich ca. 20 Minuten Zeit für die folgende Umfrage zu nehmen und freue mich bereits jetzt auf Ihre Rückmeldungen.

Besten Dank und viele Grüße,

Johannes Glück

FRAGEBOGEN

Themenübersicht und Vorgehen

Im Rahmen der geführten Interviews wurden 5 Themenbereiche im Kontext „vernetzter Ladedienste für Elektrofahrzeuge“ diskutiert:

- Allgemeine Herausforderungen bei der Dezentralisierung des deutschen Energieversorgungssystems,
- Kollaborationsbedarfe zwischen beteiligten Stakeholdern,
- Use-Cases für vernetzte Ladedienste für Elektrofahrzeuge sowie deren Priorisierung,
- Möglichkeiten zur strategischen Positionierung der beteiligten Stakeholder und
- Kritische Erfolgsfaktoren für einen erfolgreichen Launch vernetzter Ladedienste

Die Ergebnisse werden je Themengebiet im Folgenden kurz dargestellt. Zugehörige Fragen folgen jeweils im direkten Anschluss.

Bitte geben Sie zunächst die Ihnen zugewiesene Teilnehmer-ID an. (Diese ist in Ihrer Einladungs-Mail enthalten)

[Teilnehmer-ID]

Allgemeine Herausforderungen bei der Dezentralisierung des deutschen
Energieversorgungssystems

In der Definition dezentraler Energieversorgungssysteme herrschte breiter Konsens unter den Befragten. Demnach zeichnen sich diese vor allem durch ihre Kleinteiligkeit, durch dezentrale Erzeugungs- und Verbrauchsstrukturen, durch einen hohen Vernetzungsgrad sowie durch den Bedarf zu lokalem sowie überregionalem Energieaustausch aus.

Im Hinblick auf künftige Herausforderungen bei fortschreitender Dezentralisierung konnten vier Kernaspekte identifiziert werden:

a. *Vernetzung von Erzeugern und Verbrauchern*

Der Ausbau geeigneter Kommunikationsinfrastruktur ist eine Grundvoraussetzung („Enabler“) in dezentralen Energieversorgungssystemen, welcher immer mehr voranschreitet (z.B. Smart-Meter Rollout). Handlungsbedarf besteht insbesondere im Hinblick auf Sicherheit (Ausfallsicherheit, stabile Kommunikationskanäle, IT-Security), um auch künftig einen robusten Betrieb des Energieversorgungssystems sicherstellen zu können. Anforderungsgerechte Industriestandards für Kommunikationsschnittstellen zur Datenerhebung, -rückführung, -aggregation und -validierung leisten einen entscheidenden Beitrag hierfür.

b. *Marktmechanismen*

Existierende Marktmechanismen sind stark mit Prämissen behaftet und schaffen in Teilen Fehlansätze für Investitionen in dezentrale Erzeuger- und Verbrauchsstrukturen. Zu viele Stellhebel beeinflussen derzeit deren technische und wirtschaftliche Sinnhaftigkeit. Künftige Marktmechanismen müssen in der Lage sein, den bisher trägen Strukturwandel von zentralen Großkraftwerken hin zu dezentralen Erzeugungsanlagen zu beschleunigen.

c. *Ausbau dezentraler Energieerzeugungsanlagen*

Regionale, saisonale und tageszeitabhängige Ungleichgewichte in der Erzeugung sind durch einen vermehrten Zubau neuer (erneuerbarer) Energieerzeugungsanlagen und Energiespeicher auszugleichen.

d. *Miteinbeziehen des Endverbrauchers*

Dezentrale Energieversorgungsstrukturen können sich nur durchsetzen, wenn dem Endkunden eine zentrale Rolle zuteilwird. Ihm ist ein einfaches und leicht verständliches „Produkt“ anzubieten, das ihm einen unmittelbaren finanziellen oder ideellen Mehrwert stiftet.

Stimmen Sie den o.g. Thesen zu künftigen Herausforderungen in dezentralen Energieversorgungssystemen zu?

	stimme voll und ganz zu	stimme eher zu	weder noch	stimme eher nicht zu	stimme gar nicht zu
These ‚a‘: Vernetzung von Erzeugern und Verbrauchern	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
These ‚b‘: Marktmechanismen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

These ,c': Ausbau dezentraler Energieerzeugungsanlagen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
These ,d': Miteinbeziehen des Endverbrauchers	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Vermissen Sie eine Ihrer Ansicht nach wichtige These oder haben Sie Anmerkungen zu o.g. Thesen?

[Freie Antwort]

Wer steht in der Verantwortung, verbindliche technische Standards für dezentrale Energieversorgungssysteme zu gestalten?

- Energieversorgungsunternehmen (EVU)
- Netzbetreiber
- Service-Provider (Energiemanagement-Dienstleister)
- Unabhängige Konsortien (z.B. aus politischer Motivation)
- Verbindliche technische Standards sind nur durch gemeinschaftliches Vorgehen aller Stakeholder zu erreichen
- Sonstiges: _____

Wer steht in der Verantwortung, zugehörige Marktmechanismen zu entwickeln und zu etablieren?

- Energieversorgungsunternehmen (EVU)
- Netzbetreiber
- Service-Provider (Energiemanagement-Dienstleister)
- Unabhängige Konsortien (z.B. aus politischer Motivation)
- Verbindliche technische Standards sind nur durch gemeinschaftliches Vorgehen aller Stakeholder zu erreichen
- Sonstiges: _____

Kollaborationsbedarfe zwischen beteiligten Stakeholdern

Aus zuvor genannten Herausforderungen resultieren Kollaborationsbedarfe:

a. Definition von Standards

Für ein erfolgreiches Etablieren von Standards existieren zwei Ansätze. Erstens: Mehrere oder alle Stakeholder verständigen sich gemeinschaftlich auf einen einzuhaltenden Standard. Zweitens: Der stärkste Marktplayer gibt einen Industriestandard vor. Im Rahmen der Interviews wurde Letzterer als der wahrscheinlichste identifiziert, da sich bislang keine vielversprechenden Zusammenarbeitsmodelle abzeichnen.

b. Forschungsprojekte

Derzeit existieren zahlreiche Forschungsprojekte über alle Ebenen dezentraler Energieversorgungssysteme hinweg. Bislang fehlen jedoch großskalige Untersuchungen. Gründe hierfür sind die fehlende Finanzmittelausstattung von Start-Up Unternehmen und Service Providern sowie die fehlende Investitionsbereitschaft privatwirtschaftlicher Investoren.

Inwiefern stimmen Sie folgenden Aussagen zu?

	stimme voll und ganz zu	stimme eher zu	weder noch	stimme eher nicht zu	stimme gar nicht zu
Mein Erfolg oder der Erfolg meines Unternehmens/meiner Organisation hängt von einem erfolgreichen Strukturwandel des Energieversorgungssystems und von den Ergebnissen o.g. Kooperationen ab.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich bin dazu bereit, bei der Erarbeitung von Industriestandards einen INHALTLICHEN Beitrag zu leisten.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich bin dazu bereit, bei der Erarbeitung von Industriestandards einen FINANZIELLEN Beitrag zu leisten.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich möchte einen INHALTLICHEN Beitrag in Stakeholder übergreifenden Forschungsprojekten leisten.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich möchte einen FINANZIELLEN Beitrag in Stakeholder übergreifenden Forschungsprojekten leisten.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Use-Cases für vernetzte Ladedienste für Elektrofahrzeuge sowie deren Priorisierung

Elektrofahrzeuge können mit Hilfe ihres Lastverschiebungspotenzials einen Beitrag in dezentralen Energieversorgungssystemen leisten. Hierfür konnten fünf vielversprechende Anwendungsfälle identifiziert werden (Reihenfolge entspricht der Nennungshäufigkeit (absteigend)):

1. Eigenverbrauchsoptimierung und lokales Energiemanagement

Verbreiteter Kundenwunsch ist eine kostengünstige, teilautarke sowie hochverfügbare Energieversorgung. Diese Attribute sind für ihn leicht nachvollziehbar und spenden einen unmittelbaren Nutzen. Intelligent eingebundene Elektrofahrzeuge können dabei helfen:

- Dynamische Stromtarife auszunutzen,

- den Eigenverbrauch aus dezentralen Energieerzeugungsanlagen zu optimieren (z.B. private PV-Anlagen) oder
- den Autarkiegrad der eigenen Stromversorgung durch intelligentes Energiemanagement zu erhöhen (z.B. durch Miteinbeziehen von Wärmepumpen, PV und Batteriespeichern)

2. *Entlastung des Verteilnetzes*

Als mobile Batteriespeicher können Elektrofahrzeuge in Verteilnetzsträngen die Versorgungszuverlässigkeit, die Spannungsqualität sowie die Stabilität der Netzfrequenz sicherstellen. Das Potenzial dieses Use-Cases ist dabei stark vom individuellen Netzstrang abhängig und davon, wie zuverlässig die Elektrofahrzeuge im Netzstrang zur Verfügung stehen. Zudem konkurriert der Use-Case mit zahlreichen alternativen Technologien und hat daher nur im Einzelfall ein nennenswertes technisches oder betriebswirtschaftliches Potenzial.

3. *Regelleistungsbereitstellung*

Schon heute sind insbesondere Primärregelleistungsprodukte mit Hilfe kleinerer Schwärme von Elektrofahrzeugen gewinnbringend vermarktbar. Die Elektromobilität ist dabei in der Lage, bestehende Nischen in der Regelleistungsbereitstellung zu füllen (Kleinteiligkeit, Kostenstruktur). Es herrscht dennoch eine große Unsicherheit darüber, wie sich Marktmechanismen am Regelleistungsmarkt künftig verändern werden. Gewinnmargen, Präqualifikationskosten und technischer Aufwand hängen stark davon ab.

4. *Peak Shaving*

Peak Shaving kann vor allem in Verteilnetzsträngen und dedizierten Netzanschlusspunkten angeboten werden. Durch gezieltes Laden oder Entladen des Fahrzeugspeichers können Spitzen im Leistungsbedarf des Anschlusspunktes verringert und Netzausbau vermieden werden. Ebenso wie bei Punkt (2) „Entlastung des Verteilnetzes“ ist auch hier eine hohe Verfügbarkeit der Elektrofahrzeugflotte zu gewährleisten.

5. *Spotmarkt-Handel*

Als Momentaufnahme ist derzeit das Angebot des Lastverschiebungspotenzials von Elektrofahrzeugen am Spotmarkt vielversprechender als beispielsweise das Angebot von Minutenreserve. Zudem ist eine Präqualifikation hierfür nicht erforderlich. Trotz geringer Gewinnmargen können Restflexibilitäten aus den o.g. Anwendungsfällen hierfür genutzt werden.

Wie bewerten Sie das technische Potenzial der genannten Use-Cases? (Prämisse: Derzeitige technische Rahmenbedingungen und Marktsituation)

	<i>sehr hohes Potenzial</i>	<i>hohes Potenzial</i>	<i>durchschnittl. Potenzial</i>	<i>geringes Potenzial</i>	<i>sehr geringes Potenzial</i>
Eigenverbrauchsoptimierung und lokales Energiemanagement	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Entlastung des Verteilnetzes	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Regelleistungsbereitstellung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Peak Shaving	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Spotmarkt-Handel	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Wie bewerten Sie das betriebswirtschaftliche Potenzial der genannten Use-Cases? (Prämisse: Derzeitige technische Rahmenbedingungen und Marktsituation)

	<i>sehr hohes Potenzial</i>	<i>hohes Potenzial</i>	<i>durchschnittl. Potenzial</i>	<i>geringes Potenzial</i>	<i>sehr geringes Potenzial</i>
Eigenverbrauchsoptimierung und lokales Energiemanagement	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Entlastung des Verteilnetzes	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Regelleistungsbereitstellung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Peak Shaving	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Spotmarkt-Handel	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Wie bewerten Sie das technische Potenzial der genannten Use-Cases? (Prämisse: Ideale technische Rahmenbedingungen, großer Marktanteil von Elektrofahrzeugen und dem jeweiligen Use-Case angepasste Marktmechanismen)

	<i>sehr hohes Potenzial</i>	<i>hohes Potenzial</i>	<i>durchschnittl. Potenzial</i>	<i>geringes Potenzial</i>	<i>sehr geringes Potenzial</i>
Eigenverbrauchsoptimierung und lokales Energiemanagement	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Entlastung des Verteilnetzes	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Regelleistungsbereitstellung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Peak Shaving	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Spotmarkt-Handel	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Wie bewerten Sie das betriebswirtschaftliche Potenzial der genannten Use-Cases? (Prämisse: Ideale technische Rahmenbedingungen, großer Marktanteil von Elektrofahrzeugen und dem jeweiligen Use-Case angepasste Marktmechanismen)

	<i>sehr hohes Potenzial</i>	<i>hohes Potenzial</i>	<i>durchschnittl. Potenzial</i>	<i>geringes Potenzial</i>	<i>sehr geringes Potenzial</i>
Eigenverbrauchsoptimierung und lokales Energiemanagement	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Entlastung des Verteilnetzes	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Regelleistungsbereitstellung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Peak Shaving	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Spotmarkt-Handel	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

„Vernetzte Ladedienste“: Möglichkeiten zur strategischen Positionierung der beteiligten Stakeholder

Im Rahmen der Interviews konnten zahlreiche Interessenskonflikte bzgl. der künftigen Positionierung beteiligter Stakeholder identifiziert werden. Insbesondere die Aufgabenteilung zwischen Energieversorgungsunternehmen, Netzbetreibern und Service Providern ist zunächst durch eine Konkurrenzsituation geprägt.

Konsens herrschte aber bei im Folgenden genannten „Schlüsselrollen“. Sie sind nun dahingehend zu bewerten, ob der jeweilige Stakeholder eine führende Rolle innerhalb der genannten Kompetenzfelder/Schlüsselrollen einnehmen sollte.

Automobilhersteller (OEMs) müssen eine führende Rolle innerhalb der im Folgenden genannten Kompetenzfelder/Schlüsselrollen einnehmen:

	<i>stimme voll und ganz zu</i>	<i>stimme eher zu</i>	<i>weder noch</i>	<i>stimme eher nicht zu</i>	<i>stimme gar nicht zu</i>
Verantwortung für die Kundenfunktion „(uneingeschränkte) Mobilität des Elektrofahrzeuges“ (Fahrzeugverfügbarkeit und technische Verantwortung)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Verantwortung für die Kundenfunktion „Vernetzte Ladedienste“	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Verantwortung für die Versorgungssicherheit des Netzanschlusses des Kunden	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Vertragsbeziehung zum Kunden für „Vernetzte Ladedienste“ (Explizites Kundenangebot eines „Vernetzten Ladedienstes“)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technische Befähigung von Elektrofahrzeugen, Ladeinfrastruktur und Kommunikationsinfrastruktur	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Energiemanagementkompetenz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IT-Infrastruktur und Aggregation von Fahrzeugflotten	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Vermarktung von vernetzten Ladediensten am Energiemarkt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Service-Provider (Energiemanagement-Dienstleister) müssen eine führende Rolle innerhalb der im Folgenden genannten Kompetenzfelder/Schlüsselrollen einnehmen:

	<i>stimme voll und ganz zu</i>	<i>stimme eher zu</i>	<i>weder noch</i>	<i>stimme eher nicht zu</i>	<i>stimme gar nicht zu</i>
Verantwortung für die Kundenfunktion „(uneingeschränkte) Mobilität des Elektrofahrzeuges“ (Fahrzeugverfügbarkeit und technische Verantwortung)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Verantwortung für die Kundenfunktion „Vernetzte Ladedienste“	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Verantwortung für die Versorgungssicherheit des Netzanschlusses des Kunden	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Vertragsbeziehung zum Kunden für „Vernetzte Ladedienste“ (Explizites Kundenangebot eines „Vernetzten Ladedienstes“)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technische Befähigung von Elektrofahrzeugen, Ladeinfrastruktur und Kommunikationsinfrastruktur	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Energiemanagementkompetenz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IT-Infrastruktur und Aggregation von Fahrzeugflotten	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Vermarktung von vernetzten Ladediensten am Energiemarkt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Verteilnetzbetreiber müssen eine führende Rolle innerhalb der im Folgenden genannten Kompetenzfelder/Schlüsselrollen einnehmen:

	<i>stimme voll und ganz zu</i>	<i>stimme eher zu</i>	<i>weder noch</i>	<i>stimme eher nicht zu</i>	<i>stimme gar nicht zu</i>
Verantwortung für die Kundenfunktion „(uneingeschränkte) Mobilität des Elektrofahrzeuges“ (Fahrzeugverfügbarkeit und technische Verantwortung)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Verantwortung für die Kundenfunktion „Vernetzte Ladedienste“	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Verantwortung für die Versorgungssicherheit des Netzanschlusses des Kunden	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Vertragsbeziehung zum Kunden für „Vernetzte Ladedienste“ (Explizites Kundenangebot eines „Vernetzten Ladedienstes“)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technische Befähigung von Elektrofahrzeugen, Ladeinfrastruktur und Kommunikationsinfrastruktur	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Energiemanagementkompetenz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IT-Infrastruktur und Aggregation von Fahrzeugflotten	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Vermarktung von vernetzten Ladediensten am Energiemarkt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Energieversorgungsunternehmen (Vertrieb) müssen eine führende Rolle innerhalb der im Folgenden genannten Kompetenzfelder/Schlüsselrollen einnehmen:

	<i>stimme voll und ganz zu</i>	<i>stimme eher zu</i>	<i>weder noch</i>	<i>stimme eher nicht zu</i>	<i>stimme gar nicht zu</i>
Verantwortung für die Kundenfunktion „(uneingeschränkte) Mobilität des Elektrofahrzeuges“ (Fahrzeugverfügbarkeit und technische Verantwortung)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Verantwortung für die Kundenfunktion „Vernetzte Ladedienste“	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Verantwortung für die Versorgungssicherheit des Netzanschlusses des Kunden	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Vertragsbeziehung zum Kunden für „Vernetzte Ladedienste“ (Explizites Kundenangebot eines „Vernetzten Ladedienstes“)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technische Befähigung von Elektrofahrzeugen, Ladeinfrastruktur und Kommunikationsinfrastruktur	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Energiemanagementkompetenz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IT-Infrastruktur und Aggregation von Fahrzeugflotten	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Vermarktung von vernetzten Ladediensten am Energiemarkt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Eine (zu gründende) neutrale Organisation bzw. ein Zusammenschluss der genannten Stakeholder sollte künftig eine führende Rolle innerhalb der im Folgenden genannten Kompetenzfelder/Schlüsselrollen einnehmen:

	<i>stimme voll und ganz zu</i>	<i>stimme eher zu</i>	<i>weder noch</i>	<i>stimme eher nicht zu</i>	<i>stimme gar nicht zu</i>
Verantwortung für die Kundenfunktion „(uneingeschränkte) Mobilität des Elektrofahrzeuges“ (Fahrzeugverfügbarkeit und technische Verantwortung)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Verantwortung für die Kundenfunktion „Vernetzte Ladedienste“	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Verantwortung für die Versorgungssicherheit des Netzanschlusses des Kunden	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Vertragsbeziehung zum Kunden für „Vernetzte Ladedienste“ (Explizites Kundenangebot eines „Vernetzten Ladedienstes“)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Technische Befähigung von Elektrofahrzeugen, Ladeinfrastruktur und Kommunikationsinfrastruktur	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Energiemanagementkompetenz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IT-Infrastruktur und Aggregation von Fahrzeugflotten	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Vermarktung von vernetzten Ladediensten am Energiemarkt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Kritische Erfolgsfaktoren für einen erfolgreichen Launch vernetzter Ladedienste

Folgende Faktoren sind für den Erfolg vernetzter Ladedienste zwingend erforderlich:

	<i>stimme voll und ganz zu</i>	<i>stimme eher zu</i>	<i>weder noch</i>	<i>stimme eher nicht zu</i>	<i>stimme gar nicht zu</i>
Robuste Batterietechnologie und Leistungselektronik; ausreichend hohe Fahrzeuglebensdauer	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Etablierung geeigneter Industriestandards (Kommunikationsschnittstellen und Ladestandards)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Kundenakzeptanz; Bereitschaft des Kunden, das eigene Mobilitätsverhalten anzupassen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Flexibilität und Lastverschiebungspotenzial der Fahrzeugflotte maximieren; höhere Ladeleistungen; bidirektionales Laden	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Veränderungsbereitschaft etablierter Unternehmen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Hohe Zuverlässigkeit der technischen Systeme	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Schnellerer Markthochlauf der Elektromobilität; ausreichende Flottengröße	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anpassung von Marktstrukturen und politischen Rahmenbedingungen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Vollumfängliche Vernetzung (u.a. EV, Ladeinfrastruktur, Smart Meter, etc.)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Konkurrenzfähigkeit zu technischen Alternativen (z.B. Pumpspeicherkraftwerke, stationäre Batteriespeicherkraftwerke)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>