



Intelligente Netzanbindung von Elektrofahrzeugen zur Erbringung von Systemdienstleistungen – INEES



Förderkennzeichen: FKZ 16EM1015 (Volkswagen AG)
FKZ 16EM1016 (Fraunhofer IWES)
FKZ 16EM1017 (LichtBlick SE)
FKZ 16EM1018 (SMA Technology AG)

Laufzeit: 01.06.2012 bis 31.12.2015

**Gefördert durch das
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit**



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz,
Bau und Reaktorsicherheit

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit unter den Förderkennzeichen 16EM1015, 16EM1016, 16EM1017 und 16EM1018 gefördert. Die inhaltliche Verantwortung liegt bei den Autoren des Berichts.

Autorenliste

Fraunhofer IWES

Arnold, Gunter, Dr
Brandl, Ron
Degner, Thomas, Dr.
Gerhardt, Norman
Landau, Markus
Nestle, David, Dr.
Portula, Marco
Scheidler, Alexander, Dr.
Schwinn, Rainer

LichtBlick SE

Baumbusch, Katharina
Dörschlag, Arne
Eberhardt, Tim
Wacker, Vivien
Wesemann, Arne

SMA Solar Technology AG

Führer, Oliver, Dr.
Leifert, Torsten, Dr.

Volkswagen AG

Bäuml, Georg, Dr.
Bärwaldt, Gunnar, Dr.
Haupt, Hannes
Kammerlocher, Mathias
Nannen, Henning

Inhalt

1	Kurzfassung	5
2	Einführung.....	8
2.1	Zielstellung des Projektes	8
2.2	Einordnung des Projekts INEES in den förderpolitischen Rahmen	9
3	Voraussetzungen und Struktur des Projektes.....	11
3.1	Stand der Technik zu Projektbeginn.....	11
3.1.1	Erneuerbare Energien in Deutschland.....	11
3.1.2	Systemdienstleistungen in Deutschland	13
3.1.3	Netzintegration von Elektrofahrzeugen.....	14
3.1.4	Systemdienstleistungen durch Elektrofahrzeuge	14
3.2	Inhaltliche und zeitliche Planung	16
3.2.1	Struktur des Projektes	16
3.2.2	Zeitlicher Ablauf	19
3.2.3	Kooperationen.....	20
4	Technische Erprobung	21
4.1	Technisches Konzept des Gesamtsystems	21
4.1.1	Technische Anforderungen an das Gesamtkonzept	21
4.1.2	Gesamtkonzept zur Erbringung von Regelleistung aus Elektrofahrzeugen.....	23
4.2	Anforderungsanalyse Schutzprofil Gateway	25
4.2.1	Umsetzungskonzept für INEES	26
4.2.2	Erstellung Studie <i>Schutzprofil für EV-Ladeinfrastruktur</i>	27
4.3	Erprobung des Gesamtkonzeptes in einem Flottenversuch.....	27
4.3.1	Aufbau und Betrieb einer bidirektionalen Ladestation.....	27
4.3.2	Durchführung und Betrieb der Kundeninstallationen	31
4.3.3	Aufbau und Betrieb einer Flotte von bidirektionalen Elektrofahrzeugen.....	33
4.3.4	Aufbau und Betrieb SchwarmDirigent®	35
4.4	Erkenntnisse zur technischen Machbarkeit	38
4.4.1	Performance des Gesamtsystems.....	38
4.4.2	Auffälligkeiten und Optimierungsmöglichkeiten	42
4.4.3	Vorbereitung zur Präqualifikation des Gesamtkonzeptes	45
5	Nutzerakzeptanz	48
5.1	Konzepterstellung	48
5.1.1	Konzeptionierung einer Nutzerschnittstelle.....	48
5.1.2	Konzeptionierung eines Anreizsystems.....	49
5.2	Erprobung im Feldtest.....	52
5.2.1	Teilnehmerauswahl	52
5.2.2	Begleitbefragung und Anreizsystem im Flottenversuch	53
5.3	Erkenntnisse zur Nutzerakzeptanz	54
5.3.1	Ergebnisse der qualitativen Nutzerbefragung und Datenauswertung	54
5.3.2	Analyse und Optimierung des Prämiensystems	57
6	Ökonomische Bewertung	60
6.1	Voranalyse	60
6.1.1	Der Regelleistungsmarkt.....	60
6.1.2	Elektrofahrzeuge im SRL-Markt	62
6.2	Wirtschaftlichkeit	67
6.2.1	Erlöspotenzial	67
6.2.2	Kosten.....	70
6.2.3	Bewertung der Wirtschaftlichkeit	73
7	Ergebnisse der Begleitforschung.....	75

7.1	Analyse der Vereinbarkeit des Verteilungsnetzbetriebs mit der Erbringung von Regelleistung aus Elektrofahrzeugen.....	75
7.1.1	Belastungsanalyse Verteilungsnetz.....	75
7.1.2	Belastungsanalyse im Flottenversuch	77
7.1.3	Belastungsanalyse im kleinen Flottenversuch (Labor).....	78
7.2	Volkswirtschaftlicher Nutzen der Erbringung von Regelleistung aus Elektrofahrzeugen.....	79
7.3	Erforschung des Alterungsverhaltens der Batterie.....	85
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	94
8.1	Realisierbarkeit des Konzeptes im Energiesystem der Zukunft	94
8.2	Netzintegration von Elektrofahrzeugen im Energiesystem der Zukunft.....	97
8.3	Empfehlungen zur technischen Überarbeitung der Komponenten.....	98
8.4	Handlungsempfehlungen zur Entwicklung der regulatorischen Rahmenbedingungen.....	99
8.4.1	Regulatorischer Rahmen.....	99
8.4.2	Hindernisse und Handlungsempfehlungen	100
9	Veröffentlichungen	102
	Abkürzungsverzeichnis.....	103

1 Kurzfassung

Das Konzept der Bundesregierung Deutschland für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung definiert hohe Ziele für den Ausbau erneuerbarer Energieträger. Daher erlebt insbesondere die elektrische Energieversorgung aktuell einen fundamentalen Wandel. Immer mehr dezentrale, flexible Einheiten erzeugen Strom und sind dabei von fluktuierenden Faktoren wie der Sonneneinstrahlung oder dem Windaufkommen abhängig. Dadurch entstehen neben den bisherigen, durch schwankenden Stromverbrauch bedingten Fluktuationen zusätzliche kurzfristige Schwankungen im Stromnetz, die zur Erhaltung einer stabilen Netzführung ausgeglichen werden müssen. Wegen des Wegfalls konventioneller Kraftwerke, die bisher diesen Ausgleich vorgenommen haben, müssen hier neue Lösungen gefunden werden.

Gleichzeitig gewinnen im Verkehrssektor elektrisch angetriebene Fahrzeuge zunehmend an Bedeutung. Dabei stellt sich die Frage, wie diese Fahrzeuge möglichst vorteilhaft mit dem Stromnetz verbunden werden können.

Im Forschungsprojekt INEES wurde gezeigt, dass es technisch möglich ist, kurzfristige Schwankungen der Frequenz im Stromnetz, die zu einem Abruf von Sekundärregelleistung führen, mit einem Pool von rückspeisefähigen Elektrofahrzeugen auszugleichen. Dazu wurde ein Konzept zur Bereitstellung von Sekundärregelleistung erstellt, mit einem deutschen Übertragungsnetzbetreiber diskutiert und in einem einjährigen Flottenversuch demonstriert. Für diesen wurden von der SMA Solar Technology AG eine als Experimentiersystem konzipierte, bidirektionale DC-Ladestation entwickelt und eine Kleinserie von 40 Geräten aufgebaut. Weiterhin wurden von der Volkswagen AG 20 e-ups mit einer bidirektionalen Ladefunktion ausgestattet und eine Kommunikationsanbindung zwischen Ladesteuerung und Volkswagen-Backend implementiert. Des Weiteren wurde eine Mobiltelefon-App als Nutzerschnittstelle entwickelt. Als Schnittstelle zwischen Elektrofahrzeugen und Energiemärkten wurde von der LichtBlick SE der SchwarmDirigent[®] um die Integration der Fahrzeuge erweitert.

Die Teilnehmer am Flottenversuch haben ihre Fahrzeugbatterie mit großer Begeisterung für die Unterstützung des Stromnetzes freigegeben und dabei grundsätzlich keine Einschränkungen in ihrer alltäglichen Mobilität erlebt. Technische Probleme in der Kommunikation der Forschungskomponenten in Fahrzeug und Ladestation haben teilweise zu erheblichen Ladeproblemen geführt, lieferten aber wichtige Erkenntnisse für zukünftige Standardisierungs- und Normierungsbedarfe sowie wertvolle Erfahrungen für eine etwaige spätere Serienproduktentwicklung.

Die Integration der Fahrzeuge in den SchwarmDirigent[®] der LichtBlick SE zeigt, dass Elektrofahrzeuge mit hoher Sicherheit und kurzer Reaktionszeit eine Leistungsreserve für das Stromnetz bereitstellen können. Damit wurde im Projekt nachgewiesen, dass die Erbringung von Regelleistung mit einem Elektrofahrzeugpool technisch möglich ist. Allerdings lassen die Projektergebnisse ebenfalls erkennen, dass ein hoher Energieumsatz, der den durch die Mobilität verursachten jährlichen Energieumsatz um ein Vielfaches übersteigt, aus technischen und wirtschaftlichen Gründen zu vermeiden ist. Denn dieser führt zu einer hohen zusätzlichen Alterung der Fahrzeugbatterien, zusätzlichen Umwandlungsverlusten und Umlagekosten auf den für die Zwischenspeicherung bezogenen Strom. Damit eignet sich ein Elektrofahrzeugpool mehr für die Vermarktung seines Leistungs- als seines Arbeitsvermögens.

Die energiewirtschaftliche Analyse zeigt, dass unter den aktuellen Rahmenbedingungen über die Erlöse am Markt für Regelleistung die laufenden Kosten des Betriebs derzeit nicht gedeckt werden können.

Dabei wurden folgende Rahmenbedingungen als hinderlich identifiziert, die derzeit auch im Zusammenhang mit der allgemeinen Einbindung von dezentralen Stromerzeugungseinheiten kontrovers diskutiert werden:

- die Kosten für Abrechnung und Messwesen für leistungsgemessene Anschlüsse
- die regulatorischen Rahmenbedingungen der Sekundärregelleistung (verpflichtende Leistungsvorhaltung für eine Woche, Nachweisführung)
- die technischen Anschlussbedingungen an das Niederspannungsnetz (60 Sekunden Netzüberwachung vor Zuschaltung einer bidirektionalen Ladestation)
- die in voller Höhe zu bezahlenden Umlagekosten auf den für die Zwischenspeicherung bezogenen Strom und die damit einhergehende Benachteiligung gegenüber anderen Speichertechnologien

Änderungen an diesen Rahmenbedingungen können dazu beitragen, die laufenden Kosten zu senken und das Potenzial der Fahrzeuge besser einzusetzen. Dennoch ist nicht zu erwarten, dass allein durch diese Änderungen eine vollständige Kostendeckung erreicht werden kann. Nötig wären vielmehr höhere Erlöse an den entsprechenden Märkten. Die Entwicklung während der INEES-Projektlaufzeit ging jedoch in die entgegengesetzte Richtung: Die Preisstruktur an den Märkten für Regelleistung hat sich signifikant geändert; der Wert der Leistungsvorhaltung und damit die mit einem Pool von Elektrofahrzeugen erzielbaren Erlöse sind stark gesunken.

Sollte sich im Zuge der Energiewende ein höherer Bedarf zur Leistungsvorhaltung ergeben und sich die Preisstruktur dementsprechend entwickeln, stellen Elektrofahrzeuge eine mögliche Option als kurzfristige Leistungsreserve bei niedrigem Energiedurchsatz dar.

Die Analysen der Verteilungsnetzbelastung des Fraunhofer IWES zur koordinierten Bereitstellung von Regelleistung aus Elektrofahrzeugen ergaben, dass auf kurzfristige Sicht nur selten mit Engpässen zu rechnen ist und somit eine solche Option zur koordinierten Bereitstellung von Regelleistung aus Elektrofahrzeugen darstellbar ist. Einzig schon heute stark belastete Netze können durch einen weiteren Ausbau von EE-Einspeisung oder die gleichzeitige Bereitstellung von Regelleistung aus vielen Elektrofahrzeugen an ihre Kapazitätsgrenzen stoßen. Mittelfristig können vor allem in ländlichen Netzen mit einem hohen Anteil an EE-Einspeisung Netzverstärkungsmaßnahmen notwendig werden. Durch das Nichtanbieten der vollen Poolleistung in den betroffenen Netzen zu den zeitlich sehr begrenzten EE-Einspeisungsspitzen ließen sich die durch die rückspeisenden Elektrofahrzeuge provozierten Netzengpässe fast vollständig vermeiden. Langfristig kann ein sehr hoher Anteil an Elektrofahrzeugen auch im Fall der Erbringung negativer Regelleistung großflächig Netzverstärkungen notwendig machen. Hier können zukünftige Smart-Grid-Technologien (z. B. leistungsflussabhängige Sollspannungsregler, RONT („regelbarer Ortsnetztransformator“)) die Aufnahmefähigkeit der Netze generell erhöhen und dadurch die Netzausbaukosten reduzieren.

Generell sollte der Einsatz von Fahrzeugen zur Erbringung von Regelleistung die Entwicklungen anderer Funktionen, wie z. B. die Einbindung in ein Heimenergiemanagement zur Eigenverbrauchsoptimierung von Haushalten und Liegenschaften mit eigener Stromerzeugung (Photovoltaik (PV), Blockheizkraftwerke (BHKW)), berücksichtigen und kompatibel dazu dargestellt werden, um flexibel auf geänderte Marktbedingungen reagieren zu können.

Untersuchungen zum volkswirtschaftlichen Nutzen zeigten in Zukunft einen hohen Marktanteil von Elektrofahrzeugen am SRL-Markt (SRL = Sekundärregelleistung), der durch die hohe Effizienz dieses Systems bedingt ist. Dennoch erscheint eine komplette Deckung der Poolbetriebskosten schwierig. Grundsätzlich ist der Nutzen auch im Hinblick auf bestehende Unsicherheiten

zur generellen Entwicklung des Speicherbedarfs und des Marktdesigns zu bewerten, wobei Elektrofahrzeuge grundsätzlich Kostenvorteile gegenüber stationären Speichern aufweisen. So sind zusätzliche Einsparungen in Form von vermiedenen Kraftwerksneubauten, Stromspeichern, Demand-Side-Management und anderen sonst notwendigen Flexibilitätsoptionen möglich, welche jedoch schwer zu quantifizieren sind. Auch Energieverluste, welche durch Rückspeisung der bereitgestellten Regelleistung entstehen würden, sind bei Elektrofahrzeugen deutlich geringer, da sie die durch Regelleistung eingespeicherte Energie durch den Fahrbetrieb, soweit möglich, auch wieder verbrauchen, weswegen sie den stationären Batteriespeichern in diesem Aspekt überlegen sind.

2 Einführung

2.1 Zielstellung des Projektes

Sowohl der Energiesektor als auch die Mobilität befinden sich momentan in einem historischen Umbruch: Mit der Energiewende beschreitet Deutschland noch konsequenter den Weg hin zu einer erneuerbaren Stromversorgung. In der Mobilität nimmt die Elektromobilität Fahrt auf. Beide Entwicklungen stoßen auf über viele Jahrzehnte gewachsene Strukturen: Die Energieversorgung geschieht nicht mehr aus genau regelbaren, zentralen Großkraftwerken, sondern erfolgt verstärkt durch dezentrale, fluktuierende Erzeugungsanlagen wie Photovoltaik oder Windkraft. Beim Elektrofahrzeug steht nicht wie bei normalen Kraftfahrzeugen die Optimierung des Verbrennungsprozesses an zentraler Stelle, sondern neue Themen wie die Speicherkapazität der Batterie. Seine Energie erhält das Fahrzeug nicht mehr innerhalb weniger Minuten beim eigens eingelegten Stopp an der Tankstelle, sondern über längere Zeiten an der heimischen Steckdose oder an öffentlichen Ladesäulen.

Beide Entwicklungen müssen zusammen gedacht werden: Das lokal emissionsfreie Elektroauto wird erst dann zum vollständig umweltfreundlichen Fahrzeug, wenn der Strom aus erneuerbaren Energien stammt. Die Energiewende zielt genau in diese Richtung. Gleichzeitig bedeutet ein Ausbau von erneuerbaren Energien, dass das Energiesystem immer besser mit Schwankungen in der Erzeugung umgehen muss, sei es durch eine entsprechende Regelung des Verbrauchs oder den Einsatz von Speichern, welche Über- und Unterversorgung ausgleichen können. Elektrofahrzeuge haben mit ihren Batterien genau solche Speicher an Bord. Diese sind in erster Linie für die Mobilität gedacht, doch stellt sich natürlich die Frage, ob sie in den Standzeiten der Fahrzeuge auch ohne Einschränkung der Fahrer im Dienste des Stromnetzes eingesetzt und vermarktet werden können. Die Erlöse, welche sich über einen Einsatz der Fahrzeugbatterien für netzstützende Systemdienstleistungen erzielen lassen, können wiederum helfen, Elektromobilität kostengünstiger zu machen.

Das Stromnetz benötigt den Ausgleich von Schwankungen auf unterschiedlichen Zeitskalen: Vom saisonalen Ausgleich zwischen Sommer und Winter bis hin zum Bereich von Sekunden für die Stabilisierung bei kurzfristigen Prognoseabweichungen. Die technischen Eigenschaften von Fahrzeugbatterien – hohe Leistung im Verhältnis zum Energieinhalt, schnelle Reaktion, Alterung bei Energiedurchsatz – legen nahe, gerade den letztgenannten, kurzfristigen Ausgleich genauer zu untersuchen, der in Form von Regelleistung erbracht wird. Denn dieser erfordert schnelle Reaktion bei hoher Leistung und vergleichsweise geringen Energieflüssen. Und konventionelle Regelkraftwerke stehen hierfür wegen des Wegfalls der auf fossilen Brennstoffen beruhenden Kraftwerkstechnik in Zukunft nicht mehr in gleicher Weise wie heute zur Verfügung.

Ziel des Projektes INEES war es daher, erstmalig die Möglichkeiten zu erforschen, aus einem Pool von Elektrofahrzeugen Regelleistung zu erbringen, genauer gesagt: Sekundärregelleistung, also der Ausgleich von Schwankungen im Bereich von 30 Sekunden bis 15 Minuten.

Dabei standen drei große Themenkomplexe im Zentrum.

Zum einen sollte die technische Machbarkeit demonstriert werden. Dazu wurde ein Experimentiersystem bestehend aus Elektrofahrzeug und Ladesäule mit bidirektionaler Netzanbindung sowie einer IT-Infrastruktur aufgebaut. Dieses System sollte technisch in der Lage sein, Regelleistung aus einem Fahrzeugpool entsprechend den Anforderungen des Stromnetzes zu erbringen. Wesentliche Themen waren hierbei, die Reaktionsgeschwindigkeit, zuverlässige Leistungsbereitstellung und ein angepasstes Abrechnungsverfahren zu erproben sowie den erforder-

derlichen gerätetechnischen Aufwand und seine Kosten durch eine experimentelle, funktionsfähige Realisierung zu ermitteln.

Des Weiteren sollte untersucht werden, wie sich der Einsatz eines Elektrofahrzeugs im Strommarkt aus Sicht des Nutzers optimal gestalten lässt und sich energiewirtschaftliche Nutzung und Mobilitätsalltag ohne Einschränkung für den Nutzer verbinden lassen. Denn auch bei 23 Stunden durchschnittlicher Standzeit am Tag ist klar: Mobilität hat Vorrang. Die energiewirtschaftliche Nutzung kann nur im vom Nutzer freigegebenen Umfang erfolgen. Kernfragen waren daher: Wie kann die Bedienschnittstelle für den Nutzer möglichst einfach gestaltet werden? Welcher Anreiz kann gegeben werden, um die Freigabe von Batteriekapazität für die energiewirtschaftliche Nutzung möglichst attraktiv zu gestalten?

Und schließlich sollte die Wirtschaftlichkeit des Ansatzes bewertet werden: Welche Erlöse lassen sich unter Berücksichtigung der technischen Rahmenbedingungen sowie der Nutzereinstellungen am SRL-Markt erzielen? Welche Kosten entstehen für Technik und Betrieb eines solchen Systems? Welche Entwicklungen sind absehbar?

Untersuchungen zur langfristigen Perspektive aus Netzsicht rundeten das Projekt ab. Die Erfahrungen des Projekts bilden die Grundlage für Handlungsempfehlungen sowohl in Richtung der Regulierung als auch der technischen Weiterentwicklung, insbesondere im Hinblick auf Normierungsbestrebungen von Schnittstellen.

2.2 Einordnung des Projekts INEES in den förderpolitischen Rahmen

Laut dem Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung sollen bis 2020 1 Mio. Elektrofahrzeuge auf deutschen Straßen fahren.¹ Deutschland soll des Weiteren zum Leitmarkt für Elektromobilität entwickelt werden, um langfristig eine Führungsrolle der deutschen Automobilhersteller in diesem Bereich sicherzustellen. Für eine umfassende Klimaschutzwirkung von Elektrofahrzeugen ist es notwendig, dass diese mit Strom aus erneuerbaren Energien betrieben werden. Die dekarbonisierte Stromherstellung bietet somit zudem mittel- bis langfristig auch im Verkehrssektor eine entscheidende Option, mit Elektrofahrzeugen CO₂-Emissionen sowie die Abhängigkeit von Ölimporten weiter zu reduzieren. Mit einer intelligenten Integration von Elektrofahrzeugen in die Strommärkte wird der Aufwand für den Ausbau von Netzen und Speichern im Zuge des beschleunigten Ausbaus erneuerbarer Energien reduziert. Dies stellt einen wesentlichen energiewirtschaftlichen Nutzen dar. Durch die dadurch mögliche Entlastung bei Netzentgelten können Ressourcen und Kapazitäten an anderer Stelle eingesetzt werden. Aus volkswirtschaftlicher Sicht ist es somit unbedingt geboten, die originär für Mobilitätszwecke aufgebaute, aber im Durchschnitt nur teilweise genutzte Speicherkapazität für den steigenden Bedarf im Stromsektor zu nutzen und somit das bereitgestellte Kapital möglichst effizient einzusetzen.

Für eine Durchdringung des Marktes mit Elektrofahrzeugen ist die Wirtschaftlichkeit der Elektromobilität für potenzielle Nutzer von entscheidender Bedeutung. Kann durch zusätzliche Wertbeiträge aus dem Strommarkt eine zusätzliche Refinanzierungsmöglichkeit für die Fahrzeuge geschaffen werden, relativieren sich die vergleichsweise hohen Anschaffungskosten zum Teil und steigern somit die Attraktivität dieser neuen Technologie.

¹ Laut Kraftfahrtbundesamt sind in Deutschland derzeit 130.365 Hybrid- und 25.502 Elektrofahrzeuge zugelassen (Stand 01.01.2016).

In der Förderbekanntmachung vom 19.08.2011 des Bundesministeriums für Umwelt, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) im Programm „Erneuerbar mobil“ wird unter 2.2 die Kopplung der Elektromobilität an erneuerbare Energien und deren Netzintegration als förderwürdiger Forschungsbereich hervorgehoben. Das Projekt INEES greift hieraus insbesondere folgende Aspekte der Förderbekanntmachung auf:

- Entwicklung und Erprobung von Verfahren zum gesteuerten Laden und zur Rückspeisung elektrischer Energie in das Stromnetz
- Entwicklung von Geschäftsmodellen unter Einbeziehung von ökologischen Aspekten wie gesteuertem Laden und Bereitstellung von Energiedienstleistungen
- Analyse der Netzauswirkungen der Verfahren zum gesteuerten und kontaktlosen Laden und Untersuchung der Kundenakzeptanz

Die Erprobung erfolgte dabei im Projekt INEES im Rahmen eines Flottenversuchs und trug damit neben der Erforschung der Technik unter Alltagsbedingungen sowie der Untersuchung der Nutzerakzeptanz auch dazu bei, Elektromobilität sichtbar und erlebbar zu machen. Damit trägt es zusätzlich zu den Zielen des Schaufensters Elektromobilität Berlin-Brandenburg bei.

3 Voraussetzungen und Struktur des Projektes

3.1 Stand der Technik zu Projektbeginn

3.1.1 Erneuerbare Energien in Deutschland

Der Ausbau der erneuerbaren Energien ist ein zentrales Anliegen der Bundesregierung zur Erreichung der nationalen und internationalen Klimaschutzziele. Mit der Energiewende hat sich Deutschland für den Umbau des Energiesystems entschieden. In den Bereichen Strom, Wärme und Kraftstoffe sollen die erneuerbaren Energien zukünftig einen zentralen Beitrag leisten.

Abbildung 1 zeigt die Entwicklung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien von 1990 bis 2015 aufgeschlüsselt nach Energieträger. Sehr gut zu sehen ist, dass der Beitrag der Windenergie an der Stromerzeugung seit dem Jahr 2000 ständig zugenommen hat. Die Photovoltaik ist in der Entwicklung verzögert, es ist aber seit etwa 2008 ein sehr großes Wachstum festzustellen. Ende 2015 beträgt die installierte Leistung von Photovoltaikanlagen 39,7GW, die installierte Leistung von Windenergieanlagen an Land 41,7 GW und Offshore 3,3 GW.

Aufgrund der schwankenden Leistung in der solaren Einstrahlung und der schwankenden Windgeschwindigkeit schwankt auch die Stromerzeugung aus Windenergie und Photovoltaik stark. Bei gleicher Stromerzeugung wird daher das zukünftige Energieversorgungssystem, welches wesentlich auf erneuerbaren Energien beruht, deutlich größere installierte Erzeugungleistungen haben als bisher.

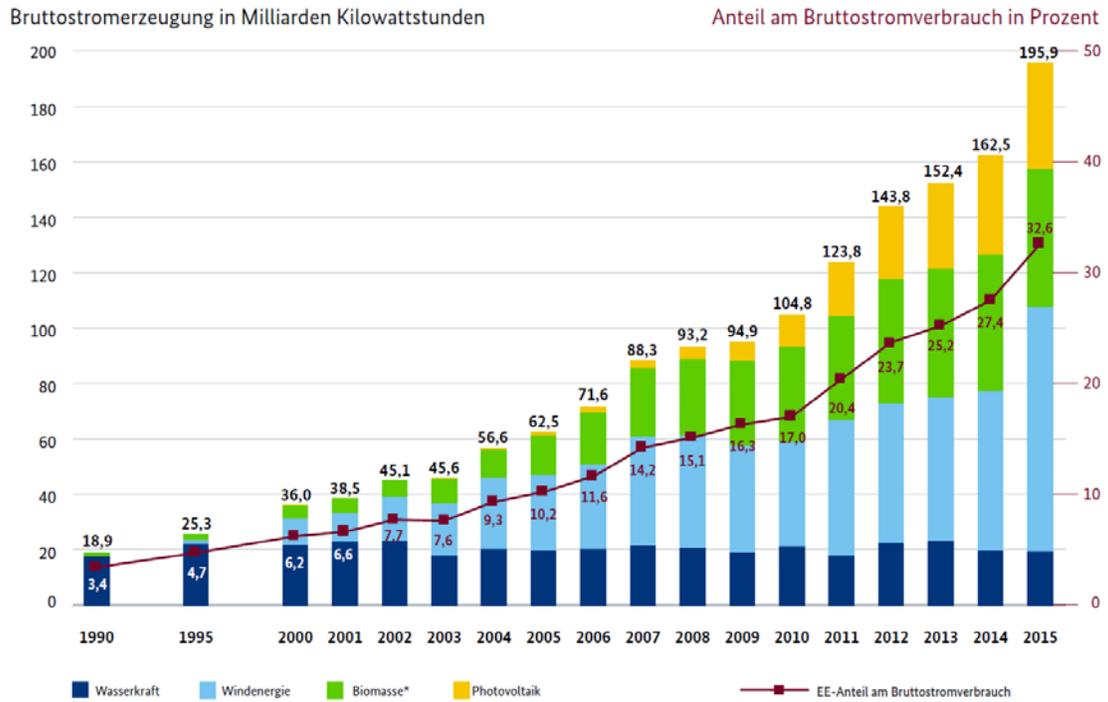
Aktuell deckten die erneuerbaren Energien im Jahr 2015 32,6 Prozent des Bruttostromverbrauchs in Deutschland und sind damit bereits jetzt der wichtigste Energieträger in diesem Sektor.²

Mit der Novelle des EEG, die zum 01. August 2014 in Kraft getreten ist, sind verbindliche Ausbaupfade für verschiedene erneuerbare Energien vereinbart.³ Für die Photovoltaik ist ein jährlicher Bruttozubau von 2.500 MW und für die Windenergie (an Land) ein Nettozubau von ebenfalls 2.500 MW vorgesehen. Die Offshore-Windenergie soll auf 6.500 MW bis zum Jahr 2020 und auf 15.000 MW bis zum Jahr 2030 ausgebaut werden. Für Biomasse wird ein jährlicher Zubau von 100 MW angestrebt.

Die Ziele der Bundesregierung sind ein Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch von 40 - 45 Prozent im Jahr 2025, von 55 - 60 Prozent im Jahr 2035 sowie von mindestens 80 Prozent im Jahr 2050.² Der Ausbau der erneuerbaren Energien soll eng mit dem Ausbau der Stromnetze verknüpft werden. Neben dem Ausbau der Netze werden vermehrt flexible Kraftwerke und Speicher notwendig sein, um die Schwankungen in der Erzeugung von erneuerbaren Energien zu kompensieren.

² Erneuerbare Energien in Deutschland – Daten zur Entwicklung im Jahr 2015, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Stand Februar 2016

³ Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien, Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG 2014



Geothermische Stromerzeugung aufgrund geringer Strommengen nicht separat dargestellt.
*inkl. feste und flüssige Biomasse, Biogas, Biomethan, Klär- und Deponiegas und dem biogenen Anteil des Abfalls, ab 2013 inkl. Klärschlamm

Abbildung 1: Entwicklung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland von 1990 bis 2015 (Quelle: Abbildung 1 aus [2])

3.1.2 Systemdienstleistungen in Deutschland

Nach dem Energiewirtschaftsgesetz (im Folgenden EnWG) sind Netzbetreiber zu einem Betrieb ihrer Versorgungsnetze verpflichtet, der eine sichere, preisgünstige und umweltfreundliche Versorgung mit Elektrizität im Interesse der Allgemeinheit gewährleistet. Zusätzlich zur Übertragung und Verteilung elektrischer Energie gehört es dabei zu ihren Aufgaben, folgende Systemdienstleistungen zur Sicherung der Qualität der Stromversorgung zu erbringen:

- Frequenzhaltung
- Spannungshaltung
- Betriebsführung
- Versorgungswiederaufbau nach Störungen

Die den Netzbetreibern entstehenden Kosten zur Erbringung der Systemdienstleistungen werden im Rahmen der Netznutzungsentgelte den Kunden in Rechnung gestellt.⁴ Die Systemdienstleistung *Frequenzhaltung* ist Aufgabe des Übertragungsnetzbetreibers (im Folgenden ÜNB) für seine jeweilige Regelzone, die übrigen Systemdienstleistungen sind sowohl Aufgabe der Betreiber von Übertragungsnetzen als auch der Verteilungsnetze.

Die Systemdienstleistung *Frequenzhaltung* steht im Fokus des Projektes INEES. Die Netzfrequenz kann je nach Gleichgewichtsstörung zwischen Erzeugung und Abnahme bezogen auf den Sollwert von 50 Hz sinken oder zunehmen. Im Falle eines Leistungsdefizites kommt es im Netz zu einer fallenden Frequenz, die mit positiver Regelleistung ausgeglichen wird. Bei einem Leistungsüberschuss muss Energie aus dem Netz genommen werden. Die Erbringung von negativer Regelleistung kann bspw. durch das Zurückfahren von Kraftwerken oder das Zuschalten von Lasten erfolgen. Elektrische Speicher können grundsätzlich sowohl für die Erbringung von positiver als auch negativer Regelleistung eingesetzt werden. Technisch wird die Regelleistung in die Märkte für Primär-, Sekundärregelleistung und Minutenreserve eingeteilt. Diese unterscheiden sich insbesondere in ihrer Aktivierungsgeschwindigkeit, der Abrufdauer und Abrufhäufigkeit.

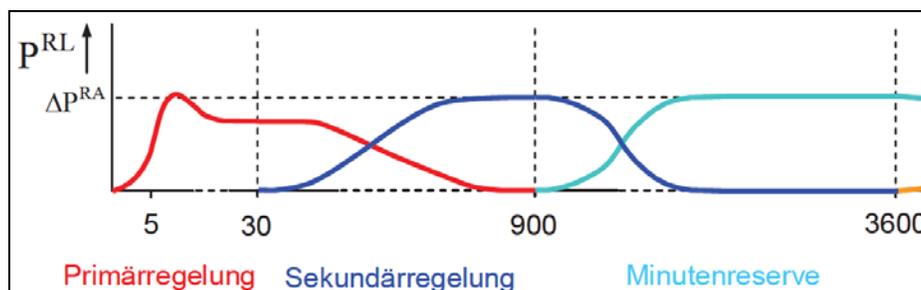


Abbildung 2: Zeitliche Abfolge eines Regelvorgangs und die beteiligten Regelleistungsarten

Bei einer Frequenzabweichung wird innerhalb weniger Sekunden zunächst automatisch die Primärregelung aktiviert, die eine Stabilisierung der Netzfrequenz bewirkt. Sie steht nach maximal 30 Sekunden vollständig für bis zu 15 Minuten zur Verfügung. Damit die Primärregelleistung möglichst schnell wieder verfügbar ist, wird sie von der Sekundärregelleistung abgelöst. Diese wird nach spätestens 30 Sekunden in der jeweils betroffenen Regelzone durch den ÜNB aktiviert und muss nach fünf Minuten vollständig verfügbar sein. Im Idealfall führt die Sekundärregelung die Netzfrequenz wieder auf ihren Sollwert zurück. Andernfalls wird für längere Frequenz-

⁴ Panos, K.: Praxisbuch Energiewirtschaft 2007

abweichungen die Sekundärregelung von der Minutenreserve unterstützt. Diese muss innerhalb von 15 Minuten nach der Aktivierung vollständig zur Verfügung stehen.

3.1.3 Netzintegration von Elektrofahrzeugen

Mit der Markteinführung von Elektrofahrzeugen beginnt die schrittweise Unabhängigkeit der Mobilität von fossilen Energieträgern. Aktuell erfolgt die Mehrheit der Ladevorgänge von Elektrofahrzeugen im privaten Bereich über eine AC-Ladeinfrastruktur. Verbreitet sind Ladeleistungen von 3,7 kW, abhängig von der Fahrzeugtechnologie sind auch Ladeleistungen von bis zu 22 kW möglich. Sofern dabei gewährleistet ist, dass die elektrische Energie für die Ladevorgänge der Elektrofahrzeuge aus erneuerbaren Quellen stammt, erfolgt die Mobilität ohne klimaschädliche Emissionen.

Hierzu sind idealerweise Zeitpunkt und Leistung des Ladevorgangs in geeigneter Weise am aktuellen Dargebot erneuerbarer Energien zu orientieren. Zu diesem Zweck bedarf es einer kommunikativen Verbindung zwischen Elektrofahrzeug und dem System, das die Informationen für die Optimierung des Ladevorgangs bereitstellt. Mit dem Ziel einer Reduktion der Netzbelastung werden hierfür vorrangig Informationen über erneuerbare Energien in unmittelbarer geografischer Nähe des Fahrzeugs genutzt.

Neben der Optimierung der Ladevorgänge unter Berücksichtigung zumeist lokaler Energiequellen schließt eine vollständige Netzintegration von Elektrofahrzeugen zwei weitere Ansätze ein. Ein Ansatz fokussiert die Rückspeisung elektrischer Energie in das lokale und/oder öffentliche Stromnetz. Ein weiterer geht der Frage nach, ob Elektrofahrzeuge während der Standzeit auch in überregionale Systeme eingebunden und während dieser Zeit für die Erbringung von Systemdienstleistungen genutzt werden können. Beide Ansätze (Rückspeisung und Erbringung von SRL) sind in Kombination Gegenstand des Projektes INEES.

Es ist bislang noch nicht nachgewiesen worden, dass Elektrofahrzeuge im Grundsatz in der Lage sind, auf spontane Signale einer fahrzeugexternen Instanz mit einer unmittelbaren Veränderung der Ladeleistung zu reagieren. Dabei soll die Randbedingung eingehalten werden, dass der Mobilitätswunsch des Kunden durch die Veränderung der Ladeleistung und das zeitweise Entladen nicht beeinträchtigt wird.

Zu Beginn des Projektes INEES waren Elektrofahrzeuge in der Lage, das Ladeereignis auf vor-eingestellte Vorzugladezeiten zu verlagern. Ferner kann der Fahrzeugnutzer seinen Mobilitätswunsch durch Eingabe der nächsten geplanten Abfahrtszeit und gewünschten Reichweite vorgeben sowie das Laden aus der Ferne starten oder auch stoppen. Eine Einbeziehung fahrzeug-externer Information in eine Ladeplanoptimierung ist zu diesem Zeitpunkt nicht verfügbar.

Zur Reduktion der Komplexität und der isolierten Betrachtung dieses Aspektes der Netzintegration wird in INEES die Integration in das lokale Energiesystem des Kunden ausgeblendet und ausschließlich die Interaktion des Fahrzeugs mit einem externen Poolmanager untersucht.

3.1.4 Systemdienstleistungen durch Elektrofahrzeuge

Regelleistung kann durch einzelne größere Kraftwerke oder Verbraucher erbracht werden. Durch eine Poolbildung ist es darüber hinaus möglich, mit kleineren Einheiten im Zusammenschluss am Regelleistungsmarkt teilzunehmen. Elektrische Speicher, wie beispielsweise die Batterien von Elektrofahrzeugen, eignen sich insbesondere durch ihre schnelle und exakte Regelung für einen Einsatz am Regelleistungsmarkt. Gerade bei Elektrofahrzeugen besteht allerdings die Herausforderung in der begrenzten Arbeitsfähigkeit aufgrund der beschränkten Batte-

riekapazität und dem Hauptzweck von Fahrzeugen, der Mobilitätsnutzung. Die Bereitstellung von Systemdienstleistungen durch Elektrofahrzeuge erfordert eine Verbindung der Fahrzeuge zum Stromnetz. Dies ist nur möglich, wenn sich das Elektrofahrzeug an einem Standort befindet, an dem eine Ladestation vorhanden und diese für den Fahrzeugnutzer verfügbar ist.

Diese Voraussetzung wird erfüllt, wenn ein privater Fahrzeugnutzer über einen Stellplatz und eine eigene Ladestation an seinem Wohnort verfügt. Eine Auswertung der regelmäßig durchgeführten Studie *Mobilität in Deutschland* zeigt, dass 30 Prozent der privat genutzten Fahrzeuge an einem Werktag für 24 Stunden durchgehend am Wohnort des Nutzers stehen. Abbildung 3 zeigt die typische Fahrzeugnutzung in Deutschland anhand einer Auswertung dieser Studie.

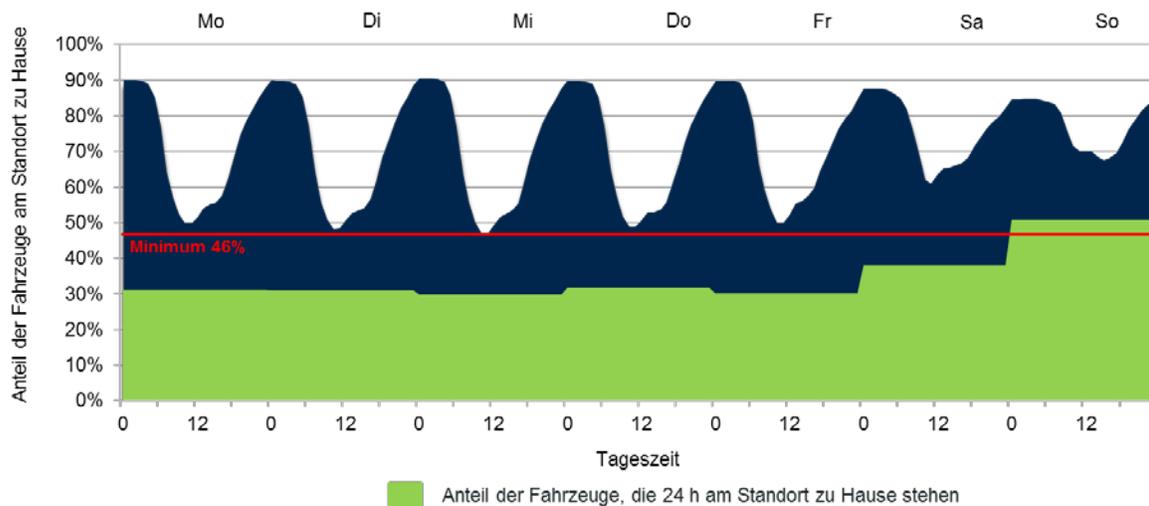


Abbildung 3: Typische Fahrzeugnutzung in Deutschland (Studie Mobilität in Deutschland, eigene Auswertung)

Fahrzeuge, die nicht 24 Stunden am Wohnort des Nutzers stehen, werden zu einem Großteil für den Pendelverkehr zum Arbeitsort eingesetzt. Sie stehen nachts ebenfalls am Wohnort und sind für die Bereitstellung von Systemdienstleistungen verfügbar. Insgesamt könnten zum Zeitpunkt der minimalen Verfügbarkeit bis zu 46 Prozent aller Fahrzeuge für die Erbringung von Systemdienstleistungen zur Verfügung stehen. Eine Bereitstellung von Ladestationen beim Arbeitgeber kann die Verfügbarkeit der Fahrzeuge im Pendelverkehr stark erhöhen.

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor auf das Potenzial zur Bereitstellung von Systemdienstleistungen ist das Steckverhalten der Nutzer. Da die tägliche Wegstrecke unter der maximalen Reichweite der Fahrzeuge liegt, sind eine tägliche Ladung und damit ein Anstecken an die Ladestation nicht notwendig. Ob der zusätzliche Aufwand für das häufige Anstecken ein zusätzliches Hindernis für die Fahrzeugnutzer darstellt, wurde im Rahmen des Projektes INEES untersucht (siehe Kapitel 5.3).

3.2 Inhaltliche und zeitliche Planung

3.2.1 Struktur des Projektes

Das Projekt umfasste ein breites Spektrum an Arbeiten. Der Schwerpunkt lag dabei auf dem Aufbau eines Systems zur Erbringung von Sekundärregelleistung durch einen Pool von Elektrofahrzeugen, dessen Erprobung im Rahmen eines einjährigen Flottenversuchs, der Auswertung und Analyse der daraus erhobenen Daten sowie darauf basierender weiterführender Simulationen. Daneben fanden begleitende Analysen statt zu möglichen Engpasssituationen im Verteilungsnetz, dem Alterungsverhalten von Batterien mit Belastungsprofilen aus dem energiewirtschaftlichen Einsatz sowie zum volkswirtschaftlichen Nutzen einer Verwendung von Elektrofahrzeugen für Regelleistung. In einer abschließenden Synthese wurden Abschätzungen zur Wirtschaftlichkeit getroffen sowie Handlungsempfehlungen für eine Änderung des regulatorischen Rahmens abgeleitet.

Die Projektstruktur ist in Abbildung 4 dargestellt. Die Arbeitspakete (AP) 1 und 2 umfassten im Wesentlichen Arbeiten zur Entwicklung und zum Aufbau eines prototypischen Systems zur Erbringung von Regelleistung aus einem Pool von Elektrofahrzeugen. Eine besondere Herausforderung dieses Projektes lag in der Komplexität des Gesamtsystems und insbesondere auch im Zusammenwirken von Partnern aus unterschiedlichen Bereichen. Das Projekt erforderte eine enge Verzahnung von Energiewirtschaft (LichtBlick), Energietechnik (SMA Solar Technology), Automobilindustrie (Volkswagen) und Energiesystemforschung (Fraunhofer IWES). Unterschiedliche Denkweisen und Systeme mussten gegenseitig erläutert und verstanden werden, um schließlich ein neues, ganzheitlich effizientes, intelligentes System erarbeiten zu können. Die Konzeptionierung erfolgte unter Beteiligung aller Partner im AP1. Im AP2 wurden die Teilsysteme weiter spezifiziert und schließlich von den Partnern entwickelt und erprobt. Dabei spielte auch die gemeinsame Erprobung für die Tests der Schnittstellen eine bedeutende Rolle.

Im AP3 waren die vorbereitenden Arbeiten für die Interaktion mit den Teilnehmern/Kunden zusammengefasst. Diese bestanden aus der Entwicklung eines Anreizsystems sowie der Analyse von Anforderungen aus Nutzersicht für eine Bedienschnittstelle. Das AP4 beinhaltete die Arbeiten zur Vorbereitung und Durchführung des Flottenversuchs sowie der Analyse der erhobenen Daten.

Begleitende Forschungsumfänge wurden im AP5 strukturiert. Hierzu zählen insbesondere die Analysen zu möglichen Engpasssituationen im Verteilungsnetz sowie die Rechnungen zum volkswirtschaftlichen Nutzen. Die Untersuchungen zum Alterungsverhalten der Batterie wurden im technischen AP2 eingegliedert.

Sowohl die technische Umsetzung als auch die Wirtschaftlichkeit werden in erheblichem Umfang von den regulatorischen Rahmenbedingungen beeinflusst. Die Analyse des aktuellen Status und die Beobachtung neuer Entwicklungen sowie die Bewertung im Hinblick auf den Projektfokus, Regelleistung aus Elektrofahrzeugen zu erbringen, fanden im AP6 statt.

Das AP7 schließlich sammelte alle Tätigkeiten zur Projektadministration zusammen. Entsprechend des hohen Grades an Vernetzung zwischen den Beiträgen der beteiligten Partner und des interdisziplinären Charakters des Projektes wurden viele der Arbeitspakete von mehreren Partnern gemeinsam bearbeitet. Die Beiträge lassen sich unabhängig von der Projektstruktur grundsätzlich wie folgt den Partnern zuordnen:

Fraunhofer IWES

- Erarbeitung eines Konzeptes zum Datenschutz (Profilsicherheit) für die Netzkopplung von Elektrofahrzeugen
- Entwicklung von Testverfahren und Prüfaufbauten von Ladestationen
- Analyse von Systemdienstleistungen durch Elektrofahrzeuge für Übertragungs- und Verteilungsnetze
- volkswirtschaftlicher Nutzen der Erbringung von Regelleistung aus Elektrofahrzeugen
- messtechnische Begleitung sowie Evaluierung des Flottenversuchs in Bezug auf die Integration in die Verteilungsnetze
- Einbringung der Projektergebnisse in die Normenarbeit und Standardisierung

LichtBlick SE

- Erforschung und Entwicklung der IT-Systeme zur Bereitstellung von Systemdienstleistungen für das Poolmanagement
- Erforschung eines Anreizsystems für die Nutzer
- Auswahl und Betreuung der Feldtestteilnehmer und Kundeninstallationen
- Fahrstromversorgung
- intelligente zentrale Steuerung der Lade- und Entladevorgänge der Poolbatterie (bestehend aus Fahrzeugbatterien)
- energiewirtschaftliche Optimierung und Einbindung in die Strom- und Systemdienstleistungsmärkte während des Feldtests
- Untersuchung zur Präqualifikation des Gesamtsystems zur Teilnahme am Regelleistungsmarkt
- Auswertung und Analyse der Ergebnisse aus dem Flottenversuch, Ableitung von Handlungsempfehlungen und Regulierungsbedarf aus Sicht eines Energieversorgers

SMA Solar Technology AG

- Entwicklung und Erprobung einer als Experimentiersystem konzipierten dreiphasigen bidirektionalen 10-kW-DC-Ladestation (Wallbox) für den nicht öffentlichen Einsatz im Haushalts- und Gewerbebereich
- Aufbau und Betreuung der Ladestationen für den Flottenversuch
- Gewinnung von Erkenntnissen zu Anforderungsprofilen und Perspektiven für solche privaten Ladestationen im Haushalts- und Gebäudebereich und bei der gepoolten Regelleistungserbringung

Volkswagen AG

- Erforschung und Entwicklung der Komponenten im Fahrzeug für das bidirektionale Laden und der IKT-Infrastruktur für den Informationsaustausch mit externen Partnern
- Erforschung intelligenter Verfahren zur optimierten Reiseplanung
- Untersuchung der Nutzerakzeptanz
- Aufbau und Betreuung der Fahrzeugflotte mit 20 e-up!
- Auswertung und Analyse der Ergebnisse aus dem Flottenversuch, Ableitung von Handlungsempfehlungen aus Sicht eines Automobilherstellers

Projektstrukturplan INEES

1 Analyse und Spezifikation	2 Erforschung und Darstellung	3 Nutzeranforderungen und Anreizsystem	4 Flottenversuch	5 Begleitforschung	6 Begleitende Arbeiten	7 Projektadministration
1.1 Konzept	2.1 Erforschung und Versuchsaufbau IT-Systeme	3.1 Nutzerbefragung	4.1 Vorbereitung Flottenversuch	5.1 Simulation SDL im Energiesystem der Zukunft	6.1 Analyse und Ableitung von Regulierungsbedarf	7.1 Projektkommunikation
1.2 Spezifikation	2.2 Erforschung und Versuchsaufbau Schnittstellen und Komponenten	3.2 Analyse und Konzeptionierung Anreizsystem	4.2 Installation und Inbetriebnahme Systeme	5.2 Flottenversuch im Labor		7.2 Projektberichte
1.3 Analyse und Simulation Poolersatz	2.3 Erforschung und prototypischer Aufbau Technik Ladestation	3.3 Optimierung Anreizsystem	4.3 Aufbau Hardware	5.3 Volkswirtschaftlicher Nutzen durch SDL		7.3 Projektkoordination
1.4 Spezifikation Geschäftsprozesse	2.4 Erprobung Teilsysteme		4.4 Inbetriebnahme und Test Gesamtsystem			
1.5 Rahmenbedingungen Feldtest	2.5 Integrationstest		4.5 Basisbetrieb			
1.6 Datenschutzkonzept	2.6 Präqualifikation technische Einheit		4.6 Fehleranalyse und Optimierung			
	2.7 Erforschung Alterungsverhalten Batterie		4.7 Erforschung und Analyse System bei versch. Betriebsbedingungen			
			4.8 Energiewirtschaftlicher Betrieb Feldtest			
			4.9 Messung und Abrechnung Feldtest			
			4.10 Kundenakzeptanz und Nutzerverhalten			
			4.11 Evaluation, Auswertung Feldtest			
			4.12 Realisierbarkeit Konzept in Energiesystem der Zukunft			
			4.13 Präqualifikation Gesamtsystem			

Abbildung 4: Projektstrukturplan des INEES-Projekts

3.2.2 Zeitlicher Ablauf

Das ursprünglich auf 36 Monate angelegte Projekt wurde während der Laufzeit um sieben Monate verlängert. Der Projektzeitraum erstreckte sich damit vom 01.06.2012 bis zum 31.12.2015. Grundsätzlich lässt sich das Projekt in drei Phasen gliedern: Konzeptionierung und Entwicklung der Systeme, Erprobung in einem einjährigen Feldversuch und abschließende Auswertung und Synthese. Parallel dazu liefen begleitende Arbeiten wie Engpassanalysen, Alterungsuntersuchungen oder die Bewertung rechtlicher Rahmenbedingungen. Der detaillierte Zeitplan ist in Abbildung 5 dargestellt.

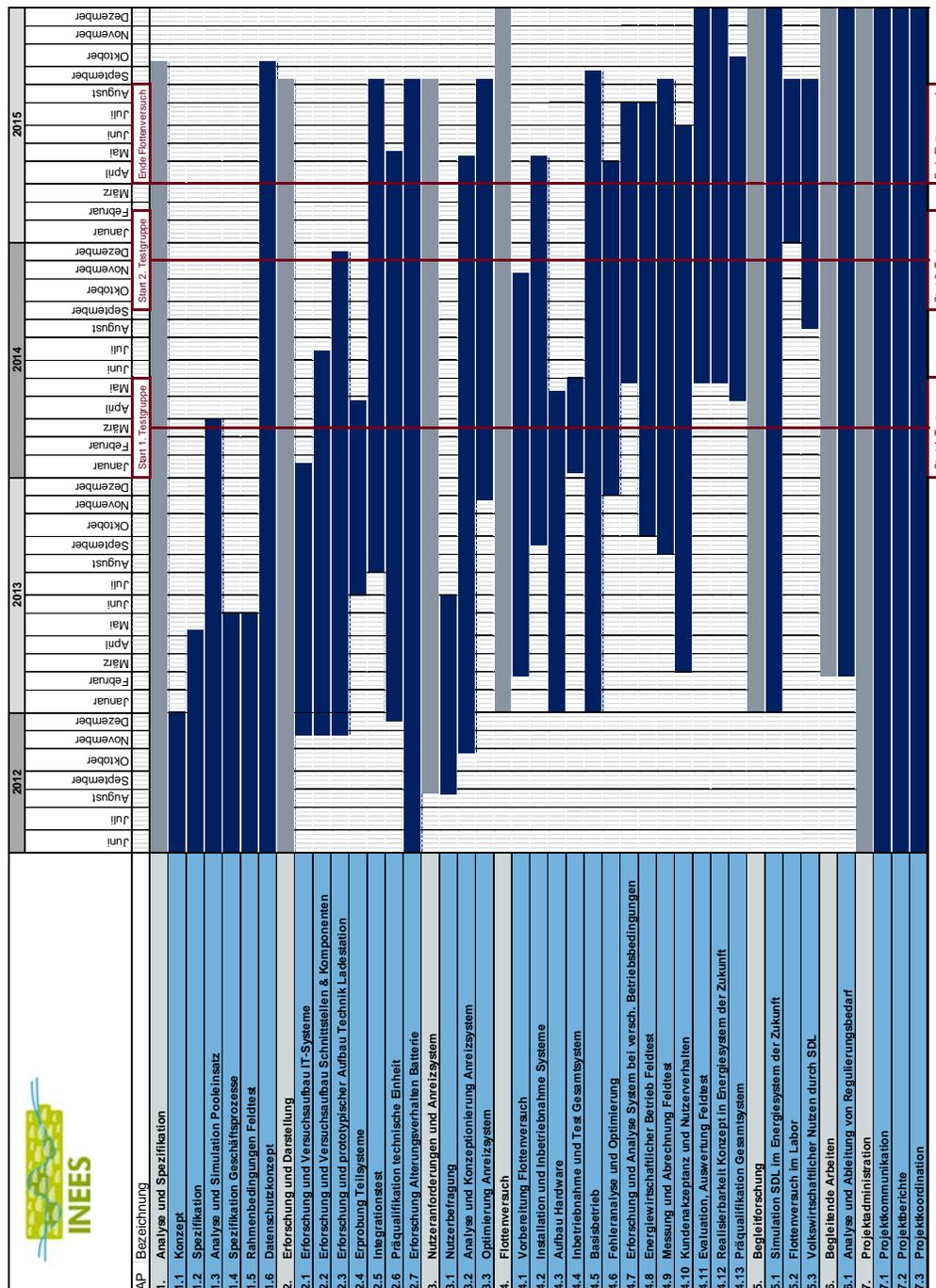


Abbildung 5: Terminplan des INEES-Projekts

3.2.3 Kooperationen

Die Installation rückspeisefähiger Ladestationen stellt Neuland dar. Für den Feldversuch in Berlin konnte in enger Kooperation mit dem Verteilungsnetzbetreiber Stromnetz Berlin GmbH eine pragmatische Lösung entwickelt und umgesetzt werden.

Für die Diskussion der generellen Entwicklungen im regulatorischen Umfeld stand dem Konsortium die Bundesnetzagentur für ein Treffen bereit.

Das Konsortium bedankt sich bei den Partnern für die offene und konstruktive Zusammenarbeit. Sie haben in erheblichem Maß Anteil an der erfolgreichen Durchführung des Projekts.

4 Technische Erprobung

Im Projekt wurde zunächst ein technisches Gesamtkonzept zur Erbringung von Regelleistung mit einem Elektrofahrzeugpool entwickelt. Dieses umfasste die Komponenten Fahrzeug, Ladestation sowie die notwendigen IT-Systeme (Abschnitt 4.1). Anschließend erfolgte die Erprobung in einem einjährigen Feldtest (Abschnitt 4.3). Die Erkenntnisse der technischen Erprobung sind in Abschnitt 4.4 dargestellt.

4.1 Technisches Konzept des Gesamtsystems

4.1.1 Technische Anforderungen an das Gesamtkonzept

Bei der Umsetzung des Gesamtsystems sind die technischen Anforderungen verschiedener Akteure zu beachten, die beispielsweise in Form von Normen, Vorschriften oder Ansprüchen definiert werden. Zunächst sind die Anforderungen der Betreiber des Gesamtsystems zu nennen. Diese haben ein Interesse an einem möglichst flexiblen wirtschaftlichen Betrieb. Dies führt zu konkreten technischen Anforderungen wie die bidirektionale Anbindung der Fahrzeuge mit möglichst großer Ladeleistung und möglichst großen Batteriespeichern. Der wirtschaftliche Betrieb kann durch die Nutzung vorhandener IT-Infrastruktur erreicht werden, im Falle der Fahrzeuge beispielsweise durch Nutzung der vorhandenen Kommunikationsanbindung der Fahrzeuge an die OEM-Serverlandschaft. Technische Anforderungen lassen sich auch von den Kunden ableiten. So fordern diese ein sicheres, komfortabel zu bedienendes System. Eingaben und Informationen müssen verständlich sein, die Mobilitätswünsche müssen durch das System erfüllt werden.

Für die Teilnahme am Regelleistungsmarkt sowie die energiewirtschaftliche Abwicklung wurden von den Übertragungs- und Verteilungsnetzbetreibern technische Vorschriften und Normen definiert. Die ÜNB haben zur Aufgabe, die Bereitstellung und den Einsatz von Regelleistung in einem wettbewerblichen Markt zu organisieren. Für eine Teilnahme an diesem Markt wurden technische und organisatorische Anforderungen definiert. Diese sind dem Transmission Code 2007 (Netz- und Systemregeln der deutschen ÜNB) sowie begleitenden Dokumenten wie beispielsweise speziellen IT-Anforderungsbeschreibungen zu entnehmen. Darin wird festgeschrieben, dass Anbieter von Regelleistung vor der Marktteilnahme ein Präqualifikationsverfahren zu durchlaufen haben, in welchem die Einhaltung der gestellten Anforderungen überprüft wird. Anforderungen werden an die regelleistungserbringende technische Einheit, die leittechnische Anbindung dieser sowie an das zentrale Steuerungssystem gestellt. In Tabelle 1 sind auszugsweise einige wichtige Anforderungen aufgelistet, die im Rahmen der Präqualifikation überprüft werden.

Tabelle 1: Auszug wichtiger technischer Anforderungen an Komponenten und Systeme, die seitens der ÜNB während der Präqualifikation überprüft werden

Anforderung	Komponente	Beispiel
Reaktionszeit auf sprungförmige Sollwertänderung	technische Einheit	Für den ÜNB muss nach kurzer Zeit (30 Sekunden) eine messbare Reaktion auf ein gefordertes Regelleistungssignal erfolgen. Nach 5 Minuten muss die vorgehaltene Regelleistung vollständig erbracht werden.
Reproduzierbares Regelverhalten	Steuerungssystem	Die Reaktion auf den Abruf von Regelleistung soll einem zuvor festgelegten Verhalten (bspw. Leistungsgradient) folgen.
Systemverfügbarkeit	Steuerungssystem/ technische Einheit	Regelleistung ist wichtig zur Erhaltung der Netzstabilität. Daher gelten hohe Anforderungen an die Verfügbarkeit der einzelnen Komponenten sowie an das Gesamtsystem.
Sicherheit	Steuerungssystem/ technische Einheit	Das Gesamtsystem muss gegenüber einem unerlaubten Zugriff Dritter geschützt werden.

Technische Anforderungen zum Netzanschluss der Elektrofahrzeuge/Ladestationen sowie zur energiewirtschaftlichen Abwicklung werden vom örtlichen Verteilungsnetzbetreiber (VNB) bzw. den entsprechenden allgemeinen Standards und Normen sowie gesetzlichen und regulatorischen Bestimmungen definiert. Im Projekt wurde für die Ladestationen jeweils ein neuer Netzanschlusspunkt gesetzt, hier sind die Anforderungen der Niederspannungsanschlussverordnung zu beachten. Energiewirtschaftlich wurde der Netzanschlusspunkt mittels registrierender Lastgangmessung abgewickelt, auch hier sind die technischen Anforderungen zur Einrichtung und zum Betrieb der Messstelle zu beachten.

Die aktuellen Anforderungen an die Ladestation ergeben sich durch Betrachtung ihrer Funktionen sowie ihrer vier wichtigsten Schnittstellen:

- 1.) Anwender
- 2.) Fahrzeug
- 3.) AC-Stromnetz
- 4.) SMA-Datenportal



Declaration of Conformity
with German, European and International (Non-European) standards used for
Electrical Vehicle Charging station

German Standard DIN EN		European Standard EN		International Standard IEC (IEC/CISPR)
DIN EN 61851-21-2:2013-01	based on	EN 61851-21-2:2012	based on	IEC: 61851-21-2:2012
DIN EN 61851-23:2012-06	based on	EN 61851-23:2011	based on	IEC: 61851-23:2011
DIN EN 61581-1:2013-04	based on	EN 61851-1:2012	based on	IEC: 61851-1:2012
DIN EN 61000-3-2:2010-03	based on	EN 61000-3-2:2006 + A1:2009 + A2:2009	based on	IEC: 61000-3-2:2005 + A1:2008 + A2:2009
DIN EN 50178:1998-04	based on	EN 50178:1997	based on	IEC: 62103:2003
DIN EN 62477-1:2013-04	based on	EN 62477-1:2012	based on	IEC: 62477-1:2012
DIN EN 62311:2008	based on	EN 62311:2008	based on	IEC EN 62311:2008
	based on	EN 301 489-1 V1.9.2	based on	
	based on	EN 301 489-17 V2.2.1	based on	
		EN 300 328 V1.7.1		

Zur Ableitung der detaillierten Anforderungen wurden die zur Projektlaufzeit gültigen Normen oder Vornormen herangezogen. Dies sind insbesondere die Normen DIN für Ladestationen EN 61581 Teil 1, 21 und 23. Daraus abgeleitet wurden auch Qualifizierungstests für die Typ- und Stückprüfungen der Kleinserien.

Die Anforderungen an den Kommunikationsweg zwischen Fahrzeug, dem SECC (Supply Equipment Communication Controller) und der SWB (Sunny Wallbox) sind ebenfalls aus den Normen ableitbar und in Abbildung 6 dargestellt. Elektrische Energie wird über die beiden Anschlüsse DC+ und DC- übertragen. Zur Absicherung – z. B. gegen Lichtbögen oder Steckerziehen – sind die Signalleitungen Control Pilot (CP) und Proximity Pilot (PP) vorhanden. Die Kommunikation erfolgt über eine serielle Schnittstelle (UART).



Abbildung 6: Kommunikation zwischen Fahrzeug und Wallbox
(PWM: Puls-Weiten-Modulation, UART: Universal Asynchronous Receiver Transmitter)

Im AC-Stromnetz fungiert die Ladestation als Erzeugungseinheit vergleichbar einem Batterie-wechselrichter oder einem PV-Wechselrichter. Daher gelten zur Netzeinspeisung die Anforderungen nach der Anwendungsrichtlinie VDE AR-N 4105 sowie zur Netzüberwachung nach VDE0126-1-1.

4.1.2 Gesamtkonzept zur Erbringung von Regelleistung aus Elektrofahrzeugen

Im Projekt INEES wurde basierend auf dem aktuellen Stand der Technik im Jahr 2014 ein Gesamtsystem aufgebaut, das die technischen Anforderungen an die Erbringung von Regelleistung aus Elektrofahrzeugen aufgreift und soweit möglich erfüllt. Verbleibende Herausforderungen werden im Rahmen dieses Berichts adressiert.

Abbildung 7 illustriert das Gesamtkonzept anhand eines Schaubildes. Das Konzept umfasst die Einbindung von 20 Elektrofahrzeugen des Typs e-up! in ein System des Anbieters LichtBlick zur Erbringung von Sekundärregelleistung. Im Fall einer Regelleistungserbringung sendet der Übertragungsnetzbetreiber ein Abrufsignal an die LichtBlick-Leitstelle (SchwarmDirigent®). Diese überwacht kontinuierlich die Statusmeldungen des Elektrofahrzeugpools und führt eine Bewertung (Scoring) der Einzelfahrzeuge durch. Basierend darauf werden Fahrzeuge zur Erbringung des Regelleistungsabrufes ausgewählt und über Ladepläne angesprochen. Diese Ladepläne werden von LichtBlick über den Volkswagen-Backend-Server an die Fahrzeuge gesendet. Der Volkswagen-Backend-Server leitet die Ladepläne an die Fahrzeuge weiter, wo sie auf Plausibilität und Kompatibilität mit den Nutzerbedürfnissen geprüft und ausgeführt werden. Dazu werden die Fahrzeuge mit einer Lade- oder Entladeleistung von 10 kW über die SMA-Ladestation be- oder entladen.

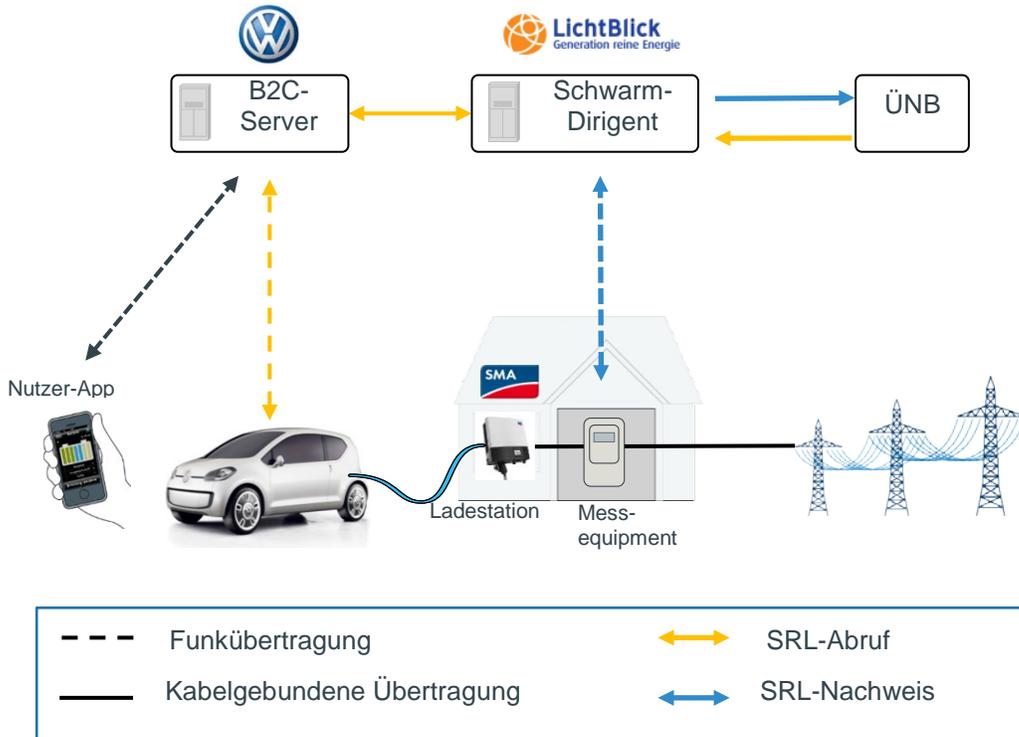


Abbildung 7: Das INEES-Gesamtkonzept

Ein wichtiger Faktor für Akzeptanz der INEES-Nutzer ist die Prüfung der Ladepläne auf Kompatibilität mit den eigenen Bedürfnissen. Die hierfür wichtigen Informationen stellt der Nutzer über eine Applikation auf einem Mobiltelefon oder direkt im Fahrzeug ein. Die Nutzereinstellungen werden ebenfalls mit dem Volkswagen-Backend-Server abgeglichen und synchronisiert.

Abbildung 8 zeigt die notwendigen Einstellungen und die daraus resultierende energiewirtschaftlich nutzbare Batteriekapazität.

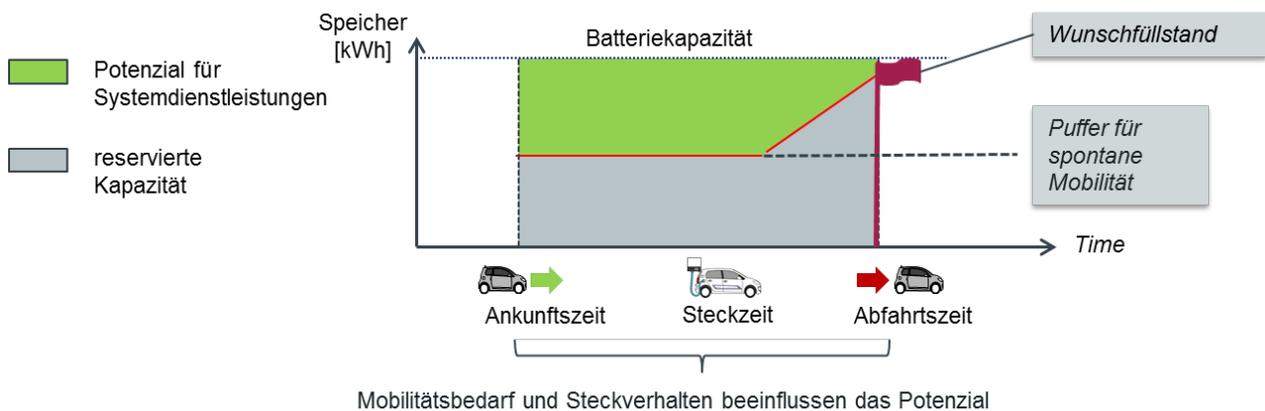


Abbildung 8: Nutzereinstellungen und Auswirkungen auf das energiewirtschaftliche Potenzial

Der INEES-Nutzer stellt einen Mindestfüllstand ein, der für seine spontanen Mobilitätsbedürfnisse reserviert wird. Nach dem Anstecken an eine INEES-Ladestation wird sofort auf diesen Mindestfüllstand geladen. Die über diesen Mindestfüllstand hinausgehende Kapazität wird für die

energiewirtschaftliche Nutzung freigegeben. Zusätzlich hat der Nutzer die Möglichkeit, einen Abfahrtszeitpunkt einzugeben und einen Wunschfüllstand zu diesem Zeitpunkt. Das Elektrofahrzeug lädt dann zu einem geeigneten Zeitpunkt auf diesen Füllstand und hält ihn auch für eine spätere Abfahrt reserviert. Sollte sich der INEES-Nutzer dazu entscheiden, nicht abzufahren, so kann er die Reservierung aktiv wieder aufheben. Diese Einstellungen werden über eine Nutzerschnittstelle vorgenommen, die in Kapitel 5.1.1 beschrieben wird.

4.2 Anforderungsanalyse Schutzprofil Gateway

Bestehende und die in Entwicklung befindlichen rechtlichen und technischen Normen zu Informationssicherheit und Datenschutz wurden auf ihre Anwendbarkeit auf das INEES-Szenario untersucht. Gegenstand der Beobachtung und Auswertung waren insbesondere

- die Schutzprofile für ein Smart Meter Gateway (SMGW) und dessen Sicherheitsmodul des BSI
- die technische Richtlinie *Smart Energy* des BSI (TR-03109)
- die Messsystemverordnung (MsysV)

Daneben wurden die relevanten Arbeiten innerhalb der Deutschen Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik (DKE) verfolgt und auf Relevanz für das Projektszenario geprüft. Im Gegensatz zu den oben genannten Grundlagen war die Arbeit in diesen Gremien nicht ausreichend weit fortgeschritten, um belastbare Konsequenzen für das Projektszenario ableiten zu können. Im Fokus standen

- die Arbeit des DKE-AK 716.0.1 *Normative Beschreibung eines Sicherheitskonzepts für das Smart Home* (bisher *Normative Beschreibung eines Sicherheitskonzepts für Energiemanagement im Gebäude*)
- die Arbeit des DKE-Gremiums STD_1911.11.5 *Informationssicherheit für Elektromobilität* (hervorgegangen aus der DKE-Workshopreihe *Elektromobilität – Informationssicherheit in der Ladeinfrastruktur*)

Nachdem mit der technischen Richtlinie *Smart Energy* (TR-03109) ein wesentliches Dokument Ende Dezember 2012 in einem ausgereiften Versionsstand vorlag, war die Grundlage für eine Analyse im Projektzusammenhang vorhanden. Für die Auswirkungen auf das Projekt war entscheidend, für welche Anwendungsfälle die Beachtung der TR-03109 durch eine Verordnung des BMWi verpflichtend vorgeschrieben wird. Mit dem Entwurf der Messsystemverordnung, die gemeinsam mit der TR-03109 im März bei der EU-Kommission zur Notifizierung eingereicht wurde, war erstmals eine Beurteilung möglich. Der Zwischenstand wurde im Rahmen von projektinternen Workshops im November 2012 und im März 2013 präsentiert. Obwohl die MsysV nach wie vor nicht in rechtlich verbindlicher Form verabschiedet ist, war dies der Stand, mit dem Beurteilungen und Unterstützungen für die Feldtestplanung erfolgten. Einen Überblick über die wichtigsten Ergebnisse der Analyse sind in einem öffentlichen Bericht (Abschnitt 4.2.2) zusammengestellt worden.

Zum DKE-Workshop *Elektromobilität – Informationssicherheit in der Ladeinfrastruktur* wurde aus dem Projekt ein Beitrag mit dem Titel *Nutzbarkeit eines richtlinien-konformen Smart Meter Gateways – Überlegungen im Rahmen des Projektes INEES* im Konsortium abgestimmt und beigeleitet.

4.2.1 Umsetzungskonzept für INEES

Auf Grundlage der vorab gemachten Analysen wurden Maßnahmen zur Informationssicherheit und zum Datenschutz skizziert. Sie enthalten konkrete Umsetzungsansätze, deren praktische Ausführung in der Spezifikation der Schnittstellen und Systeme beschrieben ist.

Anforderungen durch normative Randbedingungen

Insbesondere Verordnungen und technische Richtlinien aus dem Energiewirtschaftsrecht sind teilweise relevant: Für die Messung und die Fernübermittlung der Messwerte kann nach Maßgabe des untersuchten Entwurfs der Verordnung auf Basis der Kosten-Nutzen-Analyse der Einsatz eines SMGW verpflichtend werden. Es gelten dann die Anforderungen aus der TR-03109 und den Schutzprofilen für ein Smart Meter Gateway und dessen Sicherheitsmodul. Diese Verpflichtungen können nach dem untersuchten Entwurf der Messsystemverordnung nicht vor Ablauf einer Übergangsfrist eintreten. Die Übergangsfrist für rein auf die Elektromobile begrenzte Sachverhalte sollte danach 2020 enden.

Die zu erwartenden Auswirkungen des Anfang 2015 vom Bundeswirtschaftsministerium veröffentlichten Eckpunktedokuments *Verordnungspaket Intelligente Netze* konnten im Rahmen des Projektes nicht mehr untersucht werden.⁵ Dies ist insbesondere auch für gemischte Szenarien mit Beteiligung von Lade- und Rückspeiseaktionen von Elektromobilen relevant. Im Projektzeitraum waren darüber hinaus keine konkreten Auswirkungen durch eine Verordnung für ein Rolloutszenario auf Basis der Kosten-Nutzen-Analyse absehbar.

Für die Kommunikation mit den Poolteilnehmern ergibt sich keine Grundlage für den zwingenden Einsatz eines Smart Meter Gateway im Sinne der TR-03109 sowie der Schutzprofile und der Umsetzung damit verbundener Anforderungen. Für die Anwendung der im EnWG geschaffenen bereichsspezifischen Datenschutzregeln verfügt das Projekt mit Ausnahme einer Kommunikationsstrecke nicht über den geeigneten Anknüpfungssachverhalt. Die Ausnahme betrifft die Erfassung von Messwerten und deren Übermittlung an LichtBlick.

Auf den sonstigen Datenumgang im Projekt sind die allgemeinen Regeln des Bundesdatenschutzgesetzes (BDSG) anzuwenden. Es ist vorhersehbar, dass eine Datenschutzverordnung zum EnWG Regeln für Kontroll- und Einwirkmöglichkeiten für das Fernwirken enthalten wird, deren Übertragung sinnvoll erscheint. Jedenfalls sind solche Regeln als Referenz mit ausreichender Schutzwirkung heranziehbar.

Geeignete Informationssicherheitsmaßnahmen

Die normativen Vorgaben zum Smart Metering betreffen das Projekt nur im Bereich der Zählerkommunikation und auch dort erst nach Ablauf der Übergangsfristen. Dennoch sind geeignete Informationssicherheitsmaßnahmen zu ergreifen. Dies gilt insbesondere bei einer weiteren Verbreitung des Projektszenarios, bei dem die Stabilität des Versorgungsnetzes geschützt werden muss. Eine Orientierung an den Maßnahmen im Bereich Smart Metering führt zu der Empfehlung, starke Authentifizierungs- und Verschlüsselungsverfahren einzusetzen sowie externe Schnittstellen auf Kundenseite mit restriktiven Firewallfunktionen, möglichst mit einem Callback-Mechanismus auszustatten.

⁵ Nach heutigem Kenntnisstand (November 2015) gibt es einen Gesetzesentwurf zur Digitalisierung der Energiewende (BR-Drs. 543/15), welcher ein neues Messstellenbetriebsgesetz (MsbG) regelt. In diesem MsbG-E gibt es eine solche Übergangsvorschrift: Bis 31.12.2020 sind Elektromobile vom verpflichtenden Einbau eines Smart Meter befreit.

Notwendige Datenschutzmaßnahmen

Die normativen Vorgaben zum bereichsspezifischen Datenschutz betreffen das Projekt unmittelbar nur im Bereich der Zählerkommunikation. Detailregelungen sind einer Datenschutzverordnung zum EnWG vorbehalten. Auf Grundlage des allgemeinen Datenschutzrechts sind geeignete Maßnahmen zu ergreifen. Die bisher im EnWG für den Bereich der Messsysteme normierten Vorgaben und die dazu entwickelten Empfehlungen der Datenschutzbeauftragten können sinnvoll zur Orientierung herangezogen werden. Neben den Grundsätzen Datenvermeidung, Datensparsamkeit, Zweckbindung und Souveränität über die eigenen Daten sind als besondere Ausprägung die geforderten Kontroll- und Einwirkungsmöglichkeiten für das Fernwirken und Fernmessen hervorzuheben.

Das Konzept der Regelleistungserbringung im Projekt INEES steht den Anforderungen an den Datenschutz nicht entgegen.

4.2.2 Erstellung Studie *Schutzprofil für EV-Ladeinfrastruktur*

Die am Fraunhofer IWES erstellte Studie zum *Schutzprofil für EV-Ladeinfrastruktur* betrachtet zunächst die im Rahmen der nationalen und internationalen Normung gestellten grundsätzlichen Sicherheitsanforderungen an Gateway-Lösungen im Smart Grid. Darüber hinaus werden bestehende und in Entwicklung befindliche rechtliche und technische Normen zu Informationssicherheit und Datenschutz untersucht. Die Ergebnisse werden ausgewertet und für Anwendungsfälle der Einbindung von EVs in Smart Grids verallgemeinert. Auf Basis der bestehenden und absehbaren Regelungen werden Maßnahmen zur Informationssicherheit und zum Datenschutz skizziert und Regelungslücken identifiziert. Die gewonnenen Ergebnisse sollen einen Beitrag zur Diskussion um die Weiterentwicklung entsprechender Normen liefern und in entsprechende Gremien eingebracht werden. Dies geschieht vor dem Hintergrund, das Potenzial der Elektromobilität für das Gelingen der Energiewende möglichst auszuschöpfen.

Als wesentliche Empfehlung ergibt sich nach dem aktuellen Stand für die Informationssicherheit, einen Standard mit vergleichbarem Schutzniveau wie für den Bereich des Smart Metering insgesamt zu schaffen. Dies ist im Projekt selbst allerdings nicht vorgesehen.

Die Messsystemverordnung wurde nach wie vor nicht endgültig verabschiedet, daher war eine abschließende Betrachtung im Rahmen des Projekts nicht mehr möglich. Insbesondere konnte wie vorher erläutert das Anfang 2015 vom Bundeswirtschaftsministerium veröffentlichte Eckpunktedokument *Verordnungspaket Intelligente Netze* nicht mehr berücksichtigt werden.

Die erarbeitete Studie wird auf der Homepage des IWES öffentlich zugänglich gemacht.

4.3 Erprobung des Gesamtkonzeptes in einem Flottenversuch

4.3.1 Aufbau und Betrieb einer bidirektionalen Ladestation

Für die Durchführung des Feldtests wurde von SMA, aufbauend auf einer vorhandenen Wechselrichterplattform, eine speziell auf den Feldtest zugeschnittene bidirektionale 10-kW-DC-Ladestation als Experimentiersystem entwickelt. Hierfür wurde zunächst auf Basis der allgemeinen technischen Anforderungen des Gesamtkonzeptes (siehe hierzu die Darstellung der Anforderungen in Kapitel 4.1.1) und des Gesamtkonzeptes zur Regelleistungserbringung aus Elektrofahrzeugen (Kapitel 4.1.2) ein konkretes technisches Anforderungsprofil sowie darauf aufbauend das Realisierungskonzept erarbeitet.

Demnach besteht die Ladestation im Wesentlichen aus folgenden Funktionsbereichen und Hauptkomponenten:

- Leistungselektronik auf der DC-Seite mit dem elektrischen Potenzial des Fahrzeugs inkl. Überwachung des Isolationswiderstandes sowie Hochvoltschaltungsteile (insbesondere eine Stufe des Hochfrequenztransformators (HF))
- Leistungselektronik zur AC-Netzseite, basierend auf dem Wechselrichter aus einem PV-Wechselrichter inkl. Hauptprozessor (HP) und Netzüberwachungselementen. Der HF-Transformator stellt die Verbindung zur DC-Seite dar
- Signalelektronik zur Steckerüberwachung sowie ein Wallbox-Controller inkl. Power Line Communication (PLC) und Kommunikationsprozessor (KP) mit Display und Signalgeber

Die Zusammenhänge und die Verknüpfung der verschiedenen Elemente sind im Blockschaltbild in Abbildung 9 dargestellt.

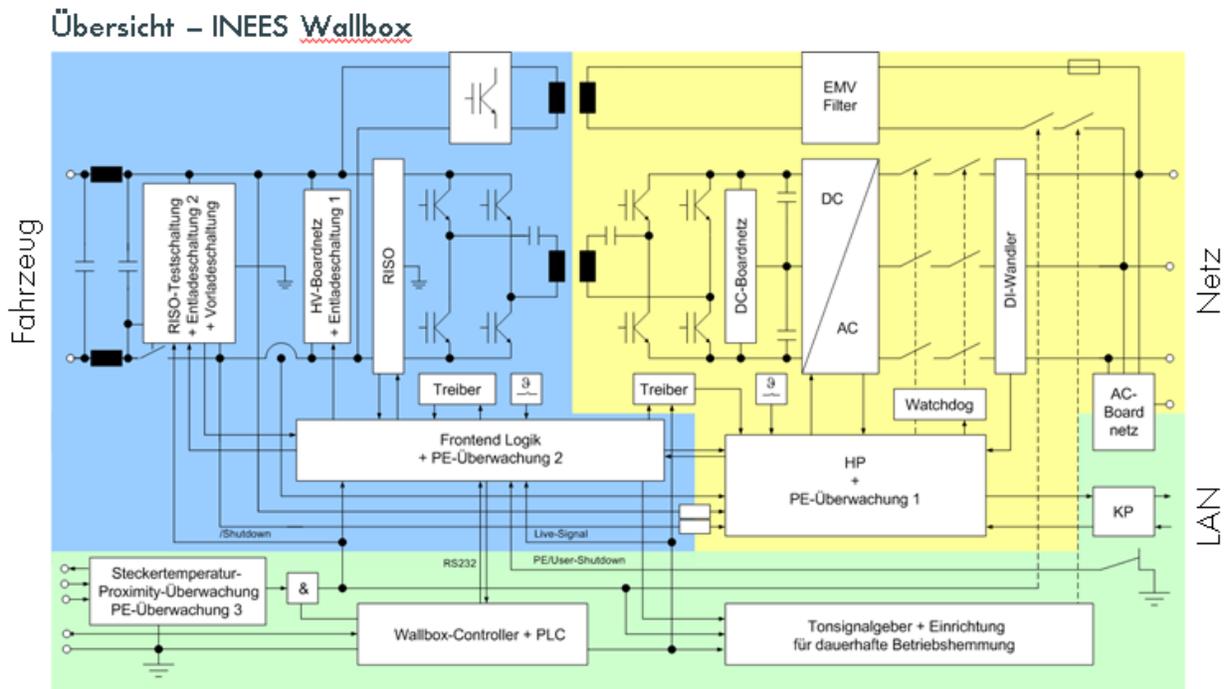


Abbildung 9: Blockschaltbild der Sunny Wallbox

Der mechanische Aufbau der Ladestation umfasst die Integration von Ladeleitung mit Stecker, elektrischer Komponenten sowie weiterer Leiterplatten in ein bestehendes Wechselrichtergeräthäuse. Das äußere Erscheinungsbild der wandmontierten Einheit bleibt dabei möglichst unangetastet, um die Vorteile des langjährig bewährten und optimierten Wechselrichtergeräthäuses für das INEES-Projekt zu erschließen (siehe Abbildung 10).



Abbildung 10: Bidirektionale 10-kW-DC-Ladestation als Experimentiersystem für den INEES-Flottenversuch

Für die anschließende Geräteentwicklung und die Realisierung von 40 Systemen für die Labor- und Feldtestuntersuchungen wurden u. a. folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

1. Erarbeitung eines Einfehler-Sicherheitskonzepts mit Risikoanalyse in Form einer FMEA
2. Erstellung einer Liste aller erforderlichen Typprüfungen gemäß geltender Normen und vorläufiger Normentwürfe
3. Durchführung der Typprüfungen und Erstellung der Typprüfungsprotokolle zu den einzelnen Typprüfungen (jeder Typprüfungspunkt hat ein entsprechendes Protokoll, das nach dem Vieraugenprinzip geprüft und freigegeben wurde.)
4. Durchführung von speziellen Stückprüfungen für jedes einzelne der 40 Geräte und Dokumentation in entsprechenden Stückprüfungsprotokollen (zusätzlich zu den Typprüfungen wurde nach der Montage und der ersten Inbetriebnahme eine hundertprozentige Stückprüfung vorgenommen.)
5. Erstellung der CE-Erklärung mit F3 Protokoll zu Oberschwingungen sowie eine Unbedenklichkeitsbescheinigung der BGFME. Auf Basis der erfolgreich bestandenen Tests wurden die erforderlichen Dokumente für den Feldeinsatz ausgefertigt und dem Netzbetreiber zur Verfügung gestellt

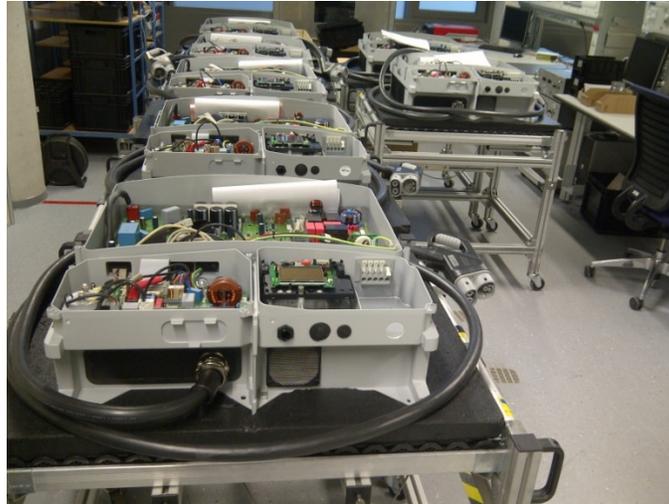


Abbildung 11: Prüf- und Teststand INEES-Ladestation

Die technischen Daten der als Experimentiersystem für den INEES-Flottenversuch konzipierten bidirektionalen 10-kW-DC-Ladestation sind in Abbildung 12 zusammengestellt:

DC-Eingang

Maximale DC-Leistung im Ladebetrieb bei $\cos \varphi = 1$	10.500 W
Maximale DC-Leistung im Entladebetrieb bei $\cos \varphi = 1$	11.500 W
Maximale Eingangsspannung	450 V
Nennspannungsbereich	320 V ... 430 V
Bemessungseingangsspannung	430 V
Minimale Eingangsspannung	320 V
Maximaler Eingangsstrom im Lade- und Entladebetrieb	30 A

* Im Kurzschlussfall der elektronischen String-Sicherung zu beachten.

AC-Ausgang

Bemessungsleistung bei 230 V, 50 Hz	10.500 W
Maximale AC-Scheinleistung bei $\cos \varphi = 1$	10.500 VA
AC-Nennspannung	3/N/PE, 220 V/380 V 3/N/PE, 230 V/400 V 3/N/PE, 230 V/415 V
Bemessungsnetzspannung	3/N/PE, 230 V/400 V
AC-Spannungsbereich je nach Ländereinstellung	160 V ... 280 V
AC-Nennstrom bei 230 V	14,5 A
Maximaler Ausgangsstrom	16,0 A
Maximaler Ausgangsstrom im Fehlerfall	< 30 mA
Klirrfaktor des Ausgangsstroms bei AC-Spannung < 2 %, AC-Leistung > 0,5 AC-Nennleistung	≤ 3 %
Bemessungsnetzfrequenz	50 Hz
AC-Netzfrequenz*	50 Hz/60 Hz
Arbeitsbereich bei AC-Netzfrequenz 50 Hz	44 Hz ... 55 Hz
Arbeitsbereich bei AC-Netzfrequenz 60 Hz	54 Hz ... 65 Hz
Verschiebungsfaktor, einstellbar	0,8 _{überregt} ... 1 ... 0,8 _{unterregt}
Einspeisephasen	3
Anschlussphasen	3
Überspannungskategorie nach IEC 60664-1	III

Schutzeinrichtungen

AC-Kurzschlussfestigkeit	Stromregelung
Netzüberwachung	SMA Grid Guard 4
Maximal zulässige Absicherung	16 A
Erdschlussüberwachung	Isolationsüberwachung: $R_{iso} > 300 \text{ k}\Omega$
Allstromsensitive Fehlerstrom-Überwachungseinheit	vorhanden

Allgemeine Daten

Breite x Höhe x Tiefe, mit Electronic Solar Switch	665 mm x 690 mm x 265 mm
Gewicht	ca. 60 kg
Länge x Breite x Höhe der Verpackung	780 mm x 380 mm x 790 mm
Transporgewicht	ca. 70 kg
Klimaklasse nach IEC 60721-3-4	4K4H
Umweltkategorie	im Freien
Verschmutzungsgrad außerhalb des Gehäuses	3
Verschmutzungsgrad innerhalb des Gehäuses	2
Betriebstemperaturbereich	-25 °C ... +60 °C
Zulässiger Maximalwert für die relative Feuchte, nicht kondensierend	100 %
Maximale Betriebshöhe über NHN	3 000 m
Geräuschemission	51 dB(A)
Verlustleistung im Nachtbetrieb	< 12 W
Topologie	Transformator
Kühlprinzip	OptiCool: temperaturgesteuerter Lüfter
Lüfteranschluss	ausgeführt als sichere Trennung nach DIN EN 50178:1998-04
Schutzart nach IEC 60529	IP65
Schutzklasse nach IEC 62103	I
Ländernormen, Stand 04/2013*	VDE-AR-N4105, VDE 0126-1-1

* VDE-AR-N4105: Gilt ab Firmware-Version 2.31. Einstellung nach VDE-AR-N4105 [Deutschland]

Abbildung 12: Technisches Datenblatt der INEES-Ladestation

Insgesamt wurden 40 Geräte dieser experimentellen Ladestation aufgebaut und – trotz verschiedener technischer Schwierigkeiten bei der zuverlässigen Interaktion des Gesamtsystems Fahrzeug/Ladestation – weitgehend erfolgreich im Feldtest betrieben.

4.3.2 Durchführung und Betrieb der Kundeninstallationen

Für die Erbringung von Regelleistung mit Elektrofahrzeugen ist es wichtig, dass diese möglichst immer dann, wenn sie stehen, auch an einer Ladestation angebunden sind (gesteckt sind). Im Projekt wurde daher bei allen Teilnehmern zu Hause eine Ladestation installiert. Zudem erhielten einige Teilnehmer eine zweite Ladestation am Arbeitsplatz, sofern dort die Fahrzeuge regelmäßig längere Zeit standen.

Für die Installation einer bidirektionalen DC-Ladestation gibt es technische Voraussetzungen, die am Installationsort gegeben sein müssen. So muss am Netzanschlusspunkt eine ausreichende Leistungsreserve vorhanden sein und grundsätzlich ein stabiles Netz vorliegen. Diese Anforderungen waren im Projekt bei allen potenziellen Installationsorten gegeben, was sicherlich am innerstädtisch gut ausgebauten Verteilungsnetz in Berlin lag.

Zudem gab es weitere Anforderungen aus dem Projekt heraus. Für die energiewirtschaftliche Abwicklung war es im Projekt leichter, jede Ladestation über einen neu gesetzten, nur ihr zugeordneten Netzanschlusspunkt zu versorgen. So konnten bestehende Stromlieferverträge der Teilnehmer weiterhin genutzt und eine komplizierte Abrechnung aufgrund einer Unterzählung vermieden werden. Sehr kostenintensive Installationen sollten im Projekt verhindert werden, was insbesondere Standorte mit langen oder aufwendig zu verlegenden Kabelwegen ausschloss. Zudem war ein ausreichend guter Mobilfunkempfang für die Kommunikation mit den Fahrzeugen und die Übertragung von Messwerten entscheidend. Insbesondere mögliche Standorte in Tiefgaragen wurden dadurch ausgeschlossen.

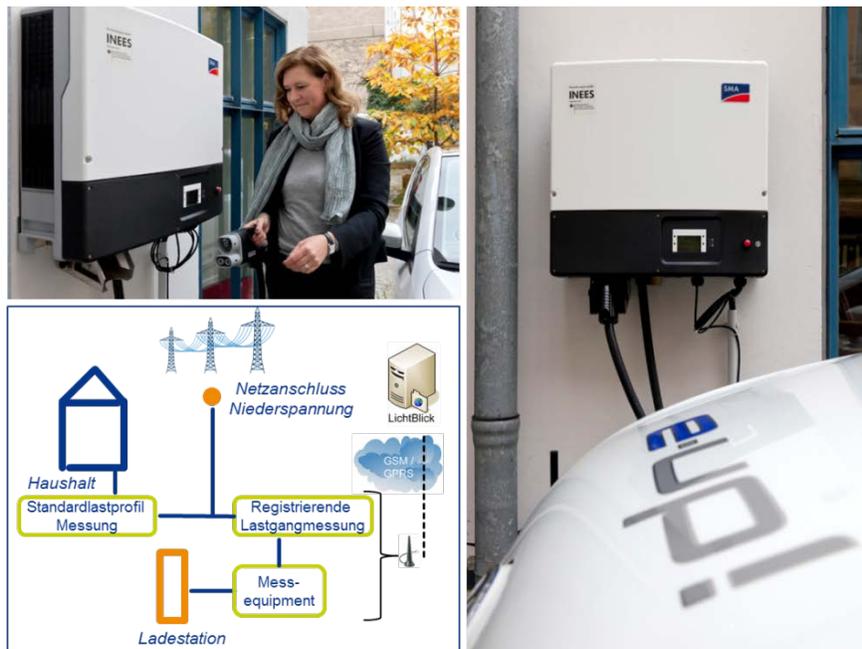


Abbildung 13: Kundeninstallation im Projekt INEES (Fotos: LichtBlick SE/Boris Geilert)

Alle Anforderungen wurden bei einer eingehenden Ortsbegehung überprüft, sodass größere Probleme bei der Installation an den ausgewählten Standorten im Projekt vermieden werden konnten. Für die eigentliche Installation der Komponenten und die Wartung während des Feldtests wurde ein Servicepartner in Berlin beauftragt. Zunächst erfolgte je Standort das Setzen eines neuen Netzanschlusspunkts, der mittels registrierender Lastgangmessung (RLM) energiewirtschaftlich erfasst wurde. Der Messstellenbetrieb und die Messstellendienstleistung der

verbauten RLM-Zähler erfolgten durch LichtBlick. Für die spätere wissenschaftliche Auswertung wurde zusätzlich ein hochauflösendes Messequipment installiert, welches je Ladestation die Wirkleistung und den Energiebezug aufzeichnete. Für die Bewertung der Netzqualität erhielten in den beiden Feldtestgruppen jeweils drei Ladestationen zusätzlich ein weiteres Messequipment des Projektpartners Fraunhofer IWES. Die Daten der Messequipments sowie des energiewirtschaftlichen Zählers wurden per Mobilfunk täglich an LichtBlick bzw. das Fraunhofer IWES übermittelt.

Die anfänglichen technischen Probleme beim Ladevorgang machten zu Beginn des Feldtests einige Einsätze des Servicepartners an den Installationen notwendig (vgl. Kapitel 4.4.2, Auffälligkeiten und Optimierungsmöglichkeiten). Anders als ursprünglich erwartet, gab es beim Mobilfunkempfang der Fahrzeuge keine Probleme, sodass die technische Eignung dieser Kommunikationsstrecke auch für einen zukünftigen Massenmarkt demonstriert werden konnte. Mit Hinblick auf einen späteren Massenmarkt ist insbesondere die Installation eines eigenen Netzanschlusspunktes in der Niederspannung ohne Unterzählung kritisch zu sehen. Zunächst ist es beispielsweise im Falle von Arbeitgeberladestationen oftmals schwierig, einen Netzanschlusspunkt in der Niederspannung zu setzen. Zudem hat dies höhere Installationskosten zur Folge, was einen späteren wirtschaftlichen Betrieb der Installation erschwert. Die Erbringung von Regelleistung in Unterzählung zu einem existierenden Netzanschlusspunkt ist mit Hinblick auf einen späteren Massenmarkt wichtig. Die im Projekt umgesetzte Lade-/Entladeleistung von 10 kW stellte für das örtliche Verteilungsnetz kein Problem dar. Inwieweit es hier in einem späteren Massenmarkt bei einer großen Anzahl zu Problemen kommen kann, wurde ebenfalls im Rahmen des Projektes untersucht (Kapitel 7.1).

4.3.3 Aufbau und Betrieb einer Flotte von bidirektionalen Elektrofahrzeugen

Aufbau

Als Basisfahrzeuge wurden 22 Volkswagen-e-up!-Serienfahrzeuge mit Combined Charging System⁶-Ladedose verwendet, welche über einen Hochleistungsgleichstromanschluss verfügt. 20 Fahrzeuge sollten während des Betriebs der Erfahrungsflotte immer bei den Teilnehmern sein, während zwei Fahrzeuge für parallel laufende Tests oder als Ersatz während der regelmäßigen Wartungsarbeiten vorgesehen waren. Um die INEES-Funktionalitäten zu realisieren, wurde eine Car-Telematic-Box (CaTe) inkl. GPS/GSM-Antenne mithilfe eines zusätzlichen Kabelstranges an einzelne Fahrzeugdatennetze angeschlossen und über eine proprietäre Leitung mit dem Lademanager verbunden. Zu Analyse Zwecken wurde ebenfalls in der Kofferraummulde ein Datenlogger inkl. GPS/GSM-Antenne verbaut (Abbildung 14).

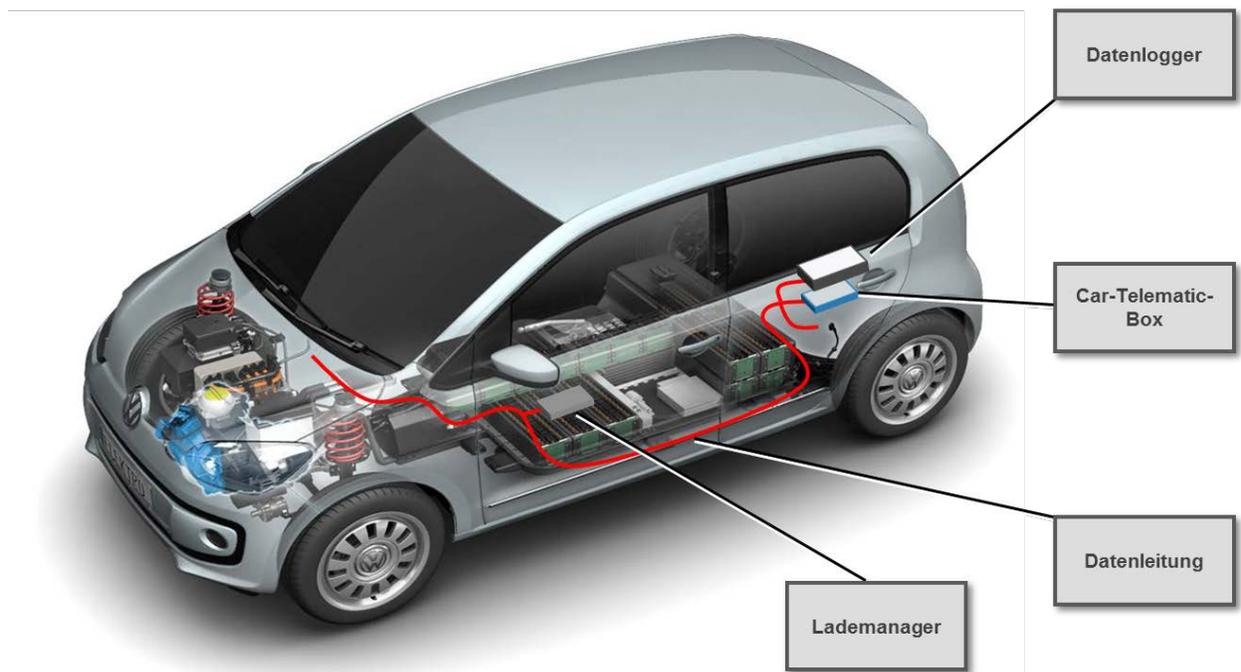


Abbildung 14: Schnittbild INEES-e-up! mit zusätzlichen Einbauten

Im Rahmen der Freigabe für die Nutzung der modifizierten Fahrzeuge wurden intensive Sicherheitsprüfungen durchgeführt und dabei folgende Schritte durchlaufen:

1. Es wurden durch eine externe Hochvolt-Sicherheitsfachkraft eine Systemanalyse von Fahrzeug und Ladestation durchgeführt, Gefahren identifiziert, Sicherheitsmaßnahmen definiert und ausgeführt.
2. In einer Gefahren- und Risikoanalyse wurde die Sicherheit des Gesamtsystems analysiert und dokumentiert.
3. Der TÜV-Süd führte eine abschließende Bewertung des Freigabeprozesses durch und bestätigte die Sicherheitsanalysen.

⁶ Combined Charging System; Schnellladestandard der europäischen Automobilhersteller

4. Die unter 1. bis 3. beschriebenen Arbeitsschritte wurden durch die Volkswagen Qualitätssicherung begleitet und mit einer Freigabeempfehlung abgeschlossen.

Parallel erfolgten durch interne Experten eine Analyse der Datensicherheit und die Erstellung eines Datenschutzkonzeptes für die personenbezogenen Daten der Teilnehmer am Flottenversuch.

Betrieb der Flotte

Während des Flottenversuchs wurden bei monatlichen Inspektionen insbesondere die Funktionen der Forschungskomponenten überprüft. Im Rahmen dieser Termine konnten auch Updates für die Software aufgespielt werden.

Zur Betreuung der Teilnehmer bei Fragen und Problemen mit dem INEES-System wurde eine geschulte Hotline eingerichtet und im Notfall konnte jederzeit die offizielle Volkswagen-Service-Hotline genutzt werden. Unterstützend dazu war das INEES-Team über ein E-Mail-Postfach erreichbar.

Datenlogging-Konzept

Während des Flottenversuchs wurden über den im Fahrzeug verbauten Datenlogger alle relevanten Fahrzeugdaten erfasst und per UMTS an eine Messdatenplattform übertragen. Zur regelmäßigen Überwachung der aktuellen Situation im Flottenversuch wurde über die Messdatenplattform ein automatischer Monitoringbericht erstellt. Zum einen konnte dadurch das Nutzerverhalten der INEES-Teilnehmer in Bezug auf ihre Fahrweise analysiert werden. Dazu gehören bspw. typische zurückgelegte Strecken und Verbräuche. Zum anderen ermöglichte die Verbindung des Datenloggers mit dem Lademanagement des Fahrzeugs eine detaillierte Analyse der Ladevorgänge und die Überprüfung der Funktionalitäten zum bidirektionalen Laden.

Zur qualitativen Einordnung der gesammelten Daten wurde das Datenlogging während des Flottenversuchs durch Nutzerbefragungen (siehe Kapitel 5.2.2) ergänzt. Hierbei standen die Untersuchung der Nutzererwartungen und die persönlichen Erfahrungen im Umgang mit dem Elektrofahrzeug und dem bidirektionalen Laden im Vordergrund. Neben persönlichen Interviews und Onlinenfragebögen kamen dabei Cultural Probes und Gruppendiskussionen zum Einsatz. Bei den Cultural Probes handelte es sich um Aufgaben, die die Teilnehmer während des Flottenversuchs erfüllen mussten. Dazu gehörten beispielsweise ein Wochenplan über den eigenen Mobilitätsbedarf oder ein Notizheft über besonders positive oder negative Erlebnisse. Die persönlichen Interviews und Onlinebefragungen wurden im Rahmen der Studie zu drei Zeitpunkten vor der ersten Nutzung sowie nach kurzem und längerem Test des Elektroautos und des bidirektionalen Ladens durchgeführt. Um neue Mobilitäts- und Energiedienstleistungen mit hoher Detailtiefe zu diskutieren und daraus Rückschlüsse auf Bedürfnisse und neue Produkte bzw. Dienstleistungen zu generieren, wurden im Rahmen der Studie darüber hinaus verschiedene Gruppendiskussionen durchgeführt.

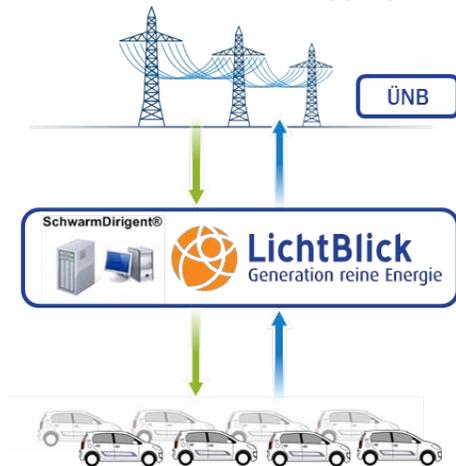
4.3.4 Aufbau und Betrieb SchwarmDirigent®

Für die Einbindung eines Elektrofahrzeugpools in die Energiewirtschaft musste eine zentrale Plattform als Schnittstelle zwischen den verschiedenen Akteuren bereitgestellt werden. Im Projekt INEES wurde hierfür von LichtBlick eine Erweiterung des SchwarmDirigent® für einen Pool aus Elektrofahrzeugen entwickelt. Der SchwarmDirigent® bündelt alle für eine energiewirtschaftliche Nutzung des Pools notwendigen Funktionalitäten. Das System fungiert als

- **Aggregator,**
- **Abrechnungsplattform** sowie als Software für das
- **Monitoring des Pools** (Nutzerschnittstelle für die Leitwarte).

Der SchwarmDirigent® als Aggregator

In seiner Funktion als Aggregator verwaltet das System zunächst alle Eigenschaften der Fahrzeuge, der Ladestationen und der energiewirtschaftlichen Zähler. Es gibt zwei Schnittstellen. Mit dem ÜNB werden



Es gibt zwei Schnittstellen. Mit dem ÜNB werden SRL-Abrufe und aktuelle SRL-Leistungen ausgetauscht. Über die zweite Schnittstelle werden mittels einer SSL-gesicherten Kommunikation Fahrzeugdaten empfangen und Ladepläne versendet.

Mithilfe der Fahrzeugdaten generiert der SchwarmDirigent® zu jedem Zeitpunkt ein aktuelles Bild des gesamten Pools. Die Parameter der Einzelfahrzeuge werden zu einer Poolbatterie aggregiert. Die Kapazität sowie das zur Verfügung stehende Leistungspotenzial der Poolbatterie sind im zeitlichen Verlauf nicht konstant, sondern verändern sich in Abhängigkeit der Anzahl der zur Verfügung stehenden Fahrzeuge sowie deren aktueller Parameter.

In Abbildung 15 ist ein Wochenverlauf des Kapazitätspotenzials eines beispielhaften Elektrofahrzeugpools dargestellt, in Abbildung 16 der Wochenverlauf des Leistungspotenzials (bidirektionaler EV-Pool). Beide Verläufe beruhen auf Beobachtungen aus dem Feldtest und beschreiben das Verhalten der Poolbatterie, welches sich aus dem Verhalten der Einzelfahrzeuge ergibt.

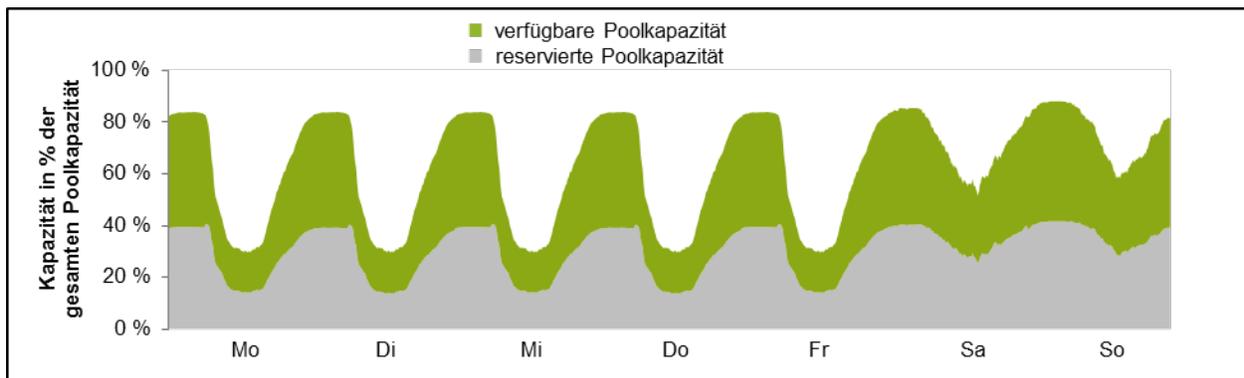


Abbildung 15: Kapazitätspotenzial der Poolbatterie eines beispielhaften Elektrofahrzeugpools im Wochenverlauf

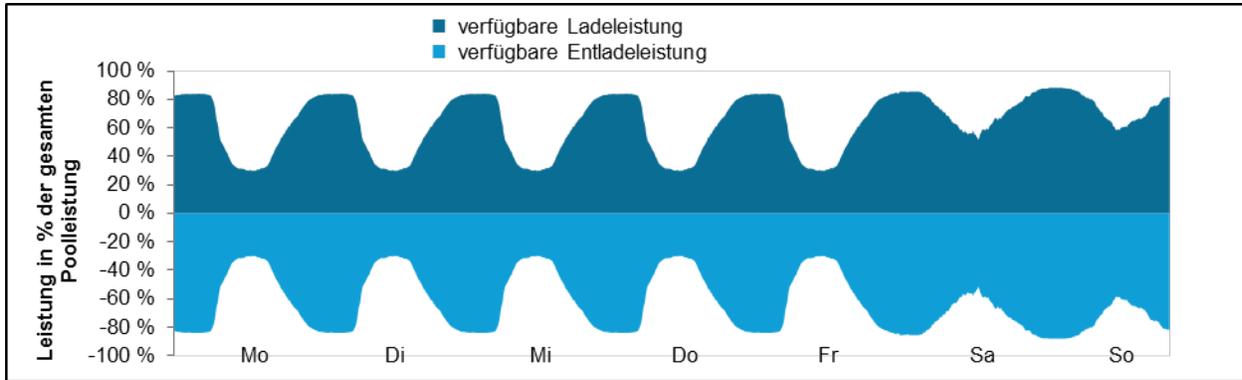


Abbildung 16: Leistungspotenzial der Poolbatterie eines beispielhaften bidirektionalen Elektrofahrzeugpools im Wochenverlauf

Die Fahrzeugdaten dienen als Grundlage für die drei Basisprozesse, welche für die Einbindung in die Energiewirtschaft entwickelt wurden:

- Prognose der Poolbatteriepoteziale für den nächsten Tag
- Ermittlung des optimalen Arbeitspunkts für den nächsten Tag sowie die
- Steuerung der Leistung des Fahrzeugpools zu jedem Zeitpunkt

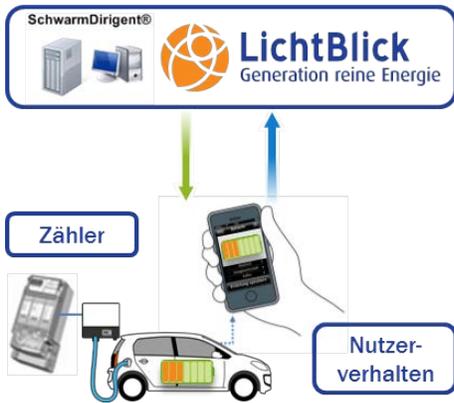
Die im Rahmen von INEES entwickelte Prognose bestimmt die Kapazitäts- und Leistungspotenzialverläufe der Poolbatterie für den nächsten Tag. Eingangsgrößen sind unter anderem prognostizierte Abfahrten, Ankünfte, Füllstände, Fahrenergien sowie Klimatisierungsleistungen. Ziel der Prognose ist es, für den nächsten Tag zu jedem Zeitpunkt die zur Verfügung stehende Kapazität und Leistung sowie den Energiebedarf der Poolbatterie zu ermitteln. Diese Kenntnis ist zum einen die Voraussetzung für die Ermittlung des für den nächsten Tag am Day-Ahead-Markt zu beschaffenden Fahrplans (dem ÜNB als Arbeitspunkt gemeldet) sowie zur Bestimmung der gesichert am Markt anbietbaren SRL-Leistung (siehe Kapitel 6.1.2).

Im laufenden Betrieb gleicht der SchwarmDirigent[®] permanent die aktuelle Poolleistung mit der anliegenden Sollleistung ab. Die Sollleistung ergibt sich aus dem gemeldeten Arbeitspunkt sowie im Falle eines Abrufs zusätzlich aus dem SRL-Signal. Kommt es zu Abweichungen zwischen Ist- und Sollleistung reagiert das System und passt die Poolleistung über das Versenden von Lade-/Entladeplänen an die Einzelfahrzeuge an. Es bewertet jedes Fahrzeug anhand der Fahrzeugparameter und bildet Ranglisten (Scoring). Die am besten geeigneten Fahrzeuge werden in absteigender Reihenfolge angesprochen.

Im Falle eines SRL-Abrufs durch den ÜNB wird die Poolleistung durch den SchwarmDirigent[®] angepasst und die tatsächlich erbrachte SRL-Leistung als Nachweis wieder an den ÜNB übermittelt. Für die Nachweisführung wurde im INEES-Projekt ein innovatives Konzept auf Basis gemeldeter Fahrzeugwerte entwickelt (nähere Details siehe Kapitel 4.4.3).

Der SchwarmDirigent[®] als Abrechnungsplattform

An jeder INEES-Ladestation wurde ein energiewirtschaftlicher Zähler verbaut. Die Zählerwerte werden täglich von einer Kommunikationseinheit ausgelesen und an den SchwarmDirigent[®] übermittelt. Über die Daten aus dem Fahrzeug erhält der SchwarmDirigent[®] Informationen, wann welches Fahrzeug mit welcher Ladestation verbunden ist. Durch die Verknüpfung von Zählerwerten mit den hinterlegten Ladestationen und den Fahrzeugdaten kann eine fahrzeugscharfe Abrechnung der Energiemengen erfolgen, unabhängig davon, über welche INEES-Ladestation der Energiebezug erfolgt.

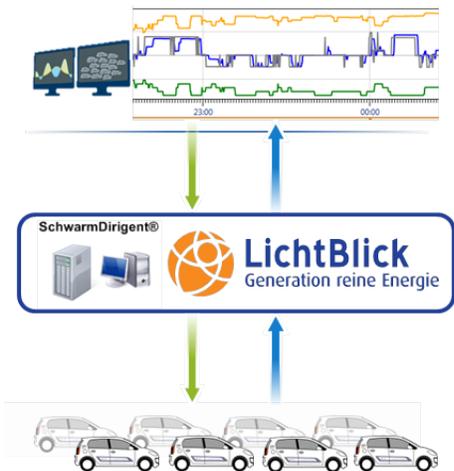


Für die Bereitstellung seines Fahrzeugs für die Energiewirtschaft erhält der Teilnehmer als Teil des entwickelten Anreizsystems eine SchwarmStrom[®]-Prämie.

Der SchwarmDirigent[®] berechnet die tägliche Prämie unter Berücksichtigung der vom Teilnehmer freigegebenen Batteriekapazität sowie der Zeit, die das Fahrzeug mit einer INEES-Ladestation verbunden war. Anhand der berechneten Werte für die Fahrenergie und die Prämie wird je Teilnehmer eine monatliche Abrechnung erstellt. Zusätzlich werden die tagesaktuellen Werte zur Information den Teilnehmern über die INEES-App bereitgestellt (nähere Details siehe Kapitel 5.1.1).

Der SchwarmDirigent[®] als Software für das Monitoring

Für den SchwarmDirigent[®] wurde ein Client als Schnittstelle zu den Anwendern des Systems entwickelt. Diese grafische Oberfläche visualisiert die aktuelle Situation der Poolbatterie und stellt eine Leitwarte für den Poolbetrieb dar. In einem möglichen Massenmarkt ist der Client die



Beobachtungs- und Analyseplattform des Fahrzeugpools für den Anwender. Zusätzlich können Konfigurationen des Systems vorgenommen werden. Hier können unter anderem Schwellwerte und Reaktionszeiten eingestellt werden, um dadurch das Regelverhalten zu beeinflussen. Darüber hinaus ist es möglich, ein beliebiges Sollsignal für die Leistung des Fahrzeugpools vorzugeben. Diese Funktion dient als wichtiges Instrument für die Durchführung von Tests.

Bei der produktiven Teilnahme am Regelleistungsmarkt kann die Erbringung von Leistung über die Leitwarte überwacht werden, und es können frühzeitig Maßnahmen zur Sicherstellung der zu erbringenden Leistung eingeleitet werden (z. B. Handelsaktivität am Intradaymarkt, Details siehe Kapitel 6.1.2).

4.4 Erkenntnisse zur technischen Machbarkeit

Die beschriebenen Systemkomponenten Fahrzeug, Ladesäule und zentrale Steuerungseinheit wurden im Gesamtsystem auf ihre Funktionsfähigkeit und ihr Zusammenwirken überprüft. Dafür wurden verschiedene Einsatzfälle, vom Starten eines Ladevorgangs auf Einzelfahrzeugebene bis hin zum Nachstellen eines historischen Sekundärregelleistungsabrufs auf Poolebene, im Feldversuch erprobt und im Modell per Simulation nachgestellt und auf Zielsystemgröße skaliert. Aus den gewonnenen Ergebnissen wurden zusätzlich Optimierungsmöglichkeiten abgeleitet und ein Konzept zur Präqualifikation eines Elektrofahrzeugpools zur Erbringung von Sekundärregelleistung erarbeitet.

4.4.1 Performance des Gesamtsystems

Im Forschungsprojekt wurden eine Flotte von 20 Fahrzeugen eingesetzt sowie unter Berücksichtigung der installierten Arbeitgeberladesäulen 25 INEES-Ladepunkte bereitgestellt. Die Ladesäulen verfügten jeweils über eine dreiphasige bidirektionale Netzanbindung und eine Lade-/Entladeleistung von 10 kW. Die Steuerung der Poolleistung erfolgte über Kommunikation mit den Fahrzeugen vom Typ eines modifizierten VW e-up! mit einer maximalen Netzanschlussleistung von 40 kW und einer nutzbaren Batteriekapazität von 16,5 kWh. Durch die Nutzung der beschriebenen Ladesäulen war damit die für die Erbringung von Systemdienstleistungen zur Verfügung stehende Leistung in Lade- und Entladerichtung auf 10 kW je Fahrzeug begrenzt.

Untersuchungen auf Einzelfahrzeugebene

Zunächst wurde im Feldtest das Regelverhalten eines einzelnen Elektrofahrzeuges an einer INEES-Ladestation untersucht. Da es sich beim e-up! im Projekt um ein nur leicht modifiziertes Serienfahrzeug handelt, können die Ergebnisse auch grundsätzlich exemplarisch für andere Elektrofahrzeuge gesehen werden. Im Projekt wurden die Fahrzeuge vom SchwarmDirigent[®] mittels Ladeplänen angesprochen. Ein Ladeplan besteht aus einem Start- und einem Endzeitpunkt. Für diesen Zeitraum wird ein DC-Regelziel vorgegeben, also eine Leistung, die zwischen Fahrzeug und Ladestation anliegen soll. Im Projekt konnten dem Fahrzeug die Zeitpunkte sekundenscharf sowie die Leistungen in Watt vorgegeben werden.

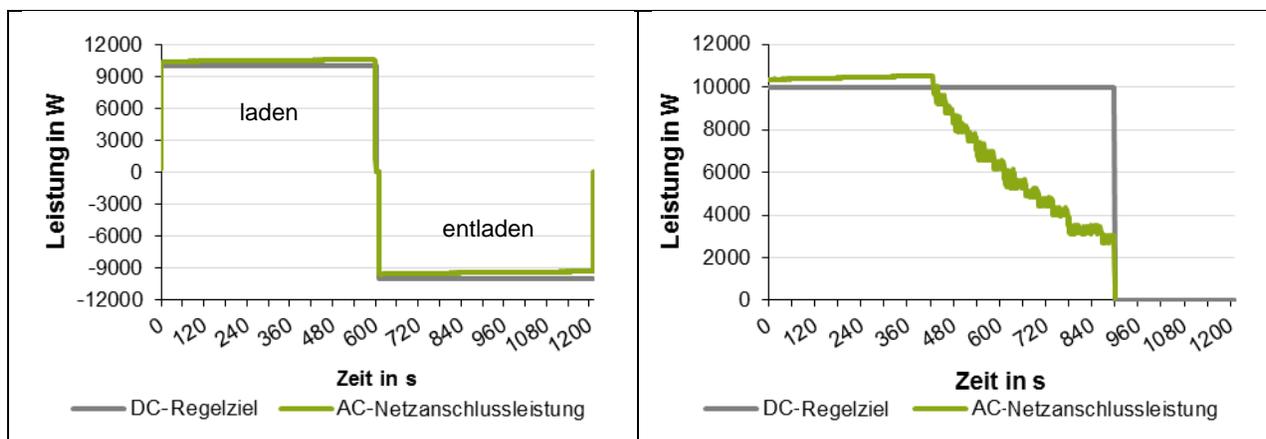


Abbildung 17: Sprungantwort (laden/entladen) eines Elektrofahrzeugs (links) sowie Leistungsabfall bei voller Batterie (rechts)

Im Feldversuch wurden die Leistungsanforderungen zur simulierten SRL-Erbringung nicht moduliert, d. h. es wurden im Beladungsfall +10 kW und im Entladungsfall -10 kW als Sprungfunktion vom Fahrzeug angefordert. In Abbildung 17 ist das Regelverhalten eines Elektrofahrzeuges bei einem 10-kW, bzw. -10-kW-Sprung dargestellt. Durch die Leistungsverluste in der Ladesäule

le kommt es bei einem Laden der Batterie zu einer Netzanschlussleistung größer 10 kW und bei einer Entladung der Batterie zu einer Netzanschlussleistung kleiner 10 kW. Das DC-Regelziel kann bei allen Leistungsstufen mit hoher Genauigkeit eingehalten werden. Die angeforderte Leistung wird vom Fahrzeug nahezu unmittelbar erbracht. Aufgrund der Batteriephysik wird im Allgemeinen zur Ladung von Lithium-Ionen-Batterien eine Konstant-Strom-Konstant-Spannungskennlinie eingesetzt. Aus dem gleichen Grund wird beim Ladevorgang ab einem definierten Ladezustand eine Reduzierung der Ladeleistung vorgenommen. Dies ist ebenfalls beispielhaft in Abbildung 17 zu finden und tritt systematisch auf.

Kommunikationsgeschwindigkeit, Latenzen

Die Erbringung von Sekundärregelleistung setzt eine dynamische Regelung des Gesamtsystems voraus. So muss beispielsweise einem vom ÜNB vorgegebenen Sollsignal nach spätestens 30 Sekunden mit einer Leistungsänderung des Pools gefolgt werden. Die volle abrufbare Leistung muss nach spätestens fünf Minuten erbracht werden. Neben dieser Dynamik ist dem ÜNB ein wiederkehrendes, systematisches Regelverhalten wichtig.



Abbildung 18: Im Feldtest ermittelte Verzögerungen auf der Kommunikationsstrecke

Gerade bei dezentral verteilten Anlagen, die über Mobilfunk angesprochen werden, stellt die Erstreaktion eine Herausforderung dar. Im Feldtest wurde daher zunächst untersucht, welche Verzögerung bei der Kommunikation zwischen Fahrzeug und Anbieterleitsystem, dem LichtBlick SchwarmDirigent®, vorliegt. Anhand des aufgezeichneten Kommunikationsverkehrs wurde festgestellt, dass es durchschnittlich zehn Sekunden dauert, bis ein neuer Status (bspw. eine geänderte Ladeleistung) vom Fahrzeug registriert und an den SchwarmDirigent® mitgeteilt wurde. Das Versenden eines Betriebsplans mit anschließender Bestätigung durch das Fahrzeug nimmt durchschnittlich 15 Sekunden in Anspruch. Für eine mögliche Optimierung wurden die Zeiten für die einzelnen Teilstrecken (Verarbeitung innerhalb der Systeme, Mobilfunkstrecke, etc.) erhoben. Lediglich vier Sekunden entfallen auf die Übertragungsverzögerung der Mobilfunkstrecke. Diese Zeit ist vom Anbieter nicht beeinflussbar und auch für einen Massenmarkt zu erwarten. Die verbleibende Verzögerung entsteht innerhalb der eigens für das Forschungsprojekt aufgebauten Komponenten und Systeme der Projektpartner, hier wird noch erhebliches Optimierungspotenzial gesehen. Im Ausblick sind daher Übertragungsverzögerungen zwischen den dezentralen Komponenten und dem Anbieterleitsystem von durchschnittlich unter fünf Sekunden durchaus realistisch.

Untersuchungen auf Poolebene

Welche Auswirkungen die beobachteten Verzögerungen auf die Erbringung von Regelleistung haben, wurde im Feldtest untersucht. Dazu wurde eine Vielzahl an simulierten ÜNB-Leistungsanforderungen dem SchwarmDirigent® vorgegeben. Dieser übersetzte die Leistungsanforderung in eine Ansteuerung der zum jeweiligen Zeitpunkt verfügbaren Fahrzeuge um. In Abbildung 19 wird die Leistungserbringung von vier Fahrzeugen anhand der Daten aus dem Feldtest dargestellt. Mit den vier Fahrzeugen wird keine Rampe nachgefahren, sondern die Soll-

leistung durch den gleichzeitigen Abruf unmittelbar erreicht. Aufgrund der beschriebenen Verzögerung auf der Kommunikationsstrecke erfolgt erst nach durchschnittlich 20 Sekunden eine registrierte Leistungsänderung. Der SRL-Istwert gibt die Leistung des Pools an, welche auf Basis der von den einzelnen Fahrzeugen gemeldeten Leistungswerte ermittelt wird.

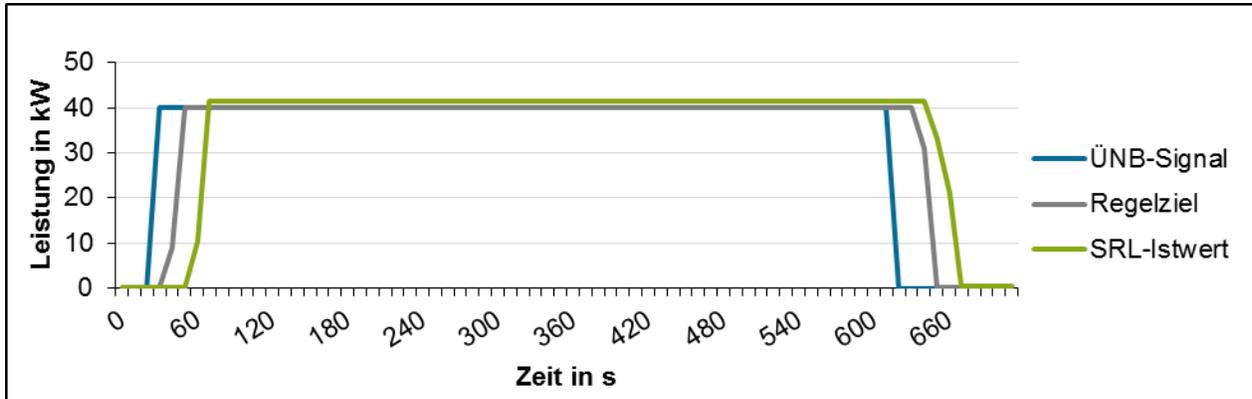


Abbildung 19: Abruf-/Antwortverhalten des Pools (vier Fahrzeuge) im Feldtest

Nach einer anfänglichen Testphase wurde dem SchwarmDirigent® ein historisches SRL-Abrufsignal vorgegeben, um das Antwortverhalten der Fahrzeuge unter möglichst realen Bedingungen zu untersuchen. In Abbildung 20 ist ausschnittsweise das Regelverhalten im Feldtest bei einem historischen SRL-Abrufsignal dargestellt. Es treten kleinere Abweichungen auf, grundsätzlich ist aber ein korrektes Verhalten zu beobachten.

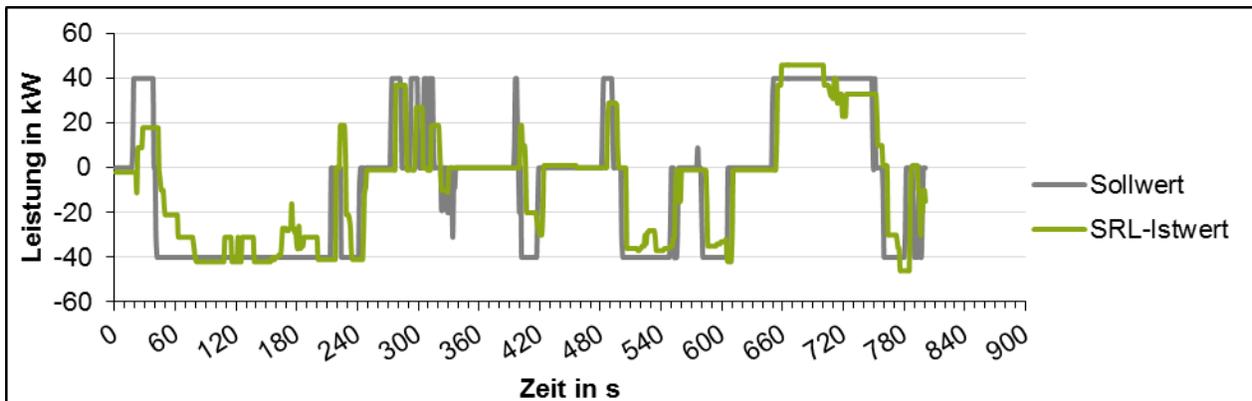


Abbildung 20: Abrufverhalten im Feldtest – historische Abrufe

Untersuchungen am Modell

Im Feldtest waren nur selten mehr als zehn der 20 Fahrzeuge gleichzeitig für den SchwarmDirigent® verfügbar. Dies war auf die tatsächliche Anwesenheit an einer Ladestation, die entsprechenden Nutzereinstellungen sowie auch auf technische Probleme zurückzuführen, siehe Kapitel 4.4.2. Da der SchwarmDirigent® als System so ausgelegt wurde, dass ein sehr viel größerer Fahrzeugpool angesprochen werden kann, wurde ein INEES-Simulationssystem entwickelt. Das im Projekt beobachtete Verhalten der Fahrzeuge und der Kommunikationsstrecken wurde im Simulationssystem nachgebildet, sodass mit dem SchwarmDirigent® bis zu 10.000 simulierte Fahrzeuge angesprochen werden konnten. So konnten Analysen zur technischen Systemgrenze und zum Regelverhalten großer Fahrzeugpools umgesetzt werden, wobei für den SchwarmDirigent® dabei nicht erkennbar ist, ob reale oder simulierte Fahrzeuge angesprochen werden. Dadurch lassen sich aussagekräftige Analysen durchführen.

Für den ÜNB ist ein wiederkehrendes, systematisches Regelverhalten wichtig. Dieses wird beispielsweise durch den Abruf bestimmter Leistungsmuster untersucht. In Abbildung 21 wurde ein solches Muster mit einem simulierten Fahrzeugpool von 500 Fahrzeugen nachgestellt. Die erkennbare rampenförmige Leistungszunahme bzw. Leistungsabnahme wird durch einen zeitlich versetzten Abruf der Einzelfahrzeuge erreicht und lässt sich durch entsprechende Parameter im SchwarmDirigent[®] einstellen. Damit lassen sich die Anforderungen der ÜNB hinsichtlich beliebiger Gradienten erfüllen.

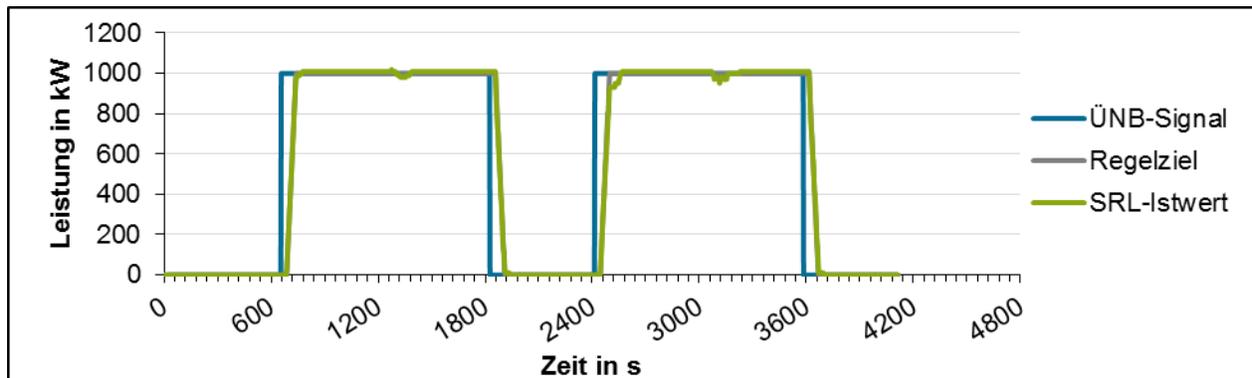


Abbildung 21: Abrufverhalten in der Simulation – von den ÜNB gefordertes Abrufmuster

Mit dem Simulationssystem wurden zudem verschiedene Extremszenarien nachgestellt. Beispielsweise wird immer wieder angebracht, dass es zu einer unvorhersehbaren, gleichzeitigen Abfahrt vieler Fahrzeuge kommen könnte. Die Möglichkeit des SchwarmDirigent[®], in diesen Situationen mit dem Abruf weiterer verfügbarer Fahrzeuge reagieren zu können, wurde untersucht und ist in Abbildung 22 dargestellt. In diesem Szenario wurde eine spontane Abfahrt von 20 Prozent der Poolfahrzeuge untersucht. Im Vergleich zu sonstigen SRL-Pools entspricht dies einem Ausfall an technischen Einheiten, die sich in der SRL-Erbringung befinden. Es ist zu sehen, dass der kurzfristige Leistungseinbruch nach der spontanen Abfahrt nach ca. 30 Sekunden zu 95 Prozent wieder ausgeglichen werden konnte. Der SchwarmDirigent[®] ruft dazu weitere verfügbare Fahrzeuge ab, die sich bis dahin nicht in der SRL-Erbringung befanden.

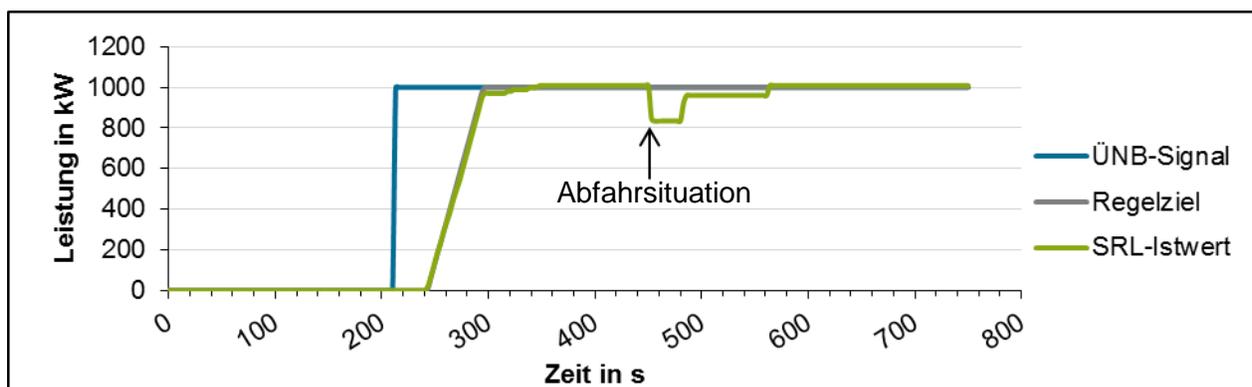


Abbildung 22: Abrufverhalten in der Simulation – spontanes Abfahren von 20 Prozent der Fahrzeuge

Zuletzt wurde mittels der Simulation ein historisches SRL-Signal abgefahren. Auch hier zeigt sich ein reproduzierbares, zuverlässiges Regelverhalten des Fahrzeugpools, wie in Abbildung 23 dargestellt.

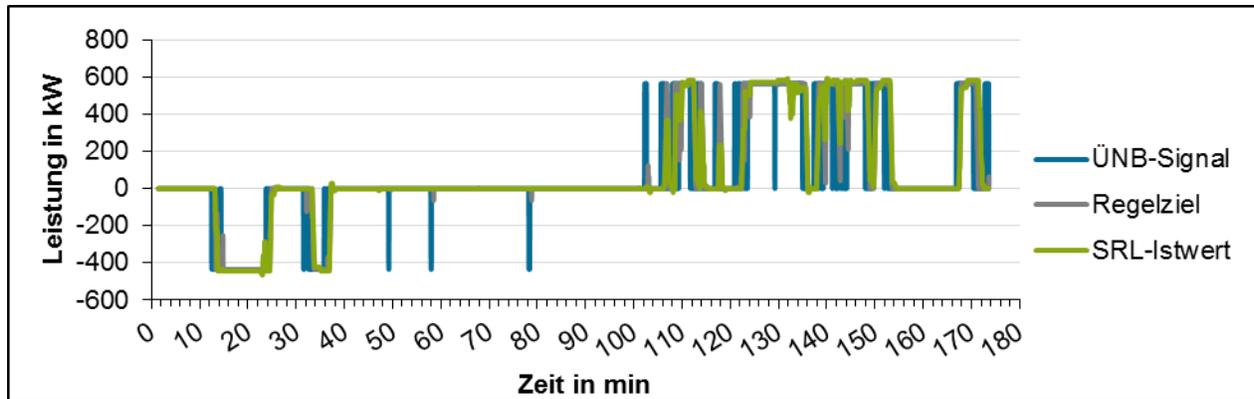


Abbildung 23: Abrufverhalten in der Simulation – historisches SRL-Signal

Mit den Erkenntnissen des Feldtests sowie den begleitenden Simulationen konnte ein Regelverhalten entsprechend den Anforderungen der ÜNB nachgewiesen werden.

4.4.2 Auffälligkeiten und Optimierungsmöglichkeiten

Vor einer näheren Beschreibung zu Auffälligkeiten und Optimierungsmöglichkeiten einzelner Komponenten und Systeme soll zunächst die beobachtete Situation im Feldtest hinsichtlich der tatsächlichen Verfügbarkeit der Fahrzeuge dargestellt werden.

Während des Feldtests standen maximal 20 Elektrofahrzeuge theoretisch für die Leistungserbringung zur Verfügung. Im Feldtest konnte dieses Potenzial nie ausgeschöpft werden, vielmehr waren durchschnittlich sehr viel weniger Fahrzeuge gleichzeitig verfügbar. Das theoretische Potenzial wird zum einen systembedingt eingeschränkt, durch das Nutzerverhalten (Fahrzeuge sind nicht gesteckt, Batteriekapazität wird nicht freigegeben). Zum anderen ist die Einschränkung des Potenzials auf technische Probleme der Systeme zurückzuführen. So standen im Fehlerfall während des Feldtests viele Fahrzeuge zur Leistungserbringung trotz physischer Verbindung mit der Ladestation nicht zur Verfügung. Nachts, in der Zeit mit den meisten verfügbaren Fahrzeugen, waren maximal rund 50 Prozent der Fahrzeuge abruffähig, tagsüber oft nur drei bis fünf Fahrzeuge (15 bis 25 Prozent des Pools). Abbildung 24 zeigt einen exemplarischen Wochenverlauf der Poolkapazität im Feldtest.

In einem ausgereiften System ohne technische Probleme ist zu erwarten, dass nachts rund 80 bis 90 Prozent der Fahrzeuge verfügbar sind, tagsüber (je nach Fahrerhalten des Pools bzw. Ausstattung mit Arbeitgeberladestationen) rund 30 bis 45 Prozent (siehe Kapitel 6.1.2).

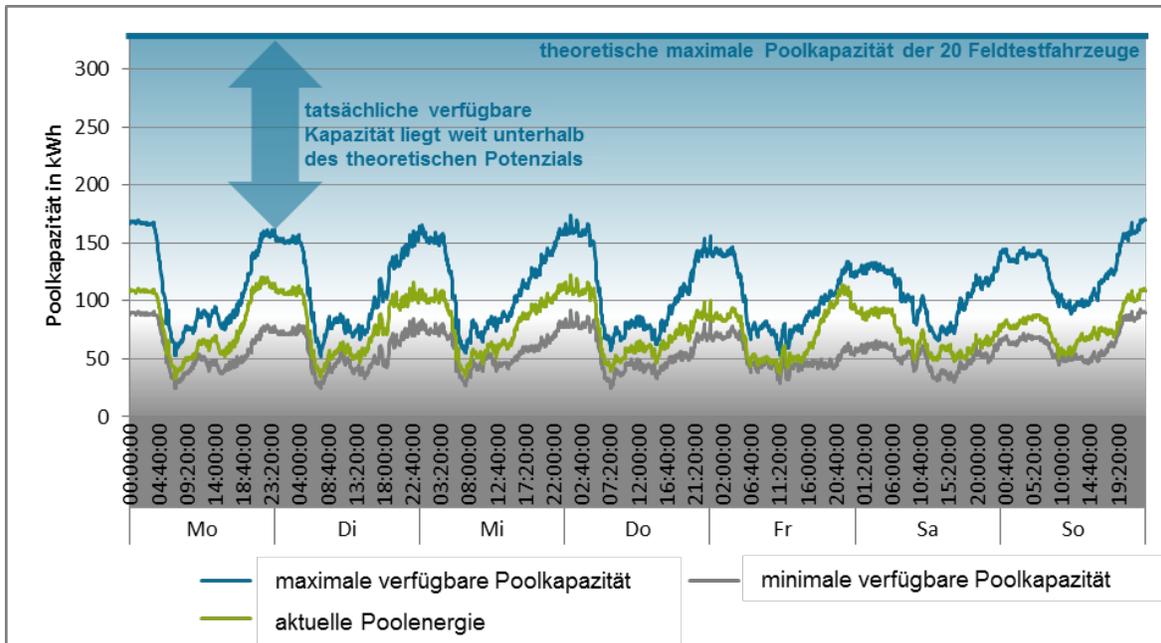


Abbildung 24: Exemplarischer Wochenverlauf der verfügbaren Kapazität der Feldtestfahrzeuge im Vergleich zum theoretischen Potenzial

Komponente Fahrzeug und Ladestation

Für die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Volkswagen-Backend-Server wurde die Car-Telematik-Box genutzt, die über eine zusätzliche Antenne im Fahrzeug eine Mobilfunkverbindung zum OEM-Server herstellte. Dieser wurde eigens für das Forschungsprojekt aufgesetzt und nicht durch Maßnahmen wie eine redundante Auslegung speziell abgesichert. Die Online-verfügbarkeit der Fahrzeuge war generell hoch, einige aufgetretene Ausfallzeiten sind auf die proprietäre Einbindung der Forschungskomponenten zurückzuführen und können für einen größeren Fahrzeugpool leicht durch den Einsatz stabiler kommerzieller Produkte ausgeschlossen werden.

Dazu gehören z. B. Instabilitäten beim Versand einer SMS zwischen Server und Fahrzeug durch das verwendete SMS-Gateway, Abschaltungen bei geplanten Instandhaltungsarbeiten am Server und bei Serverupdates, Versionskonflikte bei Updates von Server und Fahrzeugen im Feld und fehlende Mobilfunkabdeckungen aufgrund des Einsatzes einer SIM-Karte nur eines Mobilfunkanbieters oder technologischer Randbedingungen an einzelnen Einsatzorten.

In der Anfangsphase des Flottenversuches führte ein Softwarefehler der Forschungskomponente Car-Telematik-Box des Fahrzeugs und der Ladestation zu einem ungewollten Entladen der 12-V-Bordbatterie. Dies führte bei einigen INEES-Nutzern in den ersten Tagen zu einer Tiefenentladung der Bordnetz batterie und damit zum Liegenbleiben der Fahrzeuge. Der Fehler konnte mittels Updates schnell behoben werden.

Eine größere Herausforderung stellte die Kommunikation zwischen Fahrzeug und prototypischer Ladestation dar. Dies führte teilweise dazu, dass der von den INEES-Teilnehmern eingestellte Wunschladezustand nicht erreicht wurde. Die Behebung der vielen unterschiedlichen Ursachen für den Fehler war ein großer Arbeitsschwerpunkt während der Projektlaufzeit. Folglich wurde das System stetig stabiler. Allerdings konnte mit den verfügbaren Ressourcen bis zum Ende des Flottenversuches keine vollständige Fehlerfreiheit erreicht werden.

System SchwarmDirigent®

Neben den Hardwarelösungen besteht auch bei der Steuerung und Regelung des Gesamtsystems durch den SchwarmDirigent® und bei den nachgelagerten energiewirtschaftlichen Prozessen Optimierungspotenzial. Dabei kann unterschieden werden zwischen zwingend für das Zielsystem umzusetzende Maßnahmen zur Erfüllung der Präqualifikationsanforderungen aus der SRL und optionalen Anpassungen, die das System schneller, flexibler, stabiler und robuster machen. Weiterhin wurden vom ÜNB geforderte Absicherungsmaßnahmen durch Drittanlagen oder Fahrplankorrekturen am Intradaymarkt im Projekt nicht umgesetzt. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die wichtigsten Einschränkungen im Feldtest.

Tabelle 2: Einschränkungen im Feldtest

Eigenschaft	Funktion	Status im Projekt	Folgen
Ruhezustand der Fahrzeuge verhindern	schnelle Reaktion	nicht umgesetzt	Erstreaktion aus dem Ruhezustand erst nach bis zu. 4,5 Minuten
gemischte Pools, Absicherung der Leistung	Back-up bei Nichtverfügbarkeit/Dauerabruf	nicht berücksichtigt	ggf. zu wenig EVs zur Erbringung verfügbar
Korrektur am Intradaymarkt	Füllstandskorrektur	nicht berücksichtigt	Poolbatterie für Erbringung ggf. zu voll/zu leer
dynamisches Wechseln der TE	Leistungseinbrüche durch Wechsel der Fahrpläne vermeiden	nicht umgesetzt	Poolneuplanung nach Ablauf der Fahrpläne mit kurzen Pausen; Einbrechen der Leistung durch Voll-/Leerlaufen der Batterien

Eine besondere Herausforderung im Projekt INEES waren die Abbildung von im Ruhezustand befindlichen Fahrzeugen und das Reaktivieren über die Betriebssteuerung des Poolmanagers. Angeschlossene Fahrzeuge wechseln nach einer kurzen Zeitspanne der Inaktivität selbstständig in einen Ruhezustand und trennen sich kommunikativ und elektrisch von der Ladestation. Eine erneute Netzkopplung kann bis zu 300 Sekunden betragen, da verschiedene Prüf- und Sicherheitsphasen vor der Wiederverbindung mit dem Stromnetz durchgeführt werden müssen. Für die SRL-Erbringung ist eine Reaktion unter 30 Sekunden erforderlich, sodass im Zielsystem eine deutlich schnellere Wiederaufnahme der Leistungserbringung nötig würde. Mögliche Lösungen wären das künstliche Wachhalten eines Mindestanteils der Fahrzeuge oder eine technische Möglichkeit zur Vermeidung der langwierigen Reinitialisierungsprozesse.

Weiterhin besteht Anpassungsbedarf im Regelalgorithmus bei der Rückführung der Leistung auf die Sollleistung bei einer Störung, wie z. B. dem spontanen Abfahren von Fahrzeugen. Dieses erfolgte im Projekt zwar zuverlässig, aber verzögert. Ebenso kann das Anfahren des gewünschten Arbeitspunktes durch geringe Anpassungen am SchwarmDirigent® präzisiert und beschleunigt werden.

Besondere Abrufcharakteristiken wie sehr kurze oder statische Abrufe sollten im Zielsystem robuster behandelt werden, wozu der Steuerungsalgorithmus anzupassen ist. Im Projekt kam es bei sehr langen Abrufen (> 10 Minuten) zu Leistungsabweichungen, die in der Gültigkeitsdauer

der Fahrpläne begründet waren. Bei sehr kurzen Abrufen sollte das Regelverhalten plausibilisiert werden. Abbildung 25 zeigt anhand einer exemplarischen Systemantwort auf ein Doppelhöckersignal die Auswirkungen der angesprochenen Einschränkungen auf.

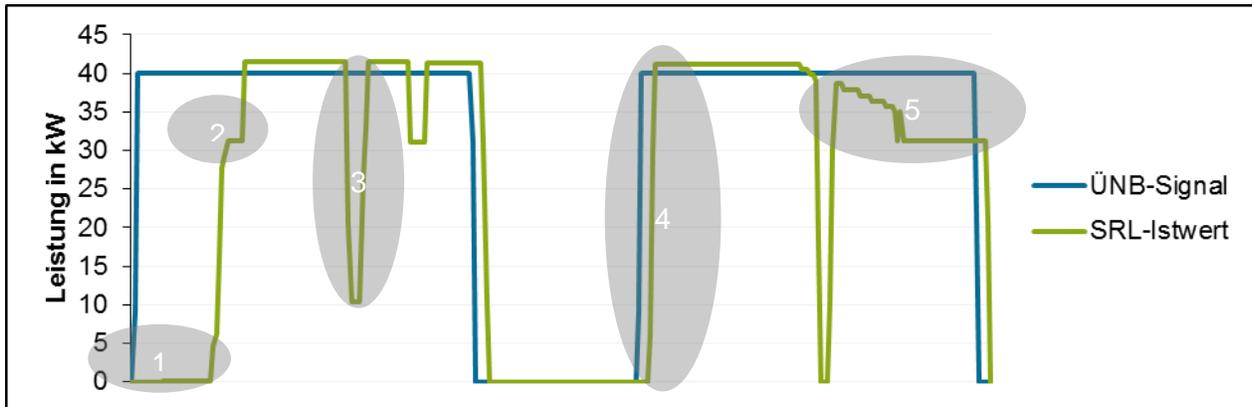


Abbildung 25: Eingeschränkte Leistungsantwort auf Doppelhöcker-Sollsignal im Feldtest
(1) Verzögerte Erstreaktion, da sich die Fahrzeuge anfangs im Ruhezustand befinden.
(2) Stufenlose Leistungsmodulation gelingt nur eingeschränkt.
(3) Begrenzte Gültigkeit der Fahrplansignale führt nach ca. 10 Minuten zum Leistungs-einbruch.
(4) Die Fahrzeuge sind nun im Stand-by und reagieren schneller als im Ruhezustand.
(5) Volle Batterien schränken die Erbringung ein. Lösung: Gegenhandeln am Intradaymarkt.

Ungeachtet der ermittelten Optimierungsmöglichkeiten haben die Auswertungen aus Feldtest und Simulation ergeben, dass die implementierte Poolsteuerung grundsätzlich in der Lage ist, die qualitativen Anforderungen in Bezug auf SRL zu erfüllen. Der Pool zeigt dabei ein sehr reproduzierbares Verhalten. Die Reaktionszeiten (Latenzen) liegen in der Größenordnung der Präqualifikationsanforderungen, müssen jedoch für den Produktivbetrieb durch technische Maßnahmen herabgesetzt werden. Eine konstante Rampensteigung konnte dargestellt werden und entspricht den Anforderungen.

4.4.3 Vorbereitung zur Präqualifikation des Gesamtkonzeptes

Bei der Erbringung von Regelleistung erhält entweder der ÜNB direkten Zugriff auf die technische Einheit, die Regelernergie im Bedarfsfall erbringen soll (Einzelansteuerung), oder aber er erhält Zugriff auf eine Leitstelle des Anbieters, die einzelne Anlagen bündelt (Poolansteuerung). Das Prinzip der Poolansteuerung wird im Falle kleinerer Anlagen eingesetzt, die nur im Zusammenschluss die geforderte Mindestleistung und einen wirtschaftlichen Betrieb erreichen. Im Projekt wurde für die Poolansteuerung ein entsprechendes Leitstellensystem (SchwarmDirigent[®]) entwickelt und im praktischen Feldtest sowie in Simulationen getestet. Die Erkenntnisse aus diesen Tests wurden in einem beispielhaften Präqualifikationsprozess analysiert und diskutiert. Ziel war es, eine allgemeingültige, von Elektrofahrzeug- und Ladestationstyp unabhängige Aussage zu treffen, inwieweit sich in einem Pool zusammengeschlossene Elektrofahrzeuge für die Erbringung von Sekundärregelleistung eignen.

Grundsätzlich werden in einem Präqualifikationsprozess die Anforderungen der ÜNB an regelergieerbringende Einheiten sowie das Anbieterleitsystem in Form von Testläufen oder Systembeschreibungen untersucht. Die Anforderungen werden von den ÜNB im *Transmission Code 2007 Netz- und Systemregeln der deutschen Übertragungsnetzbetreiber* und begleitenden Dokumenten beschrieben (siehe auch Kapitel 4.1.1). Im Folgenden sollen die wesentlichen Erkenntnisse des beispielhaft durchgeführten Präqualifikationsprozesses dargestellt werden.

In Kapitel 6.1.2 wird dargestellt, welches Regelleistungspotenzial mit einem Elektrofahrzeugpool angeboten werden kann und welche Faktoren es beeinflussen. Bei kleineren, dezentralen Batteriespeichern im Allgemeinen und insbesondere bei Elektrofahrzeugen mit Ladeleistungen über 3,7 kW ist die begrenzte Arbeitsfähigkeit des Pools im Kontext der Erbringung von Regelleistung eine Herausforderung. Die angebotene Regelleistung muss durch den ÜNB über den gesamten Zeitraum abrufbar sein. Dies macht im Falle von Elektrofahrzeugpools ein aktives Management des Poolfüllstandes unerlässlich. Zunächst sind daher relevante Poolparameter, die den zukünftigen Verlauf des Füllstands der Poolbatterie sowie deren Arbeits- und Leistungsvermögen beschreiben, zu prognostizieren. Im Projekt ist erstmals ein Konzept zur Prognose dargestellt. Feldtestdaten ermöglichen wichtige Aussagen hinsichtlich einer Güte der angestellten Prognose. So ist eine sichere Prognose insbesondere bei großen Fahrzeugpools ab 500 Fahrzeugen möglich. Im Feldtest wurde für beide Testgruppen ein wiederkehrendes Mobilitäts- und Nutzerverhalten identifiziert, welches die Voraussetzung für eine Prognose darstellt.

Das Management des Speicherfüllstands der Poolbatterie lässt sich über die Interaktion am Intradaymarkt ermöglichen. Das Ausnutzen des Regelleistungspotenzials, die sichere Prognose sowie das Handeln am Intradaymarkt würden mit geänderten regulatorischen Rahmenbedingungen der ÜNB vereinfacht. Insbesondere sind hier die Verkürzung der Angebotszeitscheiben von 12 Stunden auf vier Stunden oder aber tägliche Ausschreibungszeiträume zu nennen.

Das im Rahmen des Projekts aufgebaute und während des Feldtests erprobte IT-Gesamtsystem mit seinen Komponenten Ladestation und Fahrzeug wurde hinsichtlich der technischen Anforderungen der ÜNB bewertet. Hier ist insbesondere das beobachtete Regelverhalten zu nennen. Der Fahrzeugpool konnte im Feldtest mit der geforderten Geschwindigkeit, Genauigkeit und wiederkehrenden Systematik angesteuert werden, siehe dazu Auswertungen in Kapitel 4.4.1. Damit konnte die Frage, ob sich dezentral verteilte und über Mobilfunk zentral angesprochene Einheiten für die Erbringung von Regelleistung eignen, positiv beantwortet werden. Zentrale ÜNB-Anforderungen sind auch an die regelleistungserbringenden, technischen Einheiten gestellt. Im Projekt konnte nicht abschließend geklärt werden, was im Kontext der Elektromobilität als technische Einheit definiert wird. Ist es eine Kombination aus Elektrofahrzeug und Ladestation, so ist in einem späteren Massenmarkt die Präqualifikation bezogen auf die verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten nicht praktikabel. Dies wäre allerdings auch nicht zweckdienlich, da in einem sehr kleinteiligen Pool die einzelnen technischen Einheiten die Eigenschaften dieses Pools nur unwesentlich beeinflussen.

In dem zum Transmission Code 2007 begleitenden Dokument *Mindestanforderung an die Informationstechnik des Anbieters für die Erbringung von SRL* werden grundlegende Punkte zur Sicherheit der Datenübertragung oder Verfügbarkeit der IT-Systeme definiert. Mit Bezug auf das IT-System im Feldtest liegt eine offene Herausforderung in der ausschließlichen Nutzung der Kommunikationsstrecke zum Zwecke des SRL-Datenaustausches, da beispielsweise Nutzerinformationen ebenfalls über die Mobilfunkanbindung der Fahrzeuge übermittelt werden (siehe Abbildung 7). Alle anderen gestellten Anforderungen ließen sich mit dem dargestellten System perspektivisch erfüllen.

Die Leitstelle des Anbieters tauscht mit der betriebsführenden Stelle des ÜNB ständig (Zustands-)Informationen aus. Ganz wesentlich ist die Meldung der momentanen Istleistung des Pools, welche sich wiederum aus den Einzelleistungen der technischen Einheiten ergibt. Im Projekt wurde erstmals für Elektrofahrzeuge ein Konzept zur Ermittlung der Istleistung je Netzanchlusspunkt angewendet, welches auf eine zusätzlich verbaute Messeinrichtung je Installation verzichtet. Ziel ist es, damit einen effizienten und kostengünstigen Betrieb zu gewährleisten und gleichzeitig bereits existierende Infrastruktur zu verwenden.

Im Projekt wurde die momentane Ladeleistung vom Fahrzeug an LichtBlick zustandsbasiert übermittelt. Durch die Meldung der Werte bei Leistungsänderung konnte der Datenverkehr minimiert werden, was insbesondere bei großen Pools in einem Massenmarkt relevant wird. Anhand der im Feldtest gewonnenen Daten konnte gezeigt werden, dass mit dieser Systematik die Pool-Istleistung mit der von den ÜNB geforderten Genauigkeit ermittelt werden kann. Zukünftig könnte auch die Ladestation für die Erfassung der Istleistung genutzt werden, indem sie die im Ladestationsgerät für die Geräteregeleung und -betriebsführung gemessenen, hochaufgelösten Messwerte der aktuellen Leistung über eine entsprechende Schnittstelle für die Poolbetriebsführung zur Weiterleitung an den ÜNB zur Verfügung stellt. Durch eine entsprechende Typzertifizierung der Ladestation kann die erforderliche Güte (Zuverlässigkeit, Genauigkeit, Manipulationssicherheit usw.) sichergestellt werden, und über den ohnehin an jedem Wechselrichter vorhandenen Internetanschluss mit Verbindung zum Gerätehersteller ist auch die kommunikationstechnische Anbindung bereits gegeben.

5 Nutzerakzeptanz

Die Erforschung zur Nutzerakzeptanz stellte einen wesentlichen Forschungsschwerpunkt im Projekt dar. Die energiewirtschaftliche Nutzung der Fahrzeugbatterien darf die Mobilitätsanforderungen der Nutzer nicht einschränken. Dazu müssen Nutzerwünsche beim Einsatz der Fahrzeuge berücksichtigt werden. In Abschnitt 5.1 ist das im Projekt umgesetzte Konzept zur Einbindung der Nutzer sowie deren Vergütung dargestellt. In Abschnitt 5.2 ist die Erprobung im Feldtest beschrieben. Wesentliche Erkenntnisse zum Nutzerverhalten (Akzeptanz des umgesetzten Konzepts, beobachtetes Nutzerverhalten) sind in Abschnitt 5.3 zu finden.

5.1 Konzepterstellung

5.1.1 Konzeptionierung einer Nutzerschnittstelle

Die Akzeptanz der energiewirtschaftlichen Be- und Entladung der Fahrzeuge durch die INEES-Teilnehmer ist ein entscheidender Einflussfaktor auf den Erfolg der energiewirtschaftlichen Einbindung. Dazu gehört, dass alle benötigten Einstellungen möglichst intuitiv und einfach vorgenommen werden können. Hierfür wurde eine Mobiltelefon-Applikation entwickelt, über die die Teilnehmer alle notwendigen Einstellungen vornehmen konnten. Durch die Nutzung bekannter Elemente aus anderen Onlinediensten sollte für die INEES-Teilnehmer bereits nach einer kurzen Eingewöhnungsphase ein sicherer Umgang mit dem System ermöglicht werden.

Abbildung 26 zeigt zur Illustration der Ergebnisse Screenshots des finalen Konzeptes der INEES-Nutzerschnittstelle.



Abbildung 26: Finales Konzept der INEES-Nutzerschnittstelle

Ein zentraler Bestandteil der Nutzerschnittstelle ist der sogenannte „e-Manager“. In diesem kann der Nutzer beispielsweise seinen Batteriefüllstand überprüfen und einen sofortigen Ladevorgang starten. Zusätzlich werden in diesem Menü Statusmeldungen zum Ladezustand angezeigt. Im Bereich „Klima“ kann der Nutzer grundlegende Einstellungen zur Fahrzeugklimatisierung vornehmen und jederzeit einen Klimatisierungsvorgang starten. Dadurch kann das Fahrzeug bereits vor Fahrtantritt auf die eigene Wunschtemperatur klimatisiert werden. Ist das Fahrzeug mit

einer Ladestation verbunden, so wird die notwendige elektrische Energie aus dem Stromnetz aufgenommen, und der Batteriefüllstand bleibt erhalten.

Im Bereich „Abfahrtszeit“ können beliebig viele Abfahrtszeiten eingestellt werden. Zu diesen Abfahrtszeiten kann ein Wunschfüllstand angegeben werden, auf den die Batterie geladen sein soll. Weiterhin kann der Wunsch für eine Vorklimatisierung zum Abfahrtszeitpunkt in diesem Bereich eingegeben werden.

Im Bereich „INEES“ können Einstellungen vorgenommen werden, die spezifisch das Projekt und die bidirektionale Anbindung zur Erbringung von Systemdienstleistungen betreffen. Dazu gehört eine Eingabe des allgemeinen Mindestfüllstands über einen Schieberegler. An diesem ist in Blau der „reservierte“ und in Grün der „freigegebene Bereich“ gekennzeichnet. Da der Nutzer für die Freigabe seiner Batteriekapazität eine Prämie erhalten soll, die von der jeweiligen Höhe seiner Freigabe abhängig ist, erhält er in diesem Bereich ebenso eine Übersicht über die bereits verdiente Prämie sowie eine Prognose über die zukünftige Prämie bei gleichbleibender Einstellung.

5.1.2 Konzeptionierung eines Anreizsystems

Für den Erfolg der energiewirtschaftlichen Einbindung der Elektrofahrzeuge sind drei Faktoren entscheidend:

1. Die Elektrofahrzeuge müssen möglichst häufig mit der Ladestation verbunden werden.
2. Es muss ein Teil der Batteriekapazität freigegeben werden.
3. Zukünftige Abfahrtszeiten sollten geplant werden.

Der Beitrag eines einzelnen Elektrofahrzeugs zur energiewirtschaftlichen Einbindung des Pools aller Fahrzeuge hängt daher entscheidend von der Fahrzeugnutzung ab. So bietet z. B. ein Fahrzeug, das ausschließlich zum Nachladen an die Ladestation angeschlossen wird, kein Potenzial zur energiewirtschaftlichen Optimierung. Optimal ist es, das Fahrzeug während jeder Standzeit mit der Ladestation zu verbinden, einen geringen Mindestfüllstand einzustellen und die Ladung zur nächsten Abfahrt über eine Abfahrtszeit zu programmieren.

Daher soll die Prämie für die Nutzer so ausgestaltet werden, dass ein hoher Beitrag zur energiewirtschaftlichen Optimierung auch mit einer hohen Prämie vergütet wird. Dabei soll sichergestellt werden, dass der Einfluss der Nutzer auf die Prämienhöhe nachvollziehbar und verlässlich ist.

Zu Beginn des Projekts INEES wurden daher Workshops mit potenziellen Nutzern durchgeführt, in denen verschiedene Möglichkeiten zur Gestaltung eines Prämiensystems vorgestellt und diskutiert wurden. Dabei hat sich gezeigt, dass viele Nutzer über eine reine Prämie hinaus Interesse an Informationen zu ihrem eigenen Beitrag zur energiewirtschaftlichen Optimierung und dem gesamtheitlichen Umweltnutzen des Pools haben.

Für die Feldtestphase wurde daher das Prämiensystem, das Abbildung 27 zeigt, gewählt. Da der Wert der energiewirtschaftlichen Optimierung sich im Zeitverlauf ändert, wird die allgemeine Prämienhöhe monatlich über einen SchwarmStrom[®]-Faktor festgelegt. Der Anteil eines einzelnen Nutzers berechnet sich dann aus Faktoren für die Anschlusszeit an die Ladestation und die freigegebene Kapazität.

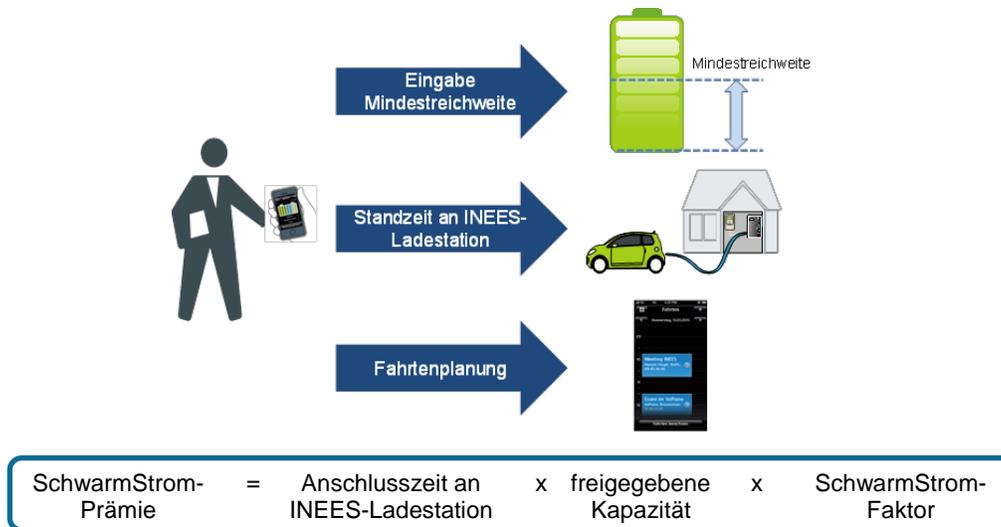


Abbildung 27: Parameter des Anreizsystems

Aufbauend auf den Erfahrungen aus dem Feldtest wird es künftig möglich sein, zusätzliche Faktoren zu berücksichtigen. Dazu gehört z. B. ein Faktor für die Planungsgüte, also des Unterschieds zwischen geplantem und tatsächlichem Abfahrtszeitpunkt. Auf diesen Punkt wurde zunächst zur Reduzierung der Komplexität verzichtet.

Zu Beginn des Projekts INEES war nicht bekannt, welches Potenzial zur energiewirtschaftlichen Optimierung bereitgestellt werden würde. Zur Festlegung des ersten SchwarmStrom[®]-Faktors wurde daher zunächst angenommen, dass für jeden Teilnehmer eine Prämie von durchschnittlich 6 €/Monat dargestellt werden kann. Dies gilt für einen Teilnehmer, der sein Fahrzeug 17 Stunden am Tag an eine INEES-Ladestation anschließt und 50 Prozent seiner Kapazität freigibt.

Mit zunehmenden Erkenntnissen über die tatsächliche Anschlusszeit der INEES-Teilnehmer und die Freigabe aus dem Flottenversuch wurde dieser Faktor angepasst.

Diese Prämie wird den INEES-Teilnehmern sowohl auf ihrer monatlichen Stromrechnung als auch täglich aktualisiert in der Mobiltelefon-Applikation angezeigt. Weiterhin werden in der Applikation Informationen über den Beitrag eines Nutzers zur Leistung des Gesamtpools sowie den Umweltnutzen des Gesamtpools angezeigt. Abbildung 28 zeigt die zugehörigen Anzeigebildschirme.



Abbildung 28: Screenshots der Umsetzung des konzeptionierten Anreizsystems in der Mobiltelefon-Applikation

Ein Kernbestandteil der Anzeige ist die Fahrstromrechnung. Sie verschafft dem INEES-Teilnehmer einen Überblick über den Fahrstrom, der zur Deckung des Mobilitätsbedürfnisses genutzt wurde, und die dafür anfallenden Kosten. Weiterhin wird die im laufenden Monat bereits erhaltene Prämie angezeigt und die Gesamtsumme ermittelt. Dadurch hat der INEES-Teilnehmer jederzeit einen vollständigen Überblick über seine anfallenden Kosten.

Der Bereich „Rang“ zeigt einen Vergleich der verdienten Prämie mit den anderen Teilnehmern am Projekt INEES. Durch diesen Vergleich soll dem Nutzer ermöglicht werden, sein eigenes Verhalten und den Erfolg mit den anderen Teilnehmern zu vergleichen. In Verbindung mit einem Austausch unter den Nutzern soll dies dazu beitragen, dass eventuelle Optimierungspotenziale entdeckt und genutzt werden.

Der Bereich „Erfolg“ stellt den Nutzern auf spielerische Art weitere Informationen zum allgemeinen Nutzen des Projektes INEES zur Verfügung. Weiterhin werden konkrete Tipps zur Verfügung gestellt, wie die erhaltene Prämie erhöht werden kann. Diese Informationen und Tipps werden auf spielerische Weise in Form von „Levels“ nach Erreichen eines definierten Prämien-schwellwertes freigeschaltet.

Im Bereich „Spende“ besteht die Möglichkeit, einen beliebigen Teil der eigenen Prämie zu spenden. Hier sieht der Nutzer eine Übersicht über seine bisherige Gutschrift und die bisherige Spendensumme. Über eine Auswahl kann der Nutzer über die weitere Verwendung der in Zukunft gesammelten Spende entscheiden. Schließlich sieht der Nutzer die Gesamtsumme, die von allen Nutzern gespendet wurde.

5.2 Erprobung im Feldtest

5.2.1 Teilnehmerauswahl

Ein Ziel des INEES-Flottenversuchs war es, herauszufinden, inwieweit Nutzer bereit sind, einen Teil ihrer Batteriekapazität für eine energiewirtschaftliche Nutzung freizugeben. Dabei ist es sehr wichtig zu beachten, dass die Bereitschaft zur Freigabe stark von den persönlichen Rahmenbedingungen abhängt.

Daher ist eine Aufgabe der Teilnehmerauswahl, sicherzustellen, dass eine breite Vielfalt an Mobilitätsbedürfnissen abgedeckt wird. Andererseits gibt es einige grundlegende Anforderungen, die z. B. zur Installation einer INEES-Ladestation erfüllt sein müssen. Diese grundlegenden Anforderungen waren im Flottenversuch INEES:

- Eigenheim mit Stellplatz in Berlin
- Möglichkeit und Bereitschaft zur Installation einer INEES-Ladestation am Stellplatz
- Führerschein der Klasse B
- regelmäßiger Arbeitsplatz (falls zutreffend) in Berlin
- optional: Stellplatz an regelmäßiger Arbeitsstätte mit Möglichkeit zur Installation einer Ladestation

Basierend auf diesen Kriterien wurde unter allen Interessierten an der Teilnahme eine Vorauswahl getroffen. Darauf aufbauend wurden alle Interessierten mithilfe eines Fragebogens hinsichtlich ihrer Mobilitätsbedürfnisse befragt. Ein Ziel dieser Befragung war es, ein ausgewogenes Verhältnis der folgenden Mobilitätstypen am Flottenversuch zu erzielen:

- Pendler
- Pendler mit einer Möglichkeit zur Installation einer Ladestation am Arbeitsort
- Selbstständige und Personen mit unregelmäßigen Mobilitätsbedarfen

Abbildung 29 zeigt die Zusammensetzung der beiden Teilnehmergruppen auf Basis der Angaben aus dem Fragebogen.

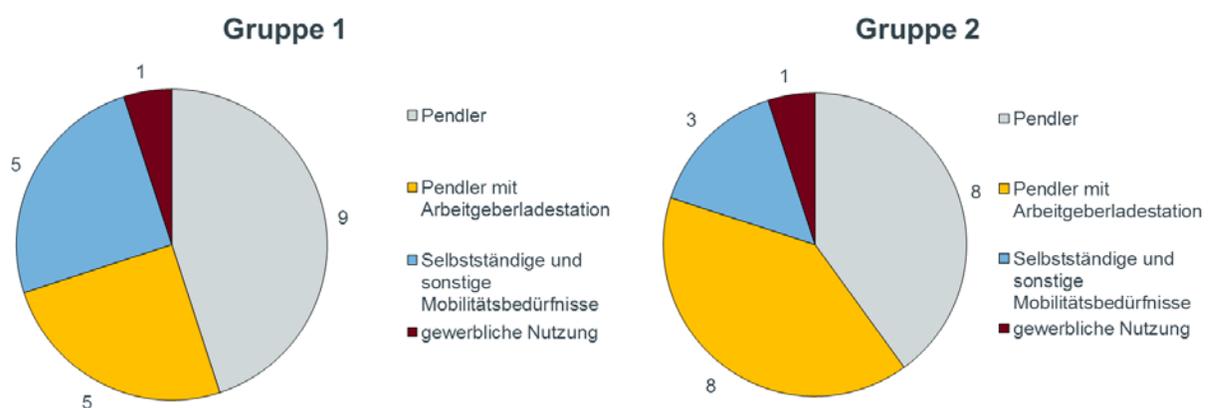


Abbildung 29: Zusammensetzung der Teilnehmergruppen

5.2.2 Begleitbefragung und Anreizsystem im Flottenversuch

Im Rahmen des Flottenversuchs wurden die Nutzer begleitend zur Erprobung des Systems regelmäßig zu ihren Erfahrungen und ihrer Zufriedenheit mit dem System befragt. Dadurch sollte auch eine Überarbeitung der Systeme für die zweite Teilnehmergruppe aufbauend auf den Erfahrungen der ersten Teilnehmergruppe ermöglicht werden.

Grundlage der Befragungen bildet eine Methodentriangulation, bei der verschiedene Methoden bzw. Sichtweisen auf ein Forschungsthema angewendet werden. Ziel ist es, eine höhere Validität der Forschungsergebnisse zu erreichen und systematische Fehler zu verringern.

Im Rahmen der Studien kamen dazu sowohl quantitative Methoden (Onlinebefragungen) sowie qualitative Methoden (persönliche Interviews, Cultural Probes, Gruppendiskussionen) zum Einsatz. Dabei wurden alle Teilnehmer, außer den Nutzern des Flottenfahrzeugs, jeweils einmal vor der Fahrzeugübergabe, einmal zur Mitte des Flottenversuchs und einmal zum Ende des Flottenversuchs zur Befragung eingeladen. Tabelle 3 zeigt die Resonanz der Teilnehmer auf die einzelnen Befragungen.

Tabelle 3: Teilnehmer an den begleitenden Befragungen

Methode	Bezeichnung	Teilnehmer Gruppe 1 (gesamt n=19)	Teilnehmer Gruppe 2 (gesamt n=19)
Onlinebefragung	T0, CAWI	n=15	n=14
	T1, CAWI	n=16	n=13
	T2, CAWI	n=15	n=16
Persönliches Interview	T0, PI	n=19	n=18
	T1, PI	n=18	n=18
	T2, PI	n=19	n=18
Gruppendiskussion	GD 1	n=5	n=11
	GD 2	n=3	n=8
	GD 3	n=3	

Sowohl die Onlinebefragungen als auch die persönlichen Interviews wurden von einem Großteil der Teilnehmer regelmäßig wahrgenommen. Dadurch war es möglich, viele Anregungen und Verbesserungsvorschläge zu sammeln.

Eine wichtige Fragestellung für das Projekt INEES war, wie die Teilnehmer auch längerfristig motiviert werden können, ihr Fahrzeug regelmäßig mit der Ladestation zu verbinden, einen Teil ihrer Batteriekapazität freizugeben und ihre Abfahrtszeiten zu planen. Dazu wurden u. a. unterschiedliche Prämienhöhen erprobt. Die Teilnehmer der ersten Gruppe erhielten eine vom Nutzungsverhalten abhängige Prämie zwischen 0 und 9 € pro Monat. Die zweite Teilnehmergruppe erhielt eine gestaffelte Prämie von zunächst ebenfalls 0 bis 9 € pro Monat, die zu einem späteren Zeitpunkt erhöht wurde. Die maximale Prämie lag bei etwa 30 € pro Monat für die zweite Gruppe. Bezieht man die Prämie auf die monatlichen Fahrstromkosten, so deckt die Prämie der ersten Gruppe im Mittel nur rund ein Zehntel der Fahrstromkosten. Nach der Anhebung des Prämienniveaus in der zweiten Gruppe konnten im Mittel rund ein Viertel der Kosten gutgeschrieben werden (siehe Abbildung 30).

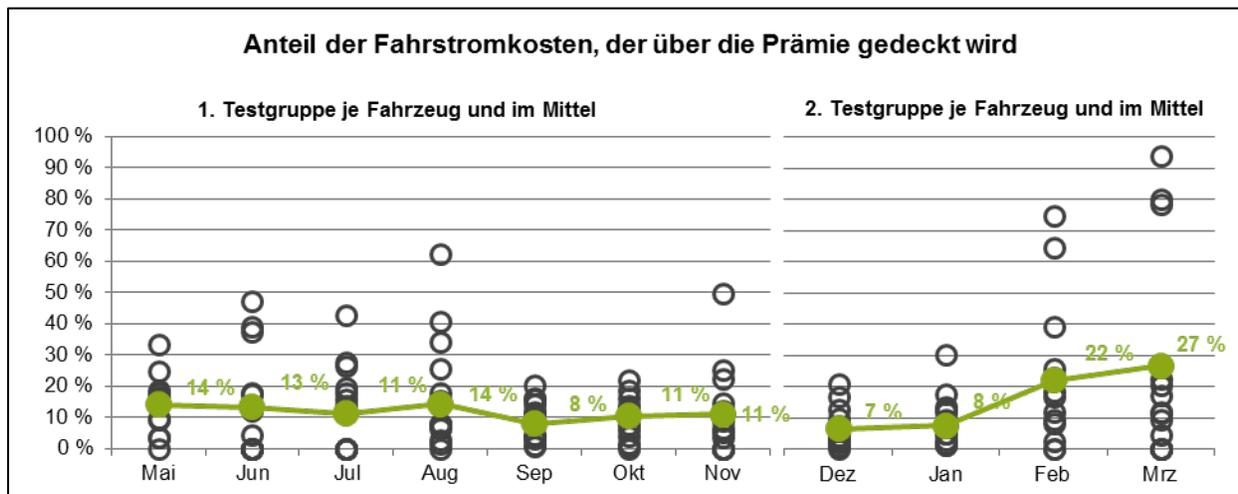


Abbildung 30: Anteil der Fahrstromkosten, der über die Prämie gedeckt wird, Gruppe 1 und Gruppe 2

Die Spendenoption wurde von 66 Prozent der Forschungsteilnehmer genutzt. Insgesamt ergab sich eine Spendensumme von 355 € nach Beendigung der beiden Feldtestphasen. Der gesammelte Betrag sollte einem gemeinnützigen, sozialen Projekt zugutekommen. Hierfür wurde „Die Arche – Christliches Kinder- und Jugendwerk e.V. Berlin“ ausgewählt.

5.3 Erkenntnisse zur Nutzerakzeptanz

5.3.1 Ergebnisse der qualitativen Nutzerbefragung und Datenauswertung

In den Nutzerbefragungen erklärten die Teilnehmer, dass der VW e-up! für die meisten Wegstrecken und -zwecke anstelle des konventionellen Fahrzeugs verwendet wurde. Die Hauptgründe für die Nichtnutzung des VW e-up! waren vor allem das limitierte Platzangebot (Stauraum, Mitfahrer) oder die Notwendigkeit, längere Wegstrecken zurücklegen zu müssen, und damit verbundene Unsicherheiten bezüglich der Reichweite und des Ladezustands. Die regelmäßige Nutzung des Fahrzeugs zeigt sich auch in den zurückgelegten Strecken der Teilnehmer.

In Abbildung 31 sind die Verteilungen der zurückgelegten Strecken und Verbräuche für die Teilnehmer im INEES-Flottenversuch dargestellt. Beide Größen wurden in dieser Darstellung entsprechend der Anzahl von Nutzungstagen im Flottenversuch auf ein Jahr hochskaliert. Im Mittel liegt die Fahrstrecke für alle Nutzergruppen im Bereich von 10.000 bis 11.000 Jahreskilometern und damit auf dem Niveau von Fahrzeugen mit Ottomotor (vgl. Kraftfahrtbundesamt). Dies entspricht einem mittleren Jahresverbrauch im Bereich von 1.396 kWh bis 1.702 kWh. Die Spann-

breite der Nutzungsprofile reicht insgesamt von 1.852 km im Minimum bis zu 23.555 km im Maximum. Für die Alltagsfahrer zeigte sich im Vergleich eine breitere Verteilung der Nutzungshäufigkeiten von 5.446 km (25 Prozent-Quantil) bis zu 13.510 km (75 Prozent-Quantil).

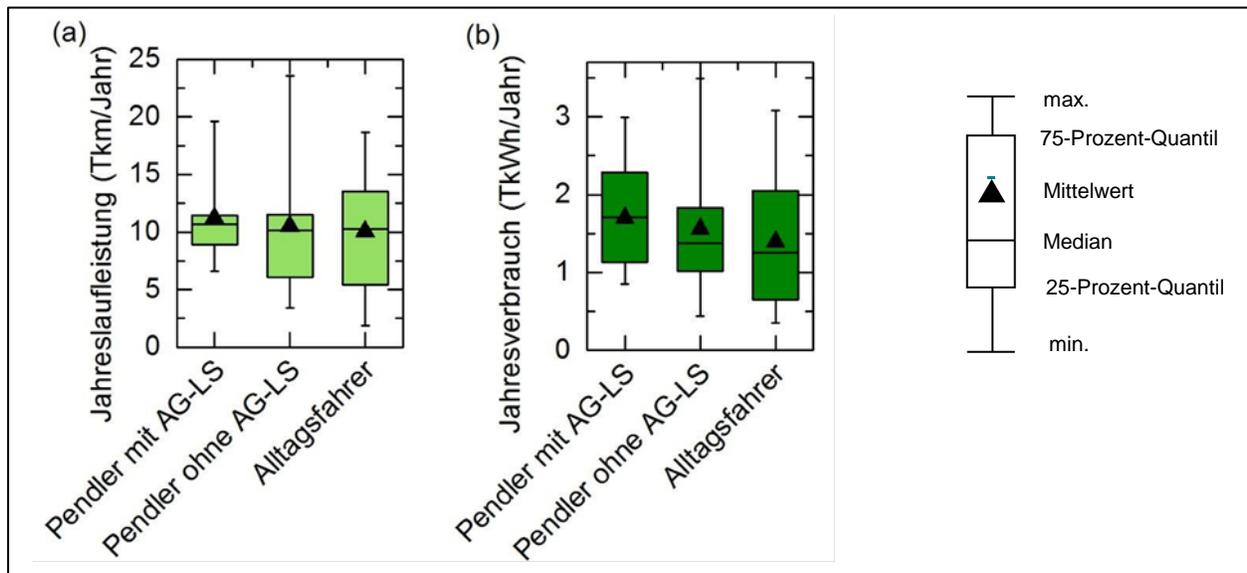


Abbildung 31: Verteilung der skalierten Jahreskilometer (a) und Jahresverbräuche (b) für alle Teilnehmer im INEES-Flottenversuch.

Wie zuvor in Kapitel 5.1.2 beschrieben, ist es für die energiewirtschaftliche Nutzung der Batterie erforderlich, dass die Nutzer einen Teil der Batteriekapazität zur Nutzung freigeben. Dazu wird durch die Teilnehmer ein Mindestfüllstand für spontane Fahrten eingestellt, auf welchen die Batterie immer mindestens geladen sein muss. Der übrige Teil der Batterie kann für das intelligente Laden genutzt werden (abzüglich des Ladevorgangs bei eingestelltem Abfahrtszeitpunkt und Wunschfüllstand, siehe Abbildung 8). Das heißt, die Einstellung des Mindestfüllstands bestimmt im Wesentlichen das verfügbare Speicherpotenzial durch den Pool von Elektrofahrzeugen (in Abbildung 32 dargestellt).

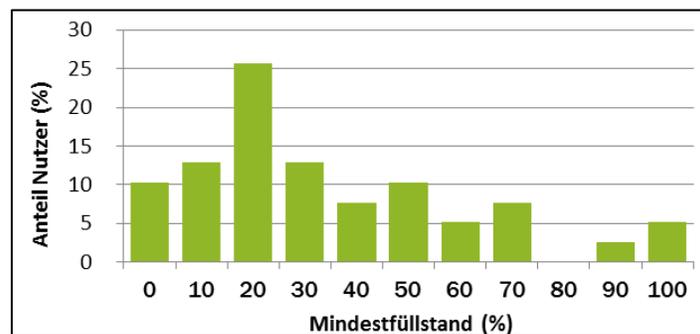


Abbildung 32: Bevorzugte Einstellung des Mindestfüllstands der INEES-Teilnehmer

Die persönliche Freigabegrenze wurde für jeden INEES-Teilnehmer aus dem Abgleich der aufgezeichneten Loggingdaten und den Angaben aus den persönlichen Interviews ermittelt. Im Mittel liegt der Wert bei 34 Prozent. Somit stehen noch 66 Prozent der Batteriekapazität für die energiewirtschaftliche Nutzung bereit. Die Einstellung des Mindestfüllstands war beeinflusst von technischen Problemen beim Ladevorgang der proprietären bidirektionalen Anbindung, welche zu Ladeabbrüchen führte. Einige Teilnehmer berichteten, zur Sicherheit einen höheren Mindest-

füllstand eingestellt zu haben als eigentlich nötig. Sie würden diesen reduzieren, wenn die Technik einen zuverlässigen Serienstand habe. Darüber hinaus können sich die Nutzer laut eigenen Aussagen eine höhere Freigabe von Batteriekapazität vorstellen, wenn die Reichweite des e-Autos größer wäre.

Neben der Einstellung zum Mindestfüllstand, besteht die Möglichkeit zur Reservierung eines Soll-Batteriefüllstands für Abfahrtszeiten. Dazu müssen die Nutzer ihre Fahrten im Voraus planen. Neben dem garantierten Füllstand zum Abfahrtszeitpunkt für den Nutzer liefert die Fahrtenplanung auch wichtige Informationen zur Optimierung des Ladevorgangs durch den Poolmanager. Im Falle von geplanten Fahrten kennt dieser den Abfahrtszeitpunkt im Voraus und kann den Ladevorgang dementsprechend optimieren. Während des Flottenversuchs wurden alle eingestellten Abfahrtszeitpunkte über den B2C Server geloggt. Aus dem Abgleich der geplanten und der tatsächlich durchgeführten Fahrten wurde für jeden Teilnehmer des Flottenversuchs der Anteil geplanter Fahrten ermittelt. In dieser Auswertung wird eine Fahrt als geplant deklariert, wenn es einen zugehörigen geplanten Abfahrtszeitpunkt gibt, der in einem Zeitraum von 90 Minuten vor der Fahrt bis 15 Minuten nach der Fahrt liegt.

Für alle INEES-Teilnehmer ist der Anteil geplanter Fahrten in absteigender Reihenfolge in Abbildung 33 dargestellt.

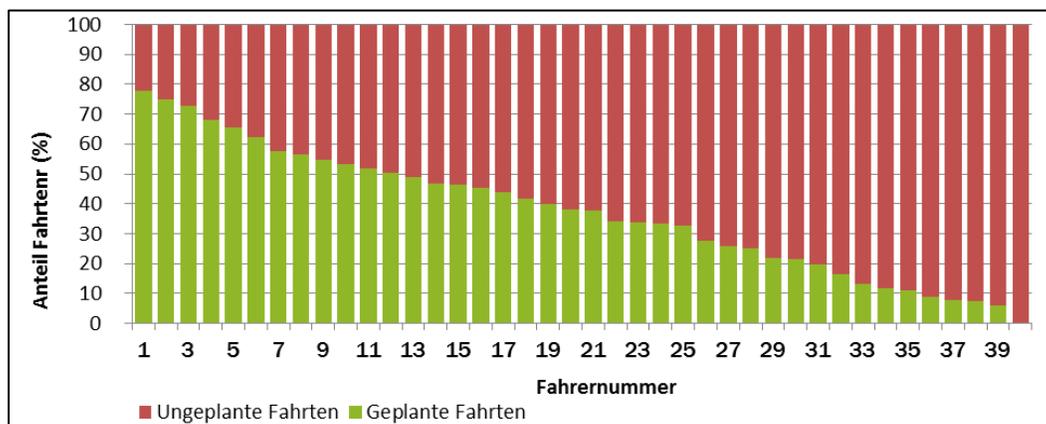


Abbildung 33: Anteil der geplanten und ungeplanten Fahrten

Die Option zur Fahrtenplanung wurde von den Teilnehmern sehr unterschiedlich stark genutzt. Die Spannweite reicht von 0 Prozent geplanten Fahrten bis zu 78 Prozent geplanten Fahrten. Während spontane Fahrten bei konventionellen Fahrzeugen in der Regel kein Problem darstellen, schränkt ein zu geringer Ladestand bei einem e-Auto die Flexibilität ein.

Neben der Speicherfreigabe ist es erforderlich, dass die Autos zur energiewirtschaftlichen Nutzung regelmäßig mit einer Ladestation verbunden werden.

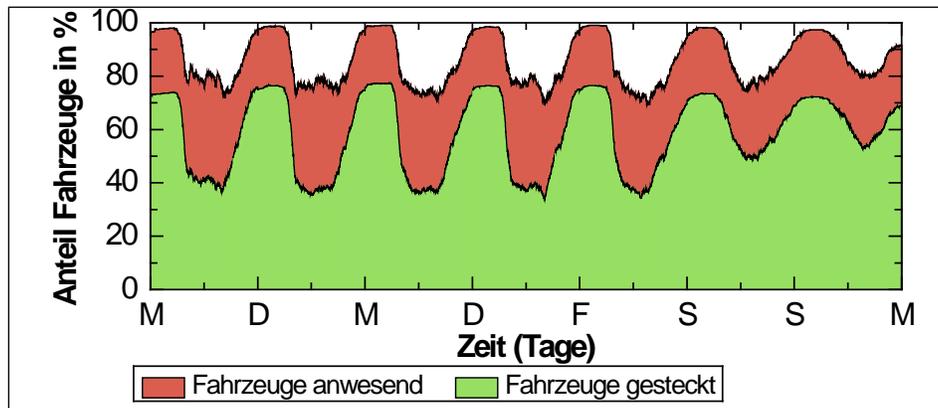


Abbildung 34: Vergleich von Stand- und Steckzeiten der Fahrzeuge an einer INEES-Ladestation

Abbildung 34 zeigt die Anzahl der an einer INEES-Ladestation parkenden und angeschlossenen Fahrzeuge. Während zu jeder Tageszeit immer mindestens 70 Prozent der Fahrzeuge an einer Ladestation geparkt stehen, sind im Minimum nur 38 Prozent der Fahrzeuge auch mit einer Ladestation verbunden. Dies spiegelt die unterschiedlichen Nutzungsroutinen der Teilnehmer wider. Ein Großteil der Ladevorgänge wird bei jeder Gelegenheit, d. h. so oft wie möglich, durchgeführt. Ein Drittel der Teilnehmer schließt das Auto nach eigenen Aussagen regelmäßig, d. h. mindestens täglich zur gleichen Zeit, an die Ladestation an. Andere wiederum laden das Fahrzeug immer erst, wenn es leer gefahren wurde.

„Ich schließe es (das Fahrzeug) immer an, damit der Versuch laufen kann. Normalerweise würde es nur abends angeschlossen werden – aus Bequemlichkeit.“ (A02, T1, PI)

„Wenn ich da bin, wird geladen.“ (A04, T1, PI)

Da das Laden des e-Autos insgesamt mit einem zusätzlichen Mehraufwand im alltäglichen Ablauf der Nutzer verbunden ist, kann dies dazu beitragen, die Akzeptanz des Systems zu mindern. Die Ergebnisse der Begleitforschung bestätigen allerdings, dass die Teilnehmer das Anschließen des VW e-up! an die Ladestation über die Studienlaufzeit zunehmend als Einschränkung ihrer alltäglichen Abläufe empfanden. Kritisiert wurden in diesem Zusammenhang häufig u. a. das schwere Kabel und schwer zugängliche Ladestationen als Hindernisse für eine noch häufigere Verbindung des Fahrzeugs mit der Ladestation. Die Orte der Ladestationen konnten im Rahmen des Flottenversuchs nicht besser optimiert werden. Bei der Ladestation samt dem eingesetzten Ladekabel handelte es sich um proprietäre Geräte des Experimentiersystems. Generell besteht bei beiden Punkten, der Installation der Ladestation und dem Ladekabel, weiteres Optimierungspotenzial.

Öffentliches Laden spielte während des Flottenversuchs nur eine untergeordnete Rolle: Nur ein geringer Teil der Teilnehmer hat Erfahrungen mit öffentlichem Laden gesammelt.

5.3.2 Analyse und Optimierung des Prämiensystems

Der Flottenversuch INEES zeigte, dass die Fahrzeuge sehr regelmäßig mit einer INEES-Ladestation verbunden werden und dass ein ausreichend hoher Anteil der Batteriekapazität der Unterstützung des Stromnetzes zur Verfügung gestellt wurde. Allerdings zeigte sich auch, dass die Freigabe sowohl unter den Nutzern als auch im Zeitverlauf stark schwankte.

Es wurden daher mehrere Befragungen durchgeführt, um zu erfahren, aus welchen Gründen sich die Nutzer für eine hohe oder niedrige Freigabe entschieden haben. Ein wesentlicher Einflussfaktor waren zum Teil häufig auftretende Ladeprobleme bei einzelnen Teilnehmern. Diese

fürten dazu, dass ein gewünschter Abfahrtsfüllstand am Folgetag nicht erreicht wurde. Als Reaktion auf wiederholt auftretende Fehler dieser Art wurde die Mindestreichweite erhöht, um jederzeit einen Mobilitätspuffer zur Verfügung zu haben. Dadurch wurde die Freigabe unter das eigentlich gewünschte Maß reduziert.

Als Hauptgrund für die Teilnahme am Flottenversuch und die Freigabe von Batteriekapazität gaben die Teilnehmer den Umweltschutz an, „Vorbild für nachfolgende Generationen sein“, „Unterstützung des Forschungsprojekts“ und die „Unterstützung der Energiewende“.

Ab einem monatlichen Betrag über 10 € wurde auch die Prämie als Grund für die Freigabe von Batteriekapazität genannt. Dies spiegelt sich auch in der Bewertung der Prämie durch die Teilnehmer in der Befragung wider. Während die Teilnehmer der ersten Gruppe die Prämie nahezu geschlossen als zu niedrig bewerteten und als hauptsächliche Motivation für die Teilnahme die Unterstützung des Umweltschutzes angaben, bewerteten die Teilnehmer der zweiten Gruppe die höhere Prämie als durchaus interessanten Anreiz zur Teilnahme am Projekt. Abbildung 35 zeigt die Angaben der Teilnehmer zu ihren Motivationsfaktoren zur kontinuierlichen Teilnahme am Projekt INEES im Rahmen der abschließenden Gruppendiskussionen.

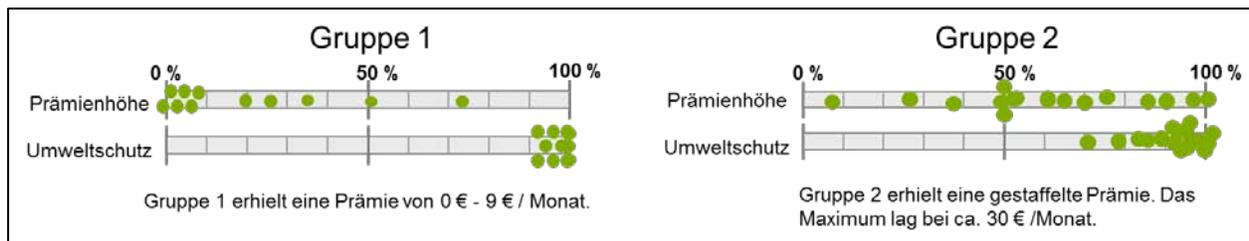


Abbildung 35: Angaben zu den Motivationsfaktoren zur Teilnahme am Projekt INEES

Die Spendenoption wurde von rund 66 Prozent der Teilnehmer genutzt und als motivierend empfunden. Als Optimierung wird eine Spendenoption mit Wahlmöglichkeit des begünstigten Projekts vorgeschlagen. Den Wettbewerb untereinander im Bereich „Rang“ der App bewerteten 50 Prozent als Anreiz, das eigene Verhalten anzupassen. Ein Beispiel für die Auswertung der Klickdaten ist in Abbildung 36 dargestellt.

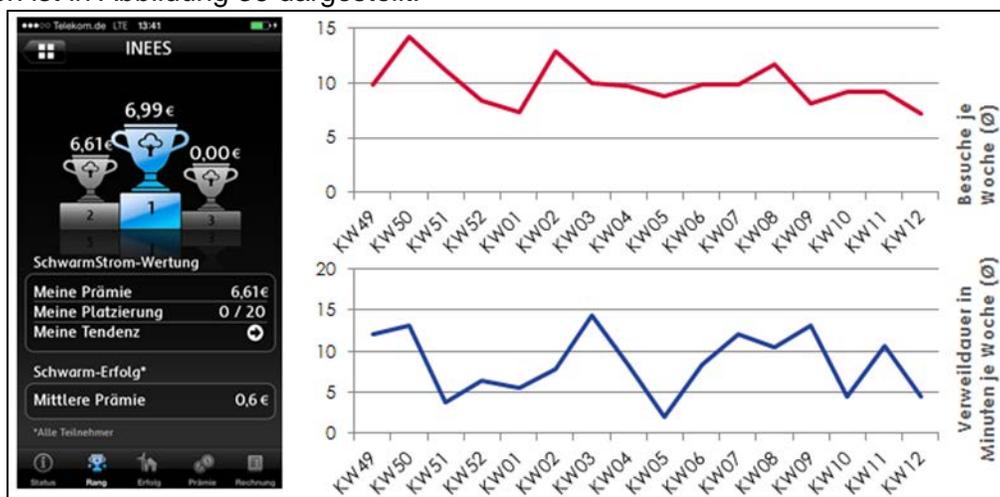


Abbildung 36: Durchschnittliche Anzahl der Besuche und durchschnittliche Verweildauer im Bereich „Rang“ der App; Auswertung der zweiten Gruppe

Die Teilnehmer des Forschungsprojekts stellen eine kleine und aufgrund der angewendeten Auswahlkriterien homogene Versuchsgruppe dar. Um Aussagen über ein wirkungsvolles Anreizsystem in einem potenziellen Massenmarkt treffen zu können, wurde von LichtBlick ein Unterauftrag für die Durchführung einer internetbasierten Conjoint-Analyse mit 1.000 Testpersonen vergeben.

Für die Entscheidung, am INEES-Konzept teilzunehmen, ist den Befragten wichtig, dass sich die Mehrkosten für die bidirektionale Ladestation im Rahmen von 500 bis 1.000 € bewegen. Die finanzielle Prämie stellt neben den einmaligen Zusatzkosten die wichtigste Entscheidungsgrundlage dar und sollte für ein attraktives Gesamtkonzept bei über 15 € monatlich liegen. Der spielerische Anreiz wird als optionale Zusatzfunktionen und als weniger wichtig empfunden. Zusätzlich sollten intrinsische Motive angesprochen werden. Die Teilnehmer sollten über den innovativen Charakter und die Unterstützung der Energiewende, des Umweltschutzes sowie den Beitrag zu einer nachhaltigen Lebensweise informiert werden.

Die Grenzen der Beeinflussung des Nutzerverhaltens, welche im Feldtest beobachtet wurden, können durch die Umfrageergebnisse bestätigt werden. Bei der Einstellung des Mindestfüllstands kann ab einer Prämie von 15 € ein minimaler Wert von 30 Prozent (40 km bei einem e-up!) erreicht werden. Selbst Prämien von 60 bis 80 € können die Testpersonen jedoch nicht dazu motivieren, den Mindestfüllstand weiter zu senken, hier überwiegt das Sicherheitsbedürfnis. Das Nutzerverhalten ist sehr stark von der individuellen Einstellung und den Lebensumständen festgelegt und kann nur in einem gewissen Rahmen beeinflusst werden.

6 Ökonomische Bewertung

Neben der technischen Erprobung der Erbringung von Regelleistung mit einem Pool aus Elektrofahrzeugen ist auch die ökonomische Betrachtung ein wichtiger Bestandteil des Forschungsprojekts, da durch den Poolansatz viele neue Fragen entstehen: Wie können Elektrofahrzeuge am SRL-Markt gepoolt vermarktet werden? Welche Faktoren beeinflussen die zur Verfügung stehende Leistung? Welche zusätzlichen Kosten entstehen und wie können potenzielle Kundenpräferenzen bezüglich zukünftiger Geschäftsmodelle berücksichtigt werden? Diese Fragestellungen werden in Abschnitt 6 behandelt.

6.1 Voranalyse

Zu Beginn der Arbeiten wurde zunächst der Regelleistungsmarkt hinsichtlich Preisbildung, Anbieter und zukünftiger Entwicklung untersucht. Anschließend wurde das mögliche Regelleistungsangebot eines Elektrofahrzeugpools ermittelt.

6.1.1 Der Regelleistungsmarkt

Im Energiewirtschaftsgesetz ist in § 22 festgelegt, dass die Beschaffung von Regelleistung in Deutschland transparent, diskriminierungsfrei und marktorientiert zu gestalten ist. Alle Regelleistungsarten werden daher von den vier Übertragungsnetzbetreibern auf einer gemeinsamen Internetplattform ausgeschrieben. Bei der Primär-(PRL) und Sekundärregelleistung geschieht dies einmal pro Woche für den Angebotszeitraum von sieben Tagen. Minutenreserve (MRL) wird täglich ausgeschrieben.

Über die gemeinsame Transparenzplattform⁷ werden derzeit 783 MW PRL ausgeschrieben, die sich auf die Länder Deutschland, Österreich Schweiz und die Niederlande aufteilen. Es existiert nur ein PRL-Produkt, Anbieter müssen demnach gleichermaßen die gebotene Leistung in positiver und negativer Richtung für die gesamte Woche vorhalten. Für die SRL werden derzeit etwa 2 GW jeweils in positiver und negativer Richtung ausgeschrieben. Durch die Aufteilung in die Zeitscheiben Hochtarif (HT) und Nebentarif (NT) ergeben sich so vier Produkte für die SRL. Minutenreserve wird in sechs Zeitscheiben à vier Stunden erbracht. Auch hier wird zwischen positiver und negativer Regelleistung unterschieden, dem Anbieter bietet sie demnach größtmögliche Flexibilität.

Teilnahmeberechtigt für die Ausschreibung sind alle Anbieter, deren Anlagen für die jeweilige Regelleistungsart technisch präqualifiziert sind und die einen Rahmenvertrag mit einem der vier ÜNB abgeschlossen haben.

Aufgrund der Abrufcharakteristik (siehe Abbildung 2) werden die drei Regelleistungsarten unterschiedlich häufig abgerufen, wobei die PRL am häufigsten und die MRL am seltensten abgerufen werden. Erste technische Analysen und Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen haben in der Projektvorbereitungsphase gezeigt, dass der SRL-Markt für den Einsatz von Elektrofahrzeugen am besten geeignet scheint. Mittlere und beeinflussbare Abrufhäufigkeiten, eine Unterscheidung in HT und NT und die Vergütung der vorgehaltenen Regelleistung durch einen Leistungspreis sowie der erbrachten Regelenergie durch einen Arbeitspreis lassen eine gute Kombinierbarkeit mit dem primären Einsatzzweck in der Mobilität bei gleichzeitig attraktivem Erlöspotenzial zu. Im Projekt wurde sich daher auf die SRL konzentriert. In Abbildung 37 ist die Entwicklung der Leis-

⁷ www.regelleistung.net

tungspreise der verschiedenen Regelleistungsarten jeweils als Summe über alle Produkte aufgetragen. Es wird schnell erkennbar, dass im Projektverlauf ein Preisverfall am SRL-Markt stattfand.

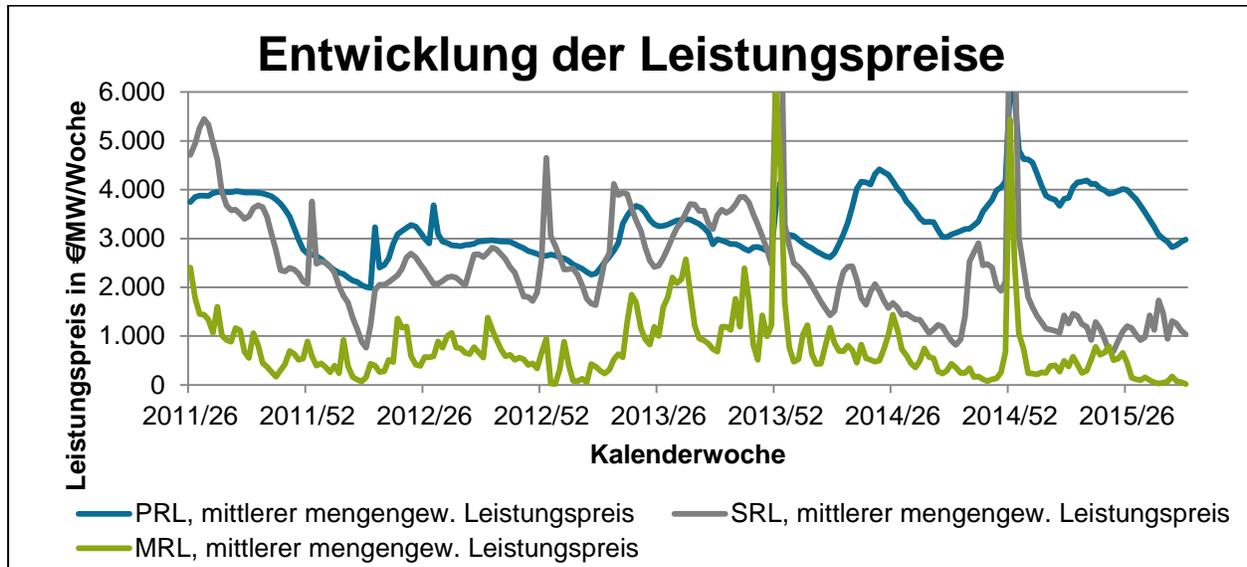


Abbildung 37: Entwicklung der Leistungspreise für die einzelnen Regelleistungsarten

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt sind in Deutschland 31 Anbieter für die SRL präqualifiziert, größtenteils handelt es sich dabei um klassische Energieversorger, es beteiligen sich jedoch auch Pooldienstleister und Großverbraucher an den Ausschreibungen. Das Gebotsverfahren ist anonym, die Ausschreibungsergebnisse werden online veröffentlicht. Jedes Gebot beinhaltet die produktbezogene angebotene Leistung (mind. 5 MW), einen dazugehörigen Leistungspreis in €/MW und einen Arbeitspreis in €/MWh. Jeder Anbieter kann beliebig viele unterschiedliche Gebote abgeben.

Der ausgeschriebene Leistungsbedarf wird zunächst über die Merit-Order der Leistungspreise gedeckt. Das teuerste noch bezuschlagte Leistungsgebot bildet dabei den Grenzleistungspreis. Teurere Angebote erhalten keinen Zuschlag und werden im aktuellen Ausschreibungszeitraum nicht weiter berücksichtigt.

Im Falle eines Regelleistungsabrufes während des Ausschreibungszeitraums wird dieser von den bezuschlagten Teilnehmern anhand der Merit-Order der Arbeitspreise bedient. Durch das unterschiedliche Bietverhalten variieren sowohl der Grenzleistungspreis je Woche als auch die Merit-Order der Arbeitspreise. Zusätzlich führte die weitere Öffnung des Markts über Verkürzung der Ausschreibungszeiträume oder Absenkung der Mindestangebotsgröße in den letzten Jahren tendenziell zu mehr Anbietern und folglich einem höheren Wettbewerb, der sich in einem Trend zu niedrigeren Leistungspreisen niederschlug. Gleichzeitig kam es zu einem Anstieg der Arbeitspreise.

Die Vorhaltungskosten (Leistungspreis) der Sekundärregelung werden über die Netzentgelte gewälzt, die Kosten für die abgerufene Regelenergie (Arbeitspreis) von den Ausgleichsenergiepreisen finanziert. Im Jahr 2013 hatte der SRL-Markt in Deutschland ein Gesamtvolumen von etwa 350 Mio. € bei einer umgesetzten Arbeit von 2,3 TWh in negativer und 1,6 TWh in positiver Richtung, was einer Jahresdurchschnittsleistung von 264 MW (negativ) bzw. 166 MW (positiv)

entspricht. Er blieb damit auf dem Niveau der Vorjahre.⁸ Im Vergleich zu den anderen Regelleistungsmärkten stellt die SRL mit Abstand den größten Markt dar.⁹

6.1.2 Elektrofahrzeuge im SRL-Markt

Für die Vermarktung eines Elektrofahrzeugpools am SRL-Markt spielt die Ermittlung der Leistung, welche als SRL angeboten werden kann, eine zentrale Rolle. Diese bildet das mögliche Regelleistungsangebot. Die anbietbare Leistung ist die Basis für die dann folgenden Wirtschaftlichkeitsanalysen.

Ermittlung der anbietbaren Leistung (Regelleistungsangebot)

Der LichtBlick-SchwarmDirigent[®] aggregiert die Kapazitäts- und Leistungswerte der Einzelfahrzeuge zu einem Kapazitäts- bzw. Leistungspotenzial des Pools (siehe Kapitel 4.3.4). Die anbietbare Leistung muss unter Beachtung der Grenzen sowohl des Leistungs- als auch des Kapazitätsfeldes ermittelt werden. Je nach Verhältnis von Kapazität und Leistung kann das Kapazitätsfeld oder das Leistungsfeld der begrenzende Faktor sein.

Anhand des Leistungspotenzials kann zunächst die maximal mögliche anbietbare Leistung ermittelt werden. Eine zentrale Anforderung der ÜNB ist die Vorhaltung der angebotenen (Regel-) Leistung über die gesamte Zeitscheibe. Daher ergibt sich die maximal mögliche anbietbare Leistung aus der minimal verfügbaren Entlade- bzw. Ladeleistung je Zeitscheibe (siehe Abbildung 38).

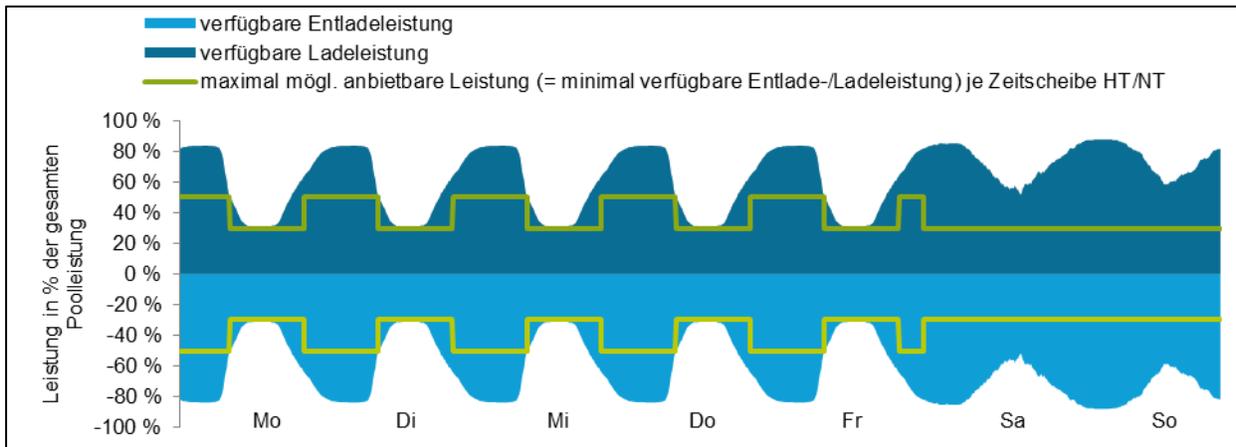


Abbildung 38: Maximal mögliche anbietbare Leistung je Zeitscheibe aufgrund des Leistungspotenzials eines Elektrofahrzeugpools im Wochenverlauf

Es ergibt sich eine weitere Einschränkung durch das Kapazitätsfeld. Der Poolfüllstand wird mithilfe des gehandelten energiewirtschaftlichen Fahrplans konditioniert. Die optimale Konditionierung ist abhängig von der Art der angebotenen Regelleistung. Soll beispielsweise sowohl negative als auch positive Regelleistung angeboten werden, so wird der Poolfüllstand mithilfe des gehandelten energiewirtschaftlichen Fahrplans konditioniert, sodass der Füllstand sich im Optimalfall in der Mitte zwischen den Kapazitätsgrenzen befindet. So steht für negative und positive Regelleistung dieselbe freie Poolkapazität zur Verfügung (siehe Abbildung 39). Es ist nun zu prüfen, ob im Falle eines Abrufs die aus dem Leistungspotenzial ermittelte angebotene Leistung

⁸ 2011: 371 Mio. €; 2012: 267 Mio. €

⁹ 2013: PRL 85 Mio. €; MRL 156 Mio. €

zu jedem Zeitpunkt für einen möglichen Abruf auch ausreichend lange tatsächlich erbracht werden kann, ohne eine Kapazitätsgrenze zu erreichen. Ist nicht genug Speicherpotenzial verfügbar, so muss die aus dem Leistungsfeld ermittelte potenziell anbietbare Leistung reduziert werden. In diesem Fall ist die anbietbare Leistung des Fahrzeugpools kapazitätsbegrenzt, das mögliche Leistungspotenzial kann nicht voll ausgeschöpft werden.

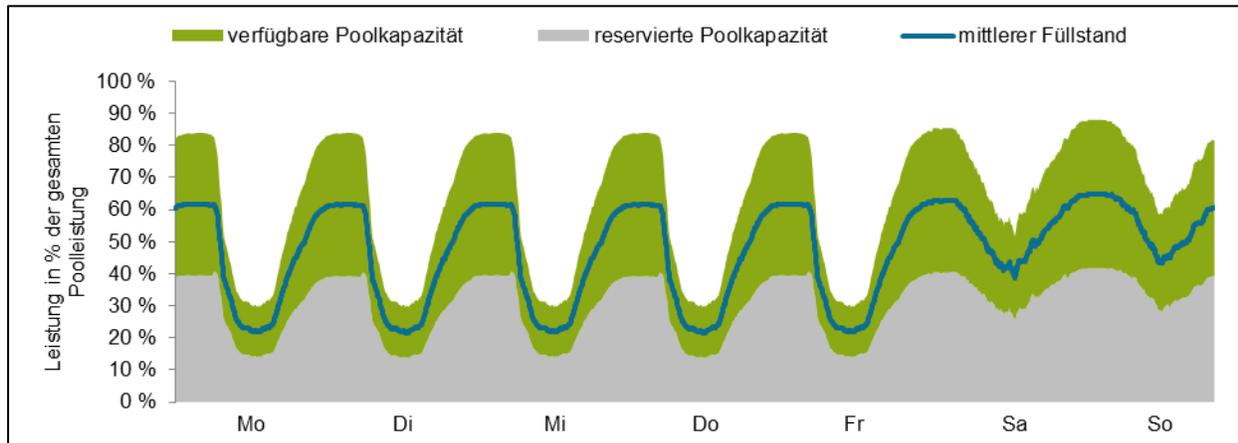


Abbildung 39: Optimierungsziel mittlerer Poolfüllstand: freies Kapazitätspotenzial sowohl für die Erbringung von negativer als auch positiver Regelleistung

Aufgrund der technischen Parameter sowie des Nutzerverhaltens ist der Fahrzeugpool im I-NEES-Projekt kapazitätsbegrenzt, das heißt eine Vergrößerung des Kapazitätsfeldes hat direkt eine Steigerung der anbietbaren Leistung zur Folge (so lange bis die maximal mögliche anbietbare Leistung aus dem Leistungspotential erreicht wird, ab diesem Punkt kann nur eine Vergrößerung des Leistungspotentials eine weitere Steigerung der anbietbaren Leistung ermöglichen).

Werden die derzeitigen SRL-Marktbedingungen als fixer Rahmen angenommen, hängen das Kapazitäts- und Leistungsfeld im Wesentlichen von

- den eingestellten Mindestfüllständen,
- den technischen Parametern, wie der Batteriegröße und der Ladeleistung sowie
- vom Mobilitäts- und Steckverhalten der Fahrzeugnutzer ab.

Die folgenden Ausführungen sind unter dem Gesichtspunkt der am SRL-Markt und im Projekt INEES festgelegten Rahmenparameter zu betrachten (siehe Anmerkungen in Tabelle 4). Als Referenz wird ein Basisszenario mit den technischen Parametern des INEES-Settings und dem im INEES-Feldtest beobachteten Nutzerverhalten definiert. In Tabelle 4 sind die Rahmenparameter des Basisszenarios und die unter den gegebenen Marktbedingungen anbietbaren Leistungen gelistet.

Eingestellte Mindestfüllstände

Wie in Kapitel 4.1.2 beschrieben, gaben die INEES-Teilnehmer einen Teil ihrer Batteriekapazität durch die Einstellung eines Mindestfüllstands für die energiewirtschaftliche Nutzung frei. Der während des Feldtests anhand der Datenauswertung aufgezeichnete mittlere Mindestfüllstand lag bei 47 Prozent der Batteriekapazität. Dieser Wert liegt den Berechnungen der anbietbaren Leistung im Basisszenario zugrunde. Wird der Wert anhand der Aussagen der Teilnehmer (theoretische Einstellung des Mindestfüllstands ohne technische Probleme des Systems) bereinigt, so sinkt der durchschnittliche Mindestfüllstand auf 34 Prozent (vergleiche Kapitel 5.3.1). Dieser

Wert wird ebenfalls in einer Conjoint-Analyse mit 1.000 Testpersonen bestätigt. Wird von einem eingestellten Mindestfüllstand von durchschnittlich 30 Prozent ausgegangen, so kann die anbietbare Leistung um rund 40 Prozent gegenüber dem Basisszenario gesteigert werden (siehe auch Abschnitt 5.3.1).

Technische Parameter

Bei den INEES-Fahrzeugen (Batteriekapazität 16,5 kWh; Ladeleistung +/-10 kW) begrenzt unter den genannten Rahmenbedingungen die Kapazität die anbietbare Leistung. Aufgrund des Leistungspotenzials könnte eine höhere Leistung am SRL-Markt angeboten werden. Das optimale Verhältnis für ein symmetrisches Anbieten von positiver und negativer SRL mit einem bidirektionalen Fahrzeugpool wurde in INEES wie folgt ermittelt:

$$\frac{\text{Leistung}}{\text{Kapazität}} \approx \frac{1}{4}$$

Das heißt, bei einer Ladeleistung von 10 kW wie im INEES-Aufbau könnten Fahrzeugbatterien bis zu 40 kWh integriert werden, ohne dass das System durch die Ladeleistung beschränkt wird. Aus größeren Batterien könnte dagegen kein weiterer Vorteil erzielt werden, da die Ladeleistung dann die begrenzende Größe darstellt. In Tabelle 4 ist die ermittelte, anbietbare Leistung für die einzelnen Produktarten aufgeführt. Ausgehend vom Basisszenario steigt diese bei einem geringeren durchschnittlich eingestellten Mindestfüllstand. Einen noch größeren Einfluss hätte eine Variation der Batteriekapazität. Wird diese im Vergleich zum Basisszenario auf 40 kWh vergrößert, sodass ein Leistungs-Kapazitäts-Verhältnis von 1:4 erreicht wird, steigt ebenfalls die anbietbare Leistung.

Tabelle 4: Anbietbare Leistung unter gegebenen Marktbedingungen mit dem INEES-Fahrzeugpool

Angebotszeitraum	1 Woche			
Zeitscheibe	NT (20:00 – 08:00 Uhr)		HT (08:00 – 20:00 Uhr)	
SRL-Produkt	positiv	negativ	positiv	negativ
Anbietbare Leistung je EV Basisszenario	1,4 kW	1,4 kW	1 kW	1 kW
Anbietbare Leistung je EV Mindestfüllstand 30 Prozent	1,9 kW	1,9 kW	1,4 kW	1,4 kW
Anbietbare Leistung je EV Batteriekapazität 40 kWh	3,5 kW	3,5 kW	2,2 kW	2,2 kW
Rahmenparameter Basisszenario	<ul style="list-style-type: none"> - technische Parameter der Einzelfahrzeuge: Batteriekapazität 16,5 kWh; Ladeleistung bidirektional +/-10 kW - eingestellter Mindestfüllstand: 47 Prozent - Mobilitätsverhalten gemäß INEES-Teilnehmer 			
Anmerkungen	<ul style="list-style-type: none"> - Es werden je Woche in jeder Zeitscheibe symmetrisch positive und negative SRL angeboten. - Ein Nachhandeln am Intradaymarkt zur Konditionierung des Poolfüllstands wird durchgeführt. - Vom Beginn des Nachhandelsprozesses bis zur Auswirkung auf den Poolfüllstand wird eine Zeitspanne von 60 Minuten angenommen. 			

Mobilitätsprofile

Zur ökonomischen Bewertung des Gesamtsystems wurden die Mobilitätsprofile der Teilnehmer während des Flottenversuchs analysiert und nach den Nutzungsprofilen „Pendler mit Arbeitgeber(AG)-Ladestation“, „Pendler ohne AG-LS“ und „Alltagsfahrer“ unterteilt. Abbildung 40 zeigt einen Vergleich dieser beobachteten Nutzerprofile (b) mit der Einordnung der Teilnehmer vor dem Start des Flottenversuchs aufgrund von Teilnehmeraussagen (a) (siehe Kapitel 5.2.1).

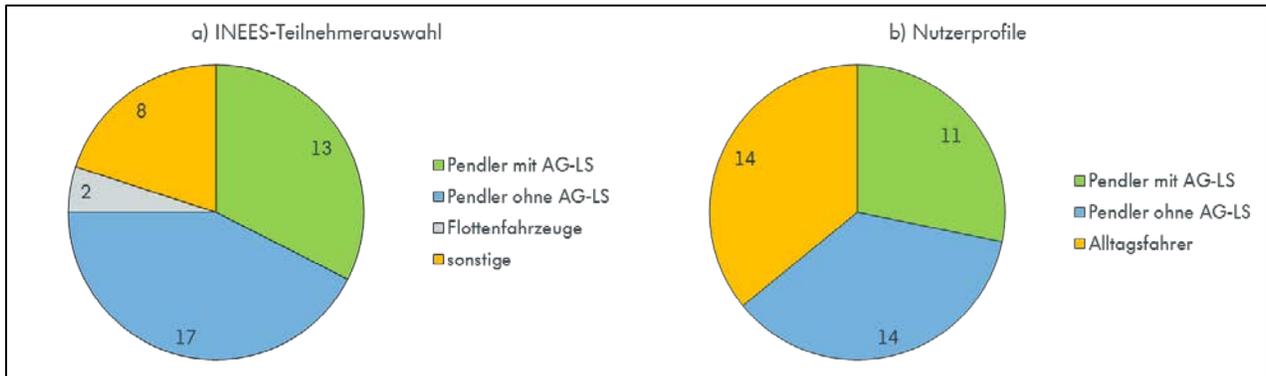


Abbildung 40: Einteilung der Profile der Nutzer im Flottenversuch entsprechend der Teilnehmerauswahl (a) und der im Feld beobachteten Nutzerprofile (b)

Für die Einordnung der Nutzerprofile wurden die Standzeiten und die Anschlusszeiten der Fahrzeuge an den Standorten zu Hause und beim Arbeitgeber beobachtet. Zwei Teilnehmer konnten die Ladestation beim Arbeitgeber aufgrund von Ladeproblemen nur sehr eingeschränkt nutzen und wurden daher anderen Kategorien zugeordnet. Einer dieser Teilnehmer wird aufgrund der dadurch stark eingeschränkten Nutzung des Fahrzeugs für die folgenden Betrachtungen nicht weiter berücksichtigt. Des Weiteren zeigte sich, dass drei Pendler den e-up! im Feldtest als Zweitwagen in der Familie und nicht für Fahrten zum Arbeitgeber nutzten. Als Kriterium wurde hierbei eine minimale Standzeit von einer Stunde pro Tag beim Arbeitgeber angesetzt. Insgesamt ergibt sich dadurch für die folgenden Auswertungen eine finale Einteilung von elf Pendlern mit Arbeitgeberladestation, 14 Pendlern ohne Arbeitgeberladestation und 14 Alltagsfahrern.

Entscheidend für die energiewirtschaftliche Nutzung der Batterie sind die Stand- und Anschlusszeiten der Fahrzeuge. In Abbildung 41 sind die Stand- und Anschlusszeiten der Fahrzeuge an den Standorten Arbeit und zu Hause nach zugeordneten Nutzerprofilen dargestellt. Während zwischen 22:00 und 06:00 Uhr etwa 95 - 100 Prozent der Fahrzeuge am Standort zu Hause geparkt stehen, fällt der Anteil tagsüber an einem Wochentag auf etwa 30 Prozent für die Pendler und 60 Prozent für die Alltagsfahrer ab. Ein Großteil der abwesenden Pendlerfahrzeuge steht in dieser Zeit beim Arbeitgeber (siehe Abbildung 41 (b)).

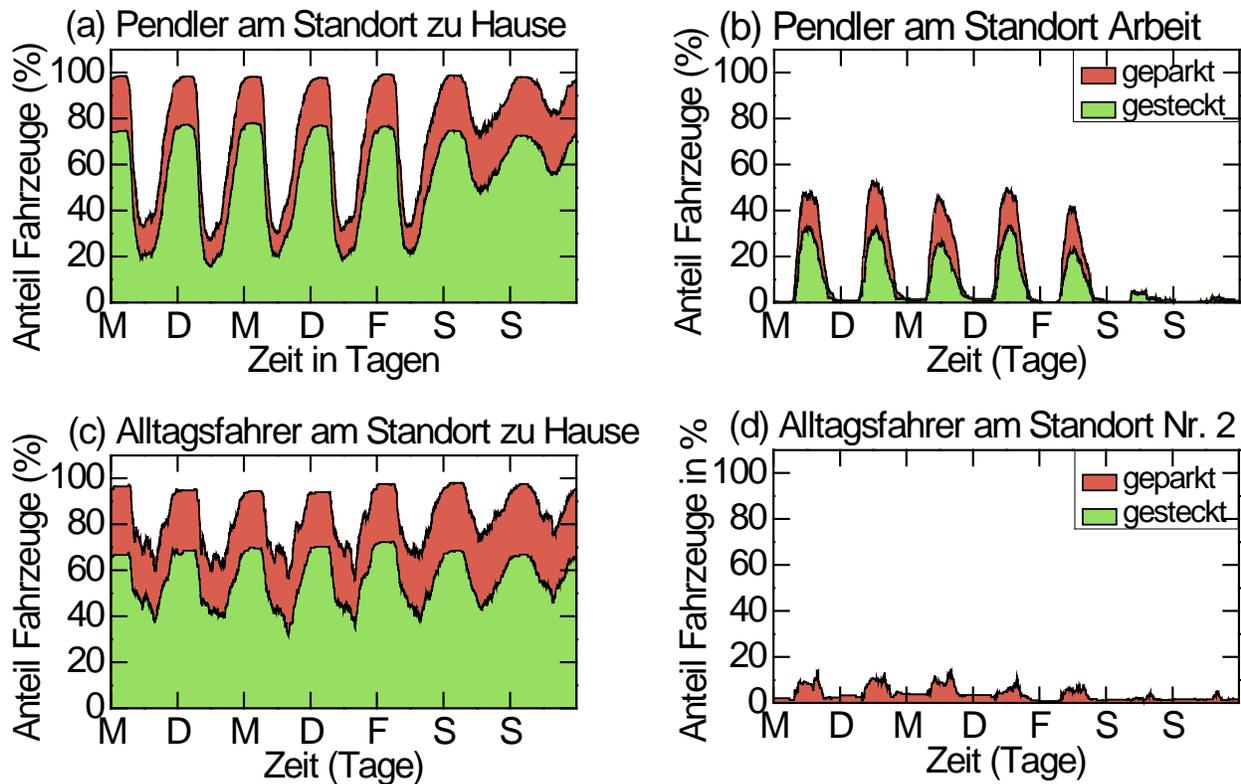


Abbildung 41: Wochenverlauf der Stand- und Anschlusszeiten für die Nutzerprofile Pendler und Alltagsfahrer an den Standorten zu Hause, beim Arbeitgeber und am Standort Nr. 2

Der Anteil gesteckter Fahrzeuge ist gegenüber den an einer Ladestation befindlichen Fahrzeugen deutlich reduziert. Am Standort zu Hause sind 70 Prozent der anwesenden Pendler und Alltagsfahrer auch tatsächlich mit einer Ladestation verbunden. Daraus resultiert ein minimaler Anteil angeschlossener Fahrzeuge von 16 Prozent für die Pendler und 32 Prozent für die Alltagsfahrer. Am Standort Arbeit haben sich etwa 60 Prozent der Fahrzeuge mit Arbeitgeberladestation auch mit dieser verbunden.

Unter den getroffenen Annahmen kann für jedes Mobilitätsprofil eine Abschätzung für die anbietbare Leistung getroffen werden. Wie Tabelle 5 zu entnehmen ist, gibt es deutliche Unterschiede zwischen den Mobilitätstypen in der Eignung für die Erbringung von Regelleistung. Pendlerfahrzeuge ohne eine Ladestation beim Arbeitgeber können tagsüber nahezu keine Leistung bereitstellen. Alltagsfahrer treten in der Regel die erste Fahrt erst nach 08:00 Uhr morgens an und weisen somit eine höhere Verfügbarkeit und damit eine höhere anbietbare Leistung in der gesamten NT-Zeitscheibe auf.

Tabelle 5: Anbietbare Leistung je Mobilitätstyp in INEES

Angebotszeitraum	1 Woche			
Zeitscheibe	NT (20:00 – 08:00 Uhr)		HT (08:00 – 20:00 Uhr)	
SRL-Produkt	positiv	negativ	positiv	negativ
Anbietbare Leistung je EV Basisszenario	1,4 kW	1,4 kW	1 kW	1 kW
Pendler ohne Arbeitgeber-ladestation	1,1 kW	1,1 kW	0,1 kW	0,1 kW
Pendler mit Arbeitgeber-ladestation	1, 2 kW	1,2 kW	1,4 kW	1,4 kW
Alltagsfahrer	1,6 kW	1,6 kW	1,2 kW	1,2 kW
Rahmenparameter Basisszenario	<ul style="list-style-type: none"> - technische Parameter der Einzelfahrzeuge: Batteriekapazität 16,5 kWh; Ladeleistung bidirektional +/-10 kW - eingestellter Mindestfüllstand: 47 Prozent - Mobilitätsverhalten gemäß INEES-Teilnehmer 			
Anmerkungen	<ul style="list-style-type: none"> - Es werden je Woche in jeder Zeitscheibe symmetrisch positive und negative SRL angeboten. - Ein Nachhandeln am Intradaymarkt zur Konditionierung des Poolfüllstands wird durchgeführt. - Vom Beginn des Nachhandelsprozesses bis zur Auswirkung auf den Poolfüllstand wird eine Zeitspanne von 60 Minuten angenommen. 			

6.2 Wirtschaftlichkeit

Anhand der Voranalysen konnten die grundsätzlichen Marktmechanismen sowie das mögliche Regelleistungsangebot eines Elektrofahrzeugpools identifiziert werden. Darauf aufbauend erfolgt nun die Analyse der Wirtschaftlichkeit basierend auf dem Erlöspotenzial und den Kosten.

6.2.1 Erlöspotenzial

Mithilfe einer im Projekt entwickelten Simulationsumgebung wird analysiert, auf welche Weise die in Kapitel 6.1.2 ermittelte anbietbare Leistung erlösmaximierend am SRL-Markt eingesetzt werden kann. Dafür fließen reale Marktdaten und historische SRL-Abrufe in das Berechnungstool ein.

Simulationsumgebung

Für eine möglichst reale Marktteilnahme erstellt die Simulationsumgebung für den simulierten Elektrofahrzeugpool wöchentliche Leistungspreisgebote mithilfe eines Prognosealgorithmus. Liegt das erstellte Gebot unterhalb des Grenzleistungspreises, erfolgt ein Zuschlag und eine Teilnahme am Markt findet statt.

Da die Merit-Order-Liste der bezuschlagten Anbieter und die Abrufcharakteristik jede Woche variieren, sind bei einer Teilnahme die abgerufenen Energiemengen nicht linear abhängig von der Höhe des gebotenen Arbeitspreises. Somit ist keine exakte Abschätzung der zu verrichtenden Arbeit auf Basis des Arbeitspreises im Voraus möglich. Statt unterjähriger Arbeitspreisoptimierung wird durch Variation der Gebotskombinationen ein optimaler mittlerer Arbeitspreis je

Jahr bestimmt. Über diesen Arbeitspreis werden zuzüglich zum Leistungspreis durch die Erbringung von Arbeit sowie die nachfolgenden Intraday-Handelsprozesse weitere Erlöse generiert.

Untersuchung von Szenarien

In der Simulationsumgebung ist es möglich, das Verhalten eines Elektrofahrzeugpools für die Ermittlung der Wirtschaftlichkeit nachzustellen. Zudem lassen sich bestimmte regulatorische Rahmenbedingungen variieren. Die Simulationsumgebung berücksichtigt die Parameter aus Tabelle 6. Durch Festlegung der Ausprägungen lassen sich Szenarien bilden und Erlöskorridore bestimmen.

Tabelle 6: Auflistung von Parametern, die in der Simulationsumgebung zu verschiedenen Szenarien kombiniert werden können

Parameter	Untersuchte Ausprägungen im Rahmen des INEES-Projektes
Mindestreichweite	<ul style="list-style-type: none"> • 47 Prozent
Mobilitätsprofil	<ul style="list-style-type: none"> • INEES-Fahrprofile
Ladeleistung	<ul style="list-style-type: none"> • 10 kW, bidirektional
Batteriekapazität	<ul style="list-style-type: none"> • 16,5 kWh • 40 kWh
Zeitscheiben	<ul style="list-style-type: none"> • HT/NT • 4-h-Zeitscheiben
Regulatorische Rahmenbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> • <u>keine</u> Befreiung von EEG-Umlage und Netznutzungsentgelten • Befreiung von EEG-Umlage und Netznutzungsentgelten
Marktpreis- und SRL-Abrufdaten	<ul style="list-style-type: none"> • 2013 • 2014

Erlöskorridor

Nach Untersuchung aller Ausprägungen ergibt sich durch die Betrachtung verschiedener Jahresdaten der in Abbildung 42 dargestellte Erlöskorridor. Basis der Ergebnisse sind die Marktpreise und Abrufdaten aus den Jahren 2013 und 2014. Die jeweils höheren Erlöse lassen sich im Jahr 2013 durch bessere Marktpreise erzielen.

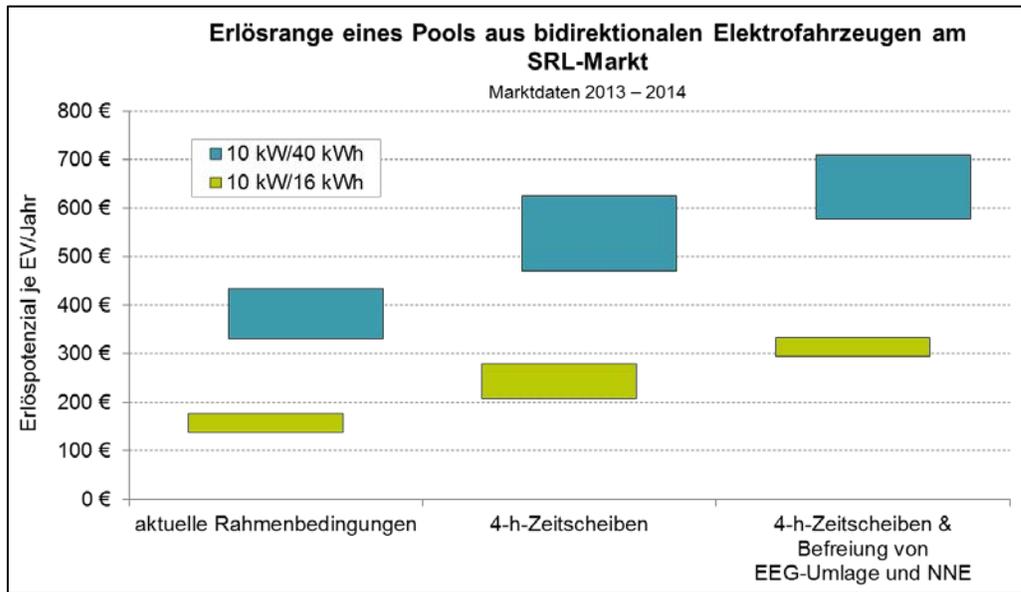


Abbildung 42: Erlöskorridor am SRL-Markt für einen bidirektionalen EV-Pool unter verschiedenen technischen und regulatorischen Rahmenbedingungen

Unter aktuellen Rahmenbedingungen bewegen sich die Erlöse eines Fahrzeuges zwischen 140 – 180 € pro Jahr bei einer 16-kWh-Batterie, sowie 330 – 440 € für eine 40-kWh-Batterie. Eine deutliche Vergrößerung der Erlöse bietet zunächst eine Verkürzung der Angebotszeitscheiben auf vier Stunden. Hier sind Erlöse zwischen 210 – 280 € je Fahrzeug (16,5 kWh) und 470 – 630 € je Fahrzeug (40 kWh) möglich. Bei den aktuellen HT/NT-Zeitscheiben beschränkt die Stunde mit dem kleinsten Potenzial die anbietbare Leistung für die gesamte Zeitscheibe (siehe Schema in Abbildung 43 oben). Schon heute ist abzusehen, dass die Angebotszeitscheiben auf vier Stunden reduziert werden (vgl. Weißbuch Strommarkt des BMWi). Kürzere Zeitscheiben ermöglichen eine bessere Ausnutzung des verfügbaren Potenzials des Elektrofahrzeugpools. Insbesondere in den Nachtstunden mit einer hohen Verfügbarkeit der Poolfahrzeuge kann durch die Verkürzung der Produktzeitscheiben die zur Verfügung stehende Leistung besser genutzt und mehr SRL-Leistung vermarktet werden (siehe Schema in Abbildung 43). Die höhere anbietbare Leistung ermöglicht eine Steigerung der Erlöspotenziale.

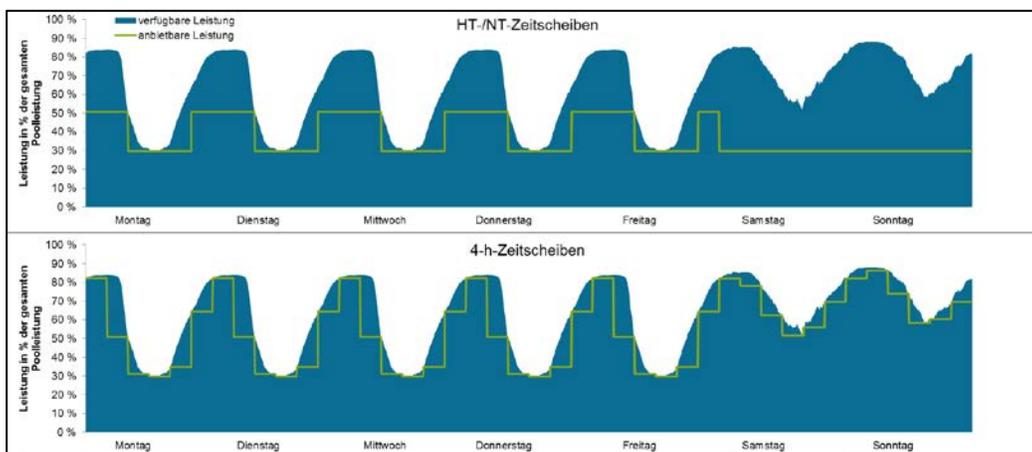


Abbildung 43: Schematische Darstellung der verbesserten Ausnutzung des technischen Potenzials durch verkürzte 4-h-Zeitscheiben

Ausgehend von den Erlösen bei einer Verkürzung der Zeitscheiben lassen sich Erlöse durch eine Befreiung von Umlagen und Netzentgelten für zwischengespeicherte Energie weiter steigern. Durch fehlende Regelungen wird gespeicherter und anschließend zum Zwecke der Erbringung von Regelleistung rückgespeicherter Strom aus Fahrzeugen nicht von Umlagen oder Entgelten befreit. Somit ist aktuell die Notwendigkeit von Rückspeisung durch das Anbieten von niedrigen Arbeitspreisen zu vermeiden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass in einem zukünftigen Regelwerk Elektrofahrzeuge, die zur Netzstabilisierung eingesetzt werden, eine Befreiung von Entgelten nach § 118 Abs. 6 EnWG und Umlagen nach § 60 Abs. 3 EEG 2014 auf den rückgespeisten Strom erfahren (siehe Kapitel 8.4). Durch die Befreiung wird Rückspeisung ins Verteilungsnetz wirtschaftlich. Angereizt über niedrigere Arbeitspreisgebote lassen sich aus energie-wirtschaftlicher Sicht höhere Energieumsätze ermöglichen, was durch die Verrichtung von Arbeit ein hohes zusätzliches Erlöspotenzial zulässt. Erlöse werden dann nicht mehr hauptsächlich über den Leistungspreis, sondern durch den physikalischen Umsatz von Energie erzielt. Allerdings gilt es, hier die technischen Eigenschaften des Systems miteinzubeziehen. Ein hoher Energiedurchsatz führt zu einer unverhältnismäßig hohen Zusatzalterung der Batterie und ist daher grundsätzlich zu vermeiden.

Im dargestellten Szenario „Befreiung von EEG-Umlagen und NNE“ ist bei der Festlegung des Arbeitspreises (der den Energieumsatz bestimmt) die Batteriealterung berücksichtigt. Unter diesen Rahmenbedingungen sind Erlöse zwischen 300 – 330 €/je Fahrzeug (16,5 kWh) und 570 – 710 €/je Fahrzeug (40 kWh) möglich.

Aktuell sind mit einem Pool aus Elektrofahrzeugen keine hohen Erlöspotenziale darstellbar. Ziel der aktuellen Bietstrategie ist es, möglichst wenig Energie rückspeisen zu müssen, da dies allein aufgrund der fehlenden Befreiung von Umlagekosten und Entgelten nicht wirtschaftlich ist. Eine Gleichbehandlung mit stationären Batteriespeichern führt jedoch entgegen ersten Annahmen nicht zu höheren Energieumsätzen und damit zusätzlichen Erlösen über den Arbeitspreis. Die Berücksichtigung der Batteriealterungskosten sorgt dafür, dass weiterhin nur wenig Energie über die Batterie umgesetzt wird. Denn bei einer Änderung der Bietstrategie hin zu einem vermehrten physikalischen Umsatz von Energie steigt die Belastung so stark, dass die Kosten für die Batteriealterung die möglichen Erlöse übertreffen und diese Strategie daher nicht wirtschaftlich darstellbar ist.

6.2.2 Kosten

Um Regelleistung mit einem Pool aus Elektrofahrzeugen erbringen zu können, mussten die Fahrzeuge sowie die Ladestationen im Projekt INEES mit allen notwendigen technologischen Funktionalitäten ausgestattet sein sowie über eine kommunikationstechnische Anbindung an eine zentrale Steuerungseinheit verfügen. Ebenfalls waren alle energiewirtschaftlich geforderten Prozesse wie das Messwesen entsprechend den Anforderungen umzusetzen. All dies verursacht Kosten, die für eine wirtschaftliche Bewertung den Erlösen gegenüberzustellen sind.

In Tabelle 7 sind die Mehrkosten gegenüber einem Referenzszenario ohne die Möglichkeit der SRL-Erbringung dargestellt. Im heutigen Szenario sind die Mehrkosten auf eine AC-Ladeinfrastruktur bezogen. Im Zukunftsszenario ist als Referenz eine dreiphasige AC-Ladestation betrachtet, da davon auszugehen ist, dass Kunden durch größere Batterien standardmäßig höhere Ladeleistungen bevorzugen.

Tabelle 7: Erwartete Mehrkosten für die SRL-Erbringung in den Referenzszenarien „Heute“ und „Perspektive“

Szenarioname		Heute	Perspektive
Annahmen		<ul style="list-style-type: none"> - DC-Schnittstelle ist keine Standardfunktionalität - Laden „zu Hause“ mit bis zu 3,7 kW (AC) - spezielle Messtechnik am Netzanschlusspunkt erforderlich (RLM) 	<ul style="list-style-type: none"> - DC-Schnittstelle wird standardmäßig eingesetzt (Schnellladefähigkeit bei steigenden Reichweiten von Elektrofahrzeugen) - Laden „zu Hause“ mit bis zu 11 kW (AC) - Smart Meter ersetzen spezielle Messtechnik
Zusatzkosten der SRL-Bereitstellung			
zusätzlicher Invest	Elektrofahrzeug	800 €	~0 €
	- bidirektionale DC-Schnittstelle		
	Ladeinfrastruktur „zu Hause“	4.000 €	1.500 €
	- bidirektionale DC-Ladestation		
	Installation	700 €	0 €
	- Montagematerial		
	- Arbeitsstunden		
Invest je EV		5.500 €	1.500 €
laufende Kosten	Energiewirtschaftliches Messwesen	600 €/a	60-200 €/a
	- Messstellenbetrieb		
	- Messdienstleistung		
	- Abrechnung		
	Zusätzlicher Wertverlust der Batterie	50 – 100 €/a	50 – 100 €/a
	Kommunikation EV	50 €/a	0 – 50 €/a
laufende Kosten je EV		700 – 750 €/a	110 – 350 €/a

Aktuell ist die bidirektionale Ladefähigkeit bei Elektrofahrzeugen keine Standardfunktionalität. Da es sich hauptsächlich um Softwareanpassungen handelt, sind für die Zukunft kaum zusätzliche Kosten zu erwarten. Auch eine fahrzeugseitige DC-Schnittstelle, die bei heutigen Elektrofahrzeugen nicht serienmäßig verbaut ist, wird zukünftig als Standard erwartet, sodass hier für die Teilnahme am bidirektionalen Laden kaum Zusatzkosten entstehen.

Aktuell ergibt sich besonders durch die derzeit noch relativ teure DC-Ladestation ein zusätzlicher Investitionsbedarf von insgesamt ca. 5.500 €. Perspektivisch ist anzunehmen, dass der zusätzliche Investitionsbedarf mit 1.500 € deutlich geringer ausfällt. Zum einen ist anzunehmen, dass aufgrund der größeren Batterien eine DC-Schnellladefähigkeit der Fahrzeuge von den Kunden standardmäßig gefordert wird. Zum anderen ist anzunehmen, dass Ladestationen mit höheren Ladeleistungen (ab 10 kW) eine weitere Verbreitung finden, sodass im Vergleich dazu keine darüber hinausgehenden Installationskosten anzunehmen sind. Ebenso wird in diesem Szenario für die bidirektionale DC-Ladestation durch höhere Stückzahlen mit Massenfertigung und weiterem technischem Fortschritt eine deutliche Kostenreduktion erwartet.

Neben den einmaligen Kosten fallen jährlich laufende Kosten an. Besonders kostenintensiv ist das energiewirtschaftliche Messwesen. Für eine aktive Teilnahme der Fahrzeuge am Energiemarkt ist eine registrierende Lastgangmessung notwendig, welche die eingespeiste und bezogene Energie je Messstelle in der geforderten Viertelstundenaufösung zur Verfügung stellt. Der

Betrieb dieser RLM-Messstelle setzt sich aus den Blöcken Messstellenbetrieb, Messung sowie Abrechnung zusammen. Mit der Liberalisierung im Jahr 2008 können Verbraucher einen unabhängigen Messstellenbetreiber/Messdienstleister für die Kostenblöcke Messstellenbetrieb und Messung beauftragen. Allerdings können die Verteilungsnetzbetreiber (VNB) die Gebühren für die Abrechnung frei festsetzen, somit sind diese Kosten ohne gesetzliche Regelung nicht beeinflussbar und fallen teilweise sehr hoch aus. Derzeit ergeben sich im Zusammenhang mit der RLM-Messstelle jährliche Gesamtkosten von ca. 600 €. Damit sind diese so hoch, dass sie unter der aktuellen Erlössituation keinen wirtschaftlichen Betrieb zulassen. Dies gilt für sämtliche energiewirtschaftliche Einsatzzwecke von Elektrofahrzeugen, die eine RLM-Messstelle voraussetzen.

Für wirtschaftlich sinnvoll darstellbare Geschäftsmodelle muss für die Zukunft dieser Kostenblock deutlich sinken. Folgende Überlegungen zeigen mögliche Ansätze:

- Infolge der Liberalisierung könnte es zu weiteren Kostensenkungen für Messstellenbetrieb und Messdienstleistung kommen.
- RLM-Zähler haben für den Einsatz in kleinen dezentralen Anlagen aufwendige Funktionalitäten, die nicht zwingend notwendig sind. Zukünftig ist denkbar, dass kostengünstigere Smart Meter nicht nur für SLP-Kunden, sondern auch für RLM-Kunden eingesetzt werden. Hierdurch wären zukünftig deutliche Kostensenkungen möglich.
- Betrachtet man insbesondere den großen Unterschied bei den erhobenen Abrechnungsentgelten zwischen verschiedenen VNB (unter 10 € bis 780 € jährlich), so sind die derzeitigen Kosten nicht nachvollziehbar. Daher ist langfristig von einer Senkung dieser Kosten durch wachsende Transparenz in der Kostenstruktur oder sogar deren Wegfall auszugehen.

Um ein Fahrzeug gezielt ansprechen zu können, muss es kommunikationstechnisch angebunden sein. Beim prototypischen Aufbau während des Feldtests sind hierdurch hohe Kosten entstanden. Diese lassen sich durch die Nutzung bereits für andere Zwecke existierender Kommunikationskanäle in Zukunft deutlich senken. So ist anzunehmen, dass zukünftig Fahrzeuge standardmäßig eine Mobilfunkschnittstelle besitzen.

Die zusätzliche Beanspruchung der Fahrzeugbatterie durch INEES verursacht eine Lebensdauerverkürzung, die mit einem Wertverlust verbunden ist. Im Rahmen einer normalen Fahrzeugnutzung wird ein Tausch der Batterie in der Regel jedoch nicht notwendig sein. Die Kosten für diesen zusätzlichen Wertverlust je Fahrzeugbatterie werden auf 50 – 100 €/Jahr geschätzt.

Bei einer Änderung der Bietstrategie hin zu einem vermehrten physikalischen Umsatz von Energie steigt die Belastung so stark, dass die Kosten für die Batteriealterung die möglichen Erlöse übertreffen und diese Strategie daher nicht wirtschaftlich darstellbar ist.

Zusätzlich fallen diverse Gemeinkosten an, die zum Betrieb des beschriebenen Systems notwendig sind. Darunter fallen:

- Betreuung und Weiterentwicklung der IT-Systeme,
- Kundenbetreuung und Entstörung,
- Abrechnungsgeschäften gegenüber dem ÜNB,
- Energiehandel sowie
- Vertrieb und Marketing.

Unter aktuellen Rahmenbedingungen verhindern die hohen laufenden Kosten einen positiven Deckungsbeitrag. Können zukünftig neue Konzepte (vor allem im Messwesen) umgesetzt werden, sinken die Zusatzkosten gegenüber Konzepten ohne bidirektionale Anbindung auf ein Niveau, welches eine wirtschaftliche Darstellung erlaubt.

6.2.3 Bewertung der Wirtschaftlichkeit

Eine direkte Gegenüberstellung von Erlöspotenzial und Kosten zeigt, dass unter heutigen Rahmenbedingungen kein Geschäftsmodell mit bidirektionalem Laden am SRL-Markt umsetzbar ist. Die verursachten Kosten übersteigen deutlich das mögliche Erlöspotenzial.

Politik und Industrie haben bereits Wege aufgezeigt, wie sich die hohen Kosten für das Messwesen senken lassen und sich durch verkürzte Zeitscheiben das theoretische Erlöspotenzial erhöhen lässt.

Abbildung 44 stellt für das Szenario „Perspektive“ den Erlösen bei einer Batteriekapazität von 40 kWh die systemgebundenen Kostenblöcke gegenüber¹⁰. Dargestellt sind die auf Basis der Analysen ermittelten möglichen durchschnittlichen Erlöse und Kosten sowie deren obere und untere Grenzen, jeweils beruhend auf Schätzwerten.

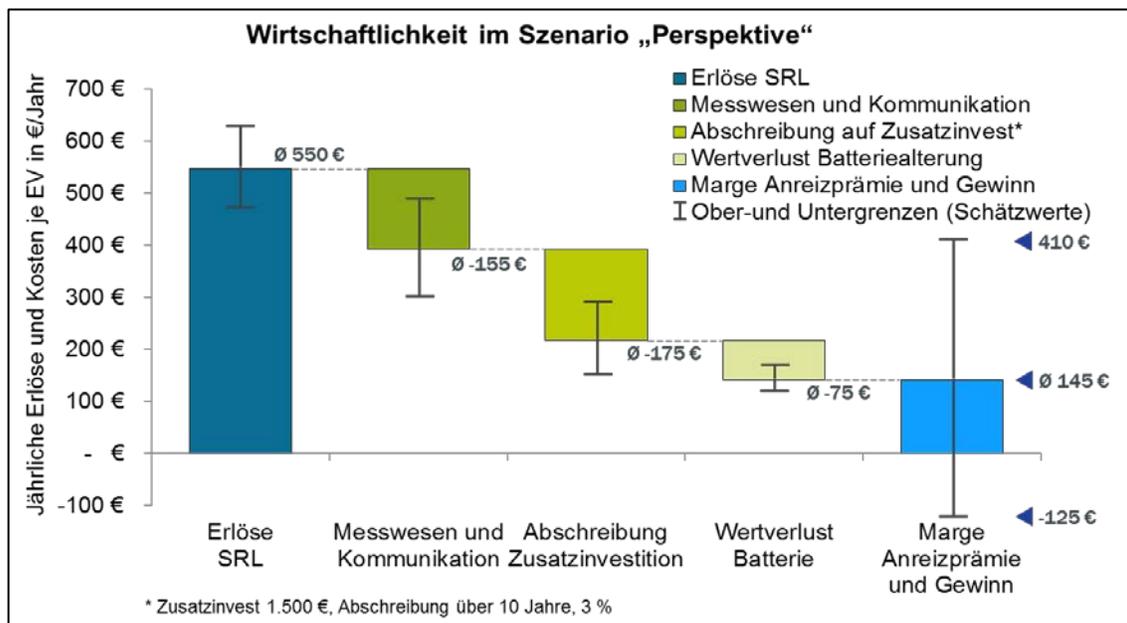


Abbildung 44: Wirtschaftlichkeit im Szenario „Perspektive“. Hier sind die zukünftig möglichen Erlöse und Kosten angenommen

Nach Abzug der im Vergleich zu heute deutlich niedrigeren Kosten ergibt sich im Mittel eine jährliche Marge von ca. 145 €. Diese gilt es zwischen den Betreibern des Gesamtsystems sowie dem Kunden als Kompensation für seinen Mehraufwand aufzuteilen.

Sowohl die Entwicklung des perspektivischen Erlöspotenzials, als auch die Entwicklung der einzelnen Kostenbestandteile sind naturgemäß mit einer hohen Unsicherheit behaftet. So zeigt z.

¹⁰ Annahmen im Szenario „Perspektive“: verkürzte Zeitscheiben (4 h) und geringere Kosten, siehe auch Abbildung 42 und Tabelle 7

B. Abbildung 37 in Kapitel 6.1.1 die hohe Volatilität der Preisentwicklung der vergangenen Jahre. Es besteht daher das Risiko, dass die Erlöse stärkeren Unsicherheiten unterliegen als die aus der Volatilität der vergangenen Jahre abgeleitete Spannbreite in Abbildung 44 erkennen lässt. Gleiches gilt für die zukünftige Entwicklung des zusätzlichen Wertverlustes der Batterie, der aufgrund der hochdynamischen Entwicklungen in diesem Gebiet aktuell nicht verlässlich abgeleitet werden kann.

Für ein attraktives Geschäftsmodell muss die zu erwartende Marge jedoch groß genug sein, um das Risiko der Volatilitäten mit abzudecken. Es reicht daher nicht, durch verbesserte Technik nur die Kosten zu reduzieren. Vielmehr müssten sich die am SLR-Markt erzielbaren Erlöse deutlich nach oben entwickeln, entweder durch eine generelle Steigerung der Preise im SRL-Markt oder durch eine Verschiebung von Vergütung der Regelarbeit hin zur Bereitstellung von Leistung. Auch eine Gleichstellung mit stationären Batterien bezüglich der EEG-Umlage und der Netznutzungsentgelte würde zu einer weiteren Steigerung des Erlöspotenzials (vgl. Abbildung 42) beitragen. Mit den geplanten Änderungen an den regulatorischen Rahmenbedingungen wird voraussichtlich auch der Wettbewerb am SRL-Markt gefördert. Damit ist aktuell eine weitere Steigerung des Preisniveaus und damit auch des Erlöspotenzials jedoch nicht absehbar.

7 Ergebnisse der Begleitforschung

Neben der Hauptfragestellung des Projektes wurden in der Begleitforschung wichtige Fragestellungen untersucht, die eine Bewertung der Ergebnisse ermöglichen. So stellt sich im Kontext der Elektromobilität die Frage, ob bei der Erbringung von Regelleistung aus dezentralen Einheiten die lokale Netzsituation berücksichtigt werden muss oder ob es zu lokalen Problemen kommen kann (Abschnitt 7.1). Diese Fragestellung wurde vom Fraunhofer IWES durch begleitende Studien und einen Laborversuch untersucht.

Des Weiteren fand durch das Fraunhofer IWES eine Bewertung zum volkswirtschaftlichen Nutzen des Konzeptes statt (Abschnitt 7.2).

Für eine Bewertung der Wirtschaftlichkeit des Konzeptes ist die Fragestellung der Batteriebelastung als Kostenbestandteil wesentlich. Daher wurde im Rahmen des Projektes die Batteriealterung untersucht und eine Grundlage für die Kostenbewertung in Kapitel 6.2.2 gelegt (Abschnitt 7.3).

7.1 Analyse der Vereinbarkeit des Verteilungsnetzbetriebs mit der Erbringung von Regelleistung aus Elektrofahrzeugen

Im Projekt wurden begleitend die Auswirkungen des Ausbaus der Elektromobilität auf die Verteilungsnetze untersucht. Hierbei wurde speziell auch die Erbringung von Regelleistung berücksichtigt, d. h. die zeitgleiche Ein- bzw. Ausspeisung von Elektrofahrzeugen.

Die Analysen teilen sich auf eine simulative Belastungsanalyse verschiedener Verteilungsnetztopologien mit einem statistischen Ansatz, die eine Auswertung des durchgeführten Feldtests im Hinblick auf netztechnische Belange lieferte und einen Laborversuch auf, der detaillierte Erkenntnisse zu verschiedenen Anschlusssituationen brachte.

7.1.1 Belastungsanalyse Verteilungsnetz

In der Belastungsanalyse zum Verteilungsnetz wurde untersucht, ab welchen Durchdringungsgraden mit gleichzeitig rückspeisenden Elektrofahrzeugen (EV) (ein EV je Anschlusspunkt) es zu einem der folgenden Netzengpässe kommt:

- Spannungsbandverletzung nach DIN EN 50160 (die Spannung an einem Niederspannungsknoten darf nicht um mehr als 10 Prozent vom Sollwert 400 V abweichen)
- Leitungsüberlastungen durch Überschreitung des thermischen Grenzstromes
- Transformatorüberlastung bei Überschreitung der Nennscheinleistung

Dazu wurden analog zur Auslegung von Verteilungsnetzen durch den Netzbetreiber in einer Netzberechnungssoftware zwei Worst Cases simuliert, **Starklast** sowie **Schwachlast**. Im Lastfall **Starklast** nehmen alle Verbraucher maximale Leistung auf, es erfolgt keinerlei Einspeisung durch EEG-Anlagen, und die betrachteten EVs erbringen negative Regelenergie, d. h. sie laden gleichzeitig mit voller Ladeleistung (10 kW). Im Lastfall **Schwachlast** nehmen die Verbraucher nur geringe Leistung auf, EEG-Anlagen hingegen speisen maximale Leistung ein, und die betrachteten EVs erbringen positive Regelenergie (−10 kW), d. h. sie entladen alle mit voller Leistung.

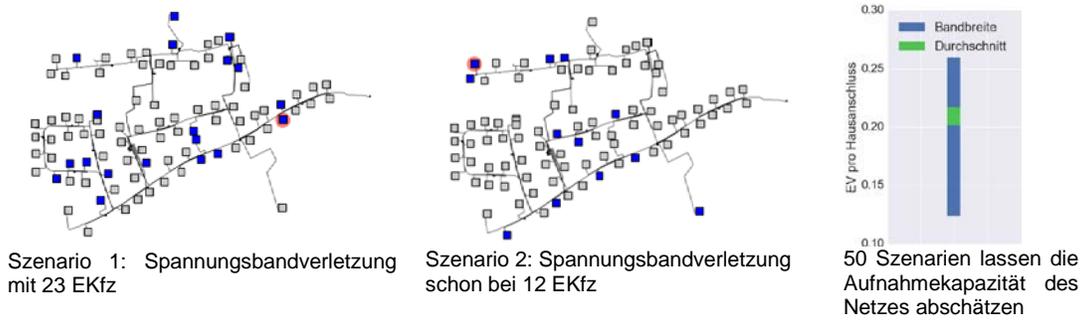


Abbildung 45: Bestimmung der Aufnahmekapazität eines Niederspannungsnetzes für EVs mithilfe probabilistischer Simulationen

In Abbildung 45 ist beispielhaft ein Niederspannungsnetz mit 91 Haushalten (graue Rechtecke) dargestellt. Je nachdem, wo die bidirektionalen Ladestationen (blau) installiert werden, kann das Netz unterschiedlich viel Regelleistung durchleiten, bevor es zu einem Netzengpass kommt. Für 50 verschiedene Szenarien ergibt sich für jedes Netz eine Verteilung der jeweils maximal durchleitbaren Regelleistung.

Die für das Beispielnetz geschilderte Vorgehensweise wurde analog auf 310 weitere Modelle überwiegend ländlicher Niederspannungsnetze angewandt (siehe Abbildung 46). Die Ergebnisse zeigen einerseits, dass unter den gemachten Worst Case Annahmen ungefähr ein Sechstel der Netze aktuell unabhängig von der Betriebsweise keine gleichzeitig rückspeisenden Elektrofahrzeuge aufnehmen könnten. In vielen dieser Netze ist bereits heute eine sehr hohe Zahl von EE-Anlagen installiert, die im Schwachlastfall hohe Netzbelastungen erzeugen und dadurch die durchleitbare Regelleistung aus Elektrofahrzeugen beschränken. Die Ergebnisse zeigen allerdings auch, dass der Großteil der untersuchten Netze durchaus in der Lage ist, bei den prognostizierten Durchdringungsraten allen Elektrofahrzeugen eine Erbringung von Regelleistung zu ermöglichen.

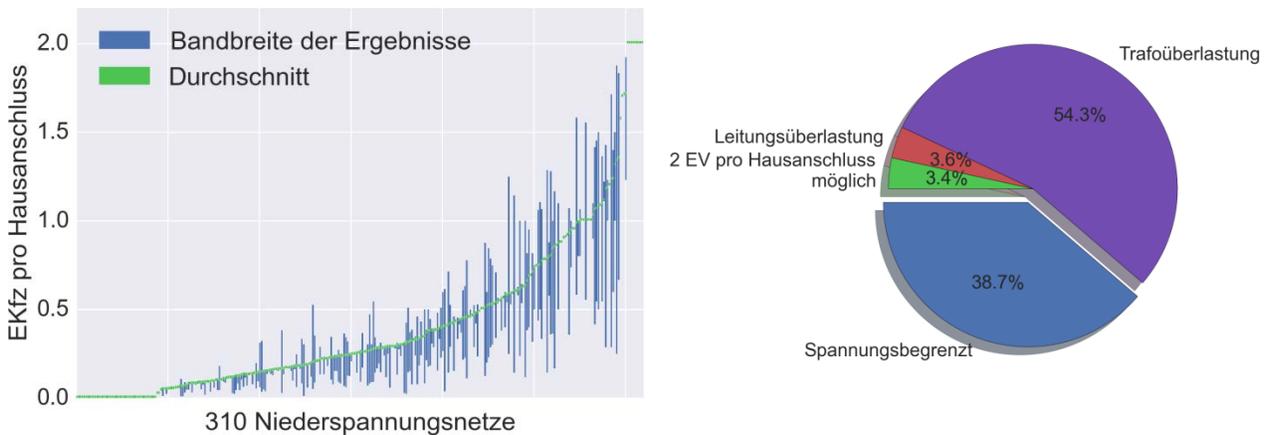


Abbildung 46: Aufnahmefähigkeit und Art des zu erwartenden Engpasses für 310 Niederspannungsnetzmodelle

Die identifizierten Engpässe sind hauptsächlich Verletzungen des Spannungsbandes und Überlastungen von Transformatoren. Eine Lösung wäre der Einsatz von leistungsflussabhängigen Sollspannungsreglern in der Mittelspannungsebene.

Vor dem Hintergrund des zu erwartenden weiteren Ausbaus der EE-Einspeiser in der Niederspannungsebene ist langfristig ein umfassender Netzausbau in vielen Netzen ohnehin unumgänglich. Gleichzeitig rückspeisende EVs würden mit der Erbringung von Regelleistung hier langfristig den Umfang des notwendigen Ausbaus erhöhen, da sie bei höheren Durchdringungsraten sowohl im Schwachlast- als auch im Starklastfall einen signifikanten Anteil haben werden. Solche Netzengpässe lassen sich fast vollständig vermeiden, wenn zu Zeiten hoher EE-Einspeisung nicht die volle Poolleistung angeboten wird. Weiter können zukünftige Smart-Grid-Technologien (z. B. leistungsflussabhängige Sollspannungsregler, RONT („regelbarer Ortsnetztransformator“)) die Aufnahmefähigkeit der Netze generell erhöhen.

Die Ergebnisse der Mittelspannungsanalyse zeigen, dass es bereits nur durch den prognostizierten Zubau von EEG-Anlagen zu Netzengpässen kommen wird. Selbst unter der Annahme eines leistungsflussabhängigen Sollspannungsreglers im Umspannwerk zeigte sich, dass im Jahr 2024 bereits zwei Drittel der Netze nicht in ihrer heutigen Form betrieben werden könnten. In dem Drittel der Netze, in dem kein durch EEG-Zubau getriebener Netzausbaubedarf zu erwarten ist, erzeugte der zusätzliche Einfluss der EVs nur sehr selten Netzengpässe. In den Netzen, in denen bereits aufgrund des EE-Zubaus Netzverstärkungsmaßnahmen erforderlich werden, würden Regelleistung erbringende Elektrofahrzeuge zu erhöhten Ausbaurkosten führen, da sie den Worst-Case-Fall, auf den das Netz ausgelegt wird, weiter verstärken.

7.1.2 Belastungsanalyse im Flottenversuch

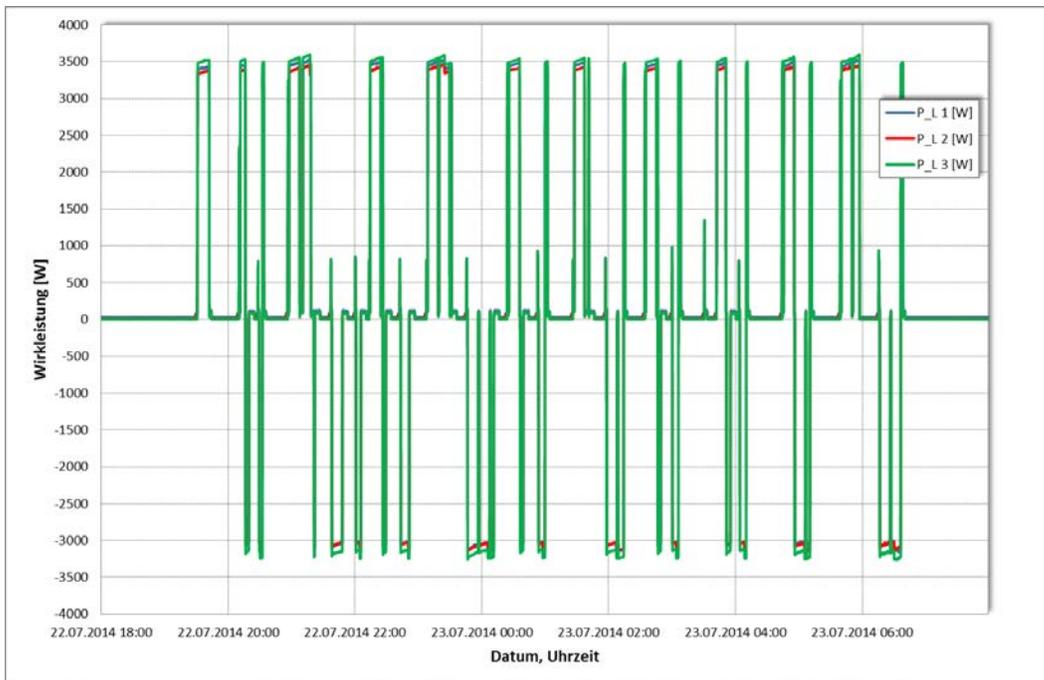


Abbildung 47: Regelleistungsbereitstellung auf Basis eines vorgegebenen Lade-/Entladefahrplans vom 22. – 23.7.2014. Darstellung aller drei Phasen

Der INEES-Flottenversuch wurde vom Fraunhofer IWES messtechnisch begleitet. Dafür wurden an jeweils drei ausgewählten Ladestationen netzseitig neben den elektrischen Leistungsgrößen (Wirk- und Blindleistung) auch Spannungen, Ströme und davon abgeleitete Netzqualitätsparameter gemessen und aufgezeichnet. Bei den Auswertungen sind vor allem folgende Aspekte analysiert worden:

- Regelleistungsbereitstellung (5—Sekunden-Werte): zeitliche Verläufe, Dynamik, Genauigkeit

- Wechselwirkungen der Ladestation mit dem Verteilungsnetz am Anschlusspunkt (10—Minuten-Werte)

Abbildung 47 zeigt die Regelleistungsbereitstellung auf Basis eines vom LichtBlick-SchwarmDirigent[®] vorgegebenen Lade-/Entladefahrplans für ein Fahrzeug über einen Zeitraum von ca. 11 Stunden. Positive Wirkleistungen entsprechen einem Bezug von Energie aus dem öffentlichen Netz, einer Aufladung des Speichers bzw. einer negativen Regelleistung. Negative Wirkleistungen hingegen bedeuten eine positive Regelleistungsbereitstellung verbunden mit einer Entladung des Speichers und einer Einspeisung von Wirkleistung in das öffentliche Netz. Man erkennt, dass die Wirkleistung für beide Energieflussrichtungen nahezu gleichmäßig auf die drei Leiter verteilt ist.

Ebenso konnte gezeigt werden, dass die Wirkleistung sehr gut mit dem vom SchwarmDirigent[®] vorgegebenem Sollwert übereinstimmt.

Neben den Regelleistungsvorgängen waren die Messungen zur Netzqualität (Spannungsänderungen, Flicker und Oberschwingungen) ein weiterer Schwerpunkt der Untersuchungen. Hier konnte festgestellt werden, dass auch im Feld keine unzulässige Beeinflussung der Netzqualität auftritt.

7.1.3 Belastungsanalyse im kleinen Flottenversuch (Labor)

Um die Funktionsweise des INEES-Konzepts und die Auswirkungen hinsichtlich des Energiesystems weiter zu untersuchen, wurde nach dem einjährigen Flottenversuch ein System mit vier EVs entlang einer Leitung im Labor SysTec des Fraunhofer IWES aufgebaut (siehe Abbildung 48). In Anlehnung an die Anschlussrichtlinie AR-VDE 4105 wurden verschiedene Versuche wie z. B. Frequenz-/Spannungsgrenzen, Flicker/Harmonische, Einstellgenauigkeiten, Leistungsausgleiche etc. an dem System durchgeführt.

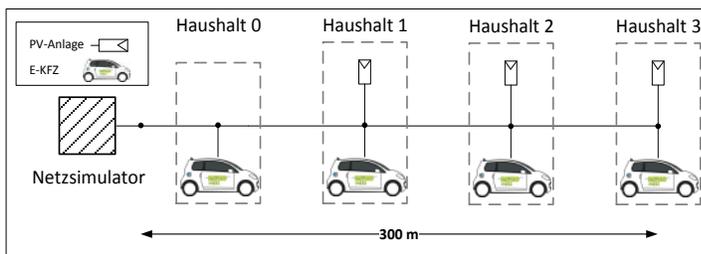


Abbildung 48: Aufbau des kleinen Flottenversuchs im Labor

Zur Verifizierung der Untersuchungen an Verteilungsnetzen wurden Leistungsversuche durchgeführt, um die Auswirkung der Spannungsänderungen nachzustellen. Bei einem Betrieb mit maximaler Lade- bzw. Entladeleistung der INEES-Systeme wurde so eine Änderung der Spannung von teilweise 6 V hervorgerufen. Durch Änderung der Netzkonfiguration zu kritischeren Bedingungen sind teilweise Spannungsunterschiede von 11 V innerhalb einer Leitung vorgekommen. Speziell in Verbindung mit zusätzlicher PV-Einspeisung kann es hier wie in den Studien der Verteilungsnetze aus Abschnitt 7.1.1 einerseits zu Engpässen kommen, andererseits können die Systeme auch durch ihre Bidirektionalität netzstützend wirken.

Die Erbringung von SDL verlangt spezielle Anforderungen, wie die schnellen, zeitlichen Fähigkeiten zur Bereitstellung von Leistung. Nachfolgend wurde die Einstellgenauigkeit der Ladestationen überprüft. Das Diagramm in Abbildung 49 zeigt die gleichzeitige Ansteuerung und Zu-

standsveränderung aller vier Systeme gemessen über einer langen Leitung. Die Einstellgeschwindigkeit belief sich meist um die 1000 ms \pm 300 ms.

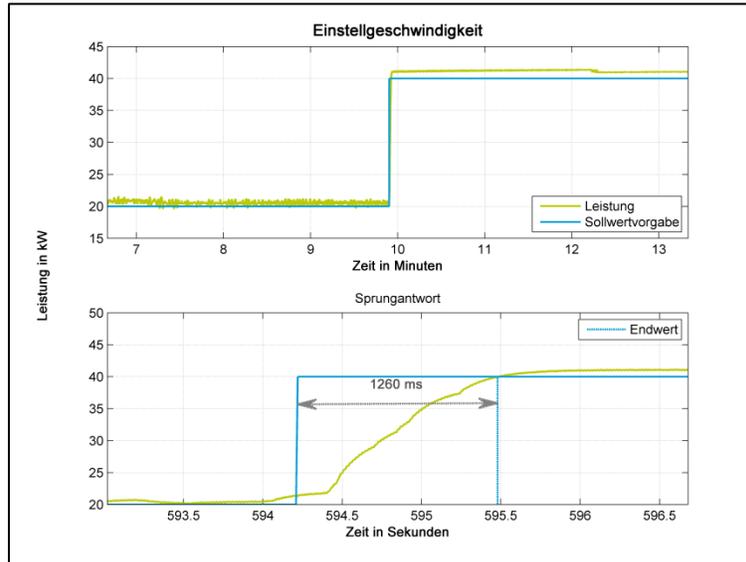


Abbildung 49: Ergebnis der untersuchten Einstellgeschwindigkeit von vier Systemen

7.2 Volkswirtschaftlicher Nutzen der Erbringung von Regelleistung aus Elektrofahrzeugen

Ziel des Kapitels ist es, den zukünftigen Nutzen der Regelleistungserbringung durch Elektrofahrzeuge unter Bilanzierung volkswirtschaftlicher Kosten zu erfassen und die Einbindung in das Energieversorgungssystem mit den resultierenden Rückkopplungen zu bewerten. Diese Bewertung trennt sich dabei bewusst vom betriebswirtschaftlichen und regulatorischen Rahmen sondern, und bewertet das technische Potenzial nur aus Sicht von realen Gesamtkosten. Für diese Bewertung bedarf es eines repräsentativen Szenarios zur Entwicklung des Gesamtsystems, für welches dann Sensitivitäten entsprechend der Forschungsfrage gerechnet werden.

Szenarien, Modell, Varianten

Als Zielszenarien für die volkswirtschaftlichen Untersuchungen wurden die Jahre 2025 und 2035 gewählt. Die Strommarktsimulationen basieren dabei im Wesentlichen auf den in der SO&AF 2015 – 2030¹¹ der ENTSO-E (Vision 4) sowie den im Netzentwicklungsplan¹² getroffenen Annahmen (bzw. Fortschreibungen) zum weiteren Ausbau der installierten Leistung erneuerbarer Energien (EE) und Übertragungskapazitäten innerhalb Europas und der Entwicklung der Stromnachfrage (detaillierte Beschreibung in ¹³). Die EE-Einspeisung (Wind, PV, Wasser, Biomasse) wird mit IWES-eigenen Modellen länderscharf anhand historischer, hochaufgelöster Wetterdaten

¹¹ ENTSO-E (2015): *Scenario Outlook & Adequacy Forecast*. Brüssel. URL:

<https://www.entsoe.eu/publications/system-development-reports/adequacy-forecasts/Pages/default.aspx>

¹² Feix, O.; Obermann, R.; Strecker, M.; König, R. (2014): *Netzentwicklungsplan Strom 2014*, 2. Entwurf. URL:

<http://www.netzentwicklungsplan.de/netzentwicklungsplaene/2014>

¹³ Gerhardt, N. (2015): *Analyse und Darstellung der Klimawirksamkeit der Elektromobilität in zukünftigen Stromversorgungsszenarien*. Kassel. Gefördert durch das BMU.

simuliert.¹⁴ Die Bestimmung des zukünftigen Regelleistungsbedarfs wird mit einer am IWES entwickelten und am Graf-Haubrich-Verfahren¹⁵ angelehnten dynamischen Bedarfsdimensionierung auf stündlicher Basis durchgeführt.¹⁶ Die konventionellen Kraftwerksparks für die Länder Europas werden aus den Datenbanken PLATTS-Database¹⁷ (Europa) sowie der Kraftwerksliste der Bundesnetzagentur¹⁸ (Deutschland) gebildet.

Die Abbildung des Kraftwerkseinsatzes erfolgt mit einer am IWES entwickelten Kraftwerkseinsatzoptimierung, welche mittels linearer Programmierung den kostenoptimalen Kraftwerkseinsatz für ein Jahr aus Sicht der Betriebskosten (Brennstoff-, CO₂-Zertifikate-, Anfahr-, Lastwechselkosten) ermittelt.¹⁹ Vorab werden mit einer vereinfachten Kraftwerkseinsatzoptimierung für Europa (lineare Modelle, keine Regelleistung (RL), Jahresplanung) die Austauschleistungen (Import-/Export-Zeitreihen) für Deutschland festgelegt. Im Anschluss werden für Deutschland detaillierte Kraftwerkseinsatzoptimierungen (gemischt-ganzzahlige lineare Programmierung, rollierende Planung, mit Regelleistung, technische Restriktionen von Kraftwerken berücksichtigt) inklusive EV am Strommarkt durchgeführt.

Für die Regelleistungsmärkte werden Stundenprodukte ohne Vorlaufzeiten zur Angebotsstellung angenommen, was eine Fortschreibung der Entwicklung zu kürzeren Produkten und Vorlaufzeiten in die Zukunft impliziert. Es werden alle drei Regelleistungsmärkte abgebildet, während die EVs nur am Sekundärregelleistungsmarkt teilnehmen und je nach Szenario auch positive Regelleistung über Rückspeisung anbieten können. Für die Regelleistungsabrufe wurden Abrufwahrscheinlichkeiten entsprechend den jahresmittleren heutigen Abrufwahrscheinlichkeiten zugrunde gelegt (SRL +20,6 Prozent, SRL –22,6 Prozent), welche sich direkt auf Speicherfüllstände, Brennstoffkosten, Wärmespeicher etc. auswirken.

Für die Szenariojahre 2025 und 2035 wurden mehrere Variantenrechnungen durchgeführt, in denen neben EVs weitere Anbieter (Windkraft/PV, Elektrodenheizkessel mit Umlagenbefreiung für RL-Abrufe, stationäre Batteriespeicher nur in 2035) auf die Regelleistungsmärkte drängen, und die Ergebnisse hinsichtlich der Marktaufteilung der Sekundärregelleistungsreserve untersucht sowie die Differenzkosten der Kraftwerkseinsätze den Zusatzkosten für die Poolanbindung der EVs gegenübergestellt.

In den Basisvarianten nehmen neben den konventionellen Kraftwerken auch bereits die Elektrodenheizkessel von KWK-Anlagen am Regelleistungsmarkt teil, werden für Abrufe aber mit Um-

¹⁴ Bofinger, S. et al. (2013): *Virtuelles Stromversorgungssystem – Komplettsimulation zukünftiger Stromversorgungssysteme*. Fraunhofer IWES Kassel, Universität Hannover. Gefördert durch das BMU.

¹⁵ Haubrich, H.-J. (2008): *Gutachten zur Höhe des Regelenergiebedarfs*. Aachen.

URL: <http://www.consentec.de/wp-content/uploads/2011/12/Gutachten-zur-H%C3%B6he-des-Regelenergiebedarfes.pdf>

¹⁶ Jost, D. et al. (2015): *Dynamische Bestimmung des Regelleistungsbedarfs*. Projekt im Auftrag des BMWi.

URL: <http://www.energiesystemtechnik.iwes.fraunhofer.de/de/projekte/suche/laufende/dynamische-bestimmung-des-regelleistungsbedarfs0.html>

¹⁷ Platts (2014): *World Electric Power Plants Database*. McGraw Hill Financial. New York.

URL: <http://www.platts.com/products/world-electric-power-plants-database>

¹⁸ Bundesnetzagentur (2014): Kraftwerksliste bundesweit. Bonn.

URL: http://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerksliste/kraftwerksliste-node.html

¹⁹ v. Oehsen, A. (2012): *Entwicklung und Anwendung einer Kraftwerks- und Speichereinsatzoptimierung für die Untersuchung von Energieversorgungsszenarien mit hohem Anteil erneuerbarer Energien in Deutschland*. Dissertation an der Universität Kassel.

URL: <https://kobra.bibliothek.uni-kassel.de/bitstream/urn:nbn:de:hebis:34-2013050742706/5/DissertationAmanyVonOehsen.pdf>

lagen (Netzentgelte, EEG-Umlage, Steuern) belastet. Im Vergleich zu anderen Speichertechnologien liegen die EV-Batterien mit einem Gesamtwirkungsgrad (Einspeicherung ↔ Ausspeicherung) von Ø 85 Prozent zwischen Pumpspeicherwerken (PSW, Ø 75 Prozent) und stationären Batteriespeichern (Ø 90 Prozent).

Tabelle 8: Übersicht über die durchgeführten Variantenrechnungen zu den Zielszenarien 2025 und 2035

		neue Regelleistungsanbieter					
		E-KFZ ohne Rückspeisung	E-KFZ mit Rückspeisung	Windkraftanlagen	Photovoltaikanlagen	Elektroden-Heizkessel unbesteuert	stationäre Batteriespeicher
Szenario 2025	Basisvariante 2025 (keine neuen Regelleistungsanbieter)	0					
	+ RL durch E-KFZ ohne Rückspeisung	0a	■				
	+ RL durch E-KFZ mit Rückspeisung	0b		■			
	Variante: Regelleistung durch Wind & PV	1			■	■	
	+ RL durch E-KFZ mit Rückspeisung	1b		■	■	■	
	Variante: RL durch Elektroden-Heizkessel unbesteuert	2					■
+ RL durch E-KFZ mit Rückspeisung	2b		■			■	
Szenario 2025	Variante: RL durch Wind & PV & Elektr.-Heizk. unbesteuert	3			■	■	■
	+ RL durch E-KFZ mit Rückspeisung	3b		■	■	■	■
	Basisvariante 2035 (keine neuen Regelleistungsanbieter)	0					
	+ RL durch E-KFZ ohne Rückspeisung	0a	■				
	+ RL durch E-KFZ mit Rückspeisung	0b		■			
	Variante: RL durch Wind & PV	1			■	■	
+ RL durch E-KFZ mit Rückspeisung	1b		■	■	■		
Szenario 2035	Variante: RL durch Elektroden-Heizkessel unbesteuert	2				■	
	+ RL durch E-KFZ mit Rückspeisung	2b		■		■	
	Variante: 3 GW Batteriespeicher + RL	4					■
	+ RL durch E-KFZ mit Rückspeisung	4b		■			■
	Variante: RL durch Wind, PV, Elektr.-Heizk. unbest. & Batteriespeicher	5			■	■	■
	+ RL durch E-KFZ mit Rückspeisung	5b		■	■	■	■

Ergebnisse – SRL-Marktanteile (vgl. Abbildung 50 und Abbildung 51)

- a. In den Basisvarianten wurden jeweils die Untervarianten „SRL durch EV mit und ohne Rückspeisung ins Stromnetz“ untersucht. Es zeigt sich, dass die durch EVs angebotene SRL durch die Rückspeisemöglichkeit vor allem im positiven Bereich deutlich ansteigt. Ohne Rückspeisemöglichkeit können EVs auch dadurch positive SRL erbringen, indem sie die Ladeleistung während des Ladevorgangs reduzieren. Daneben ist deutlich zu sehen, dass die

- EVs in allen Varianten mehr positive als negative SRL anbieten und in erster Linie konventionelle Kraftwerke, bei höheren Anteilen aber auch PSW, aus dem Markt verdrängen.
- Sowohl im Jahr 2025 als auch 2035 können sich Windkraft und PV als neue Anbieter auf dem SRL-Markt kaum durchsetzen, da das Angebot von negativer SRL durch alle anderen Anbieter zu Systemvorteilen (Brennstoffersparnis, Fahrbedarf, Energiespeicherung) führt und für das Angebot von positiver SRL die EE-Anlagen reduziert laufen müssten, wodurch dem System Energie verloren ginge.
 - Elektroden-Heizkessel können nur dann in nennenswertem Maße negative SRL erbringen, wenn sie für Abrufe von Umlagen befreit werden. Die Teilnahme beschränkt sich aber auf Zeiten niedriger Residuallast wie Wochenenden, Nachtzeiten in Verbindung mit hoher EE-Einspeisung.
 - Die größte Konkurrenz unter den angenommenen neuen Anbietern stellen stationäre Batteriespeicher dar, da sie eine höhere Gesamteffizienz (Ø 90 Prozent) aufweisen. In der direkten Konkurrenz von EVs und stationären Batteriespeichern erreichen die EV dennoch höhere Marktanteile, da diese ohnehin einen Ladebedarf (Fahrleistung) haben, während die Batteriespeicher die Energie in jedem Fall wieder ausspeichern müssen.

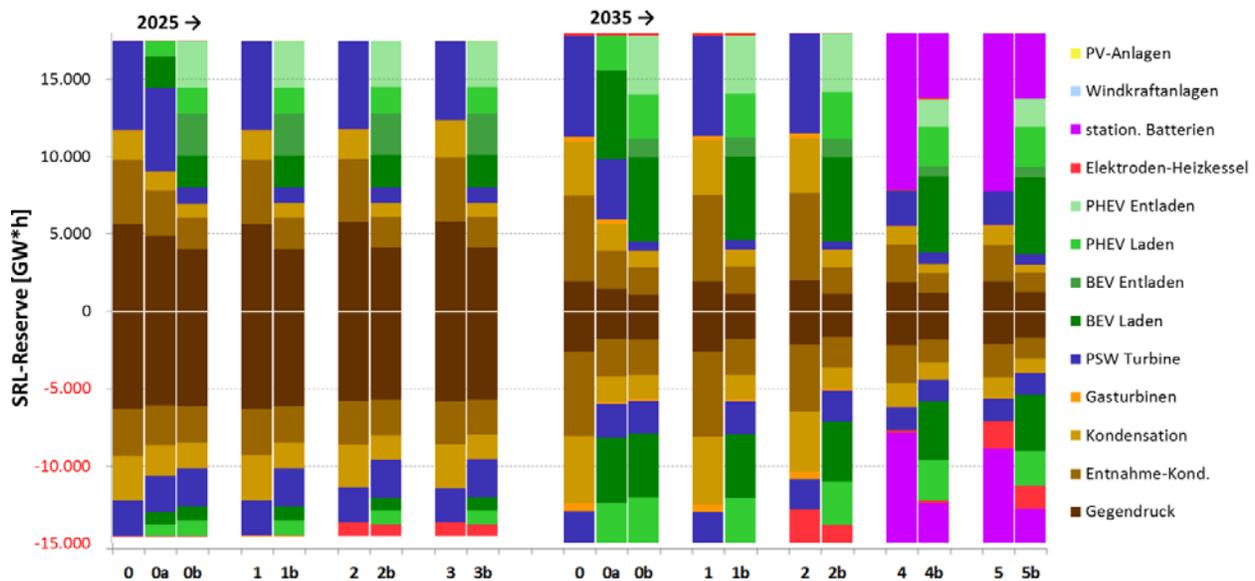


Abbildung 50: Angebotene Regelleistungsreserve am SRL-Markt in den verschiedenen Varianten

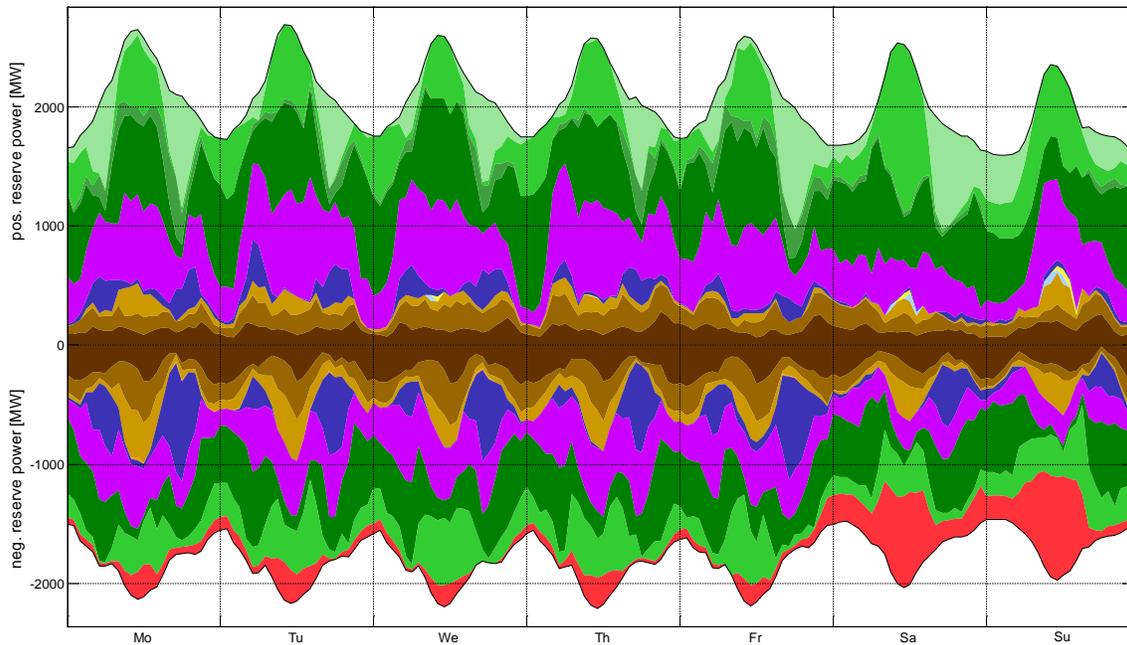


Abbildung 51: Gemittelte Wochengrafik der SRL-Marktanteile mit allen neuen Anbietern im Jahr 2035

Ergebnisse – Differenzkosten (vgl. Abbildung 52)

Die Differenzkosten der Kraftwerkseinsätze zwischen den betrachteten Varianten basieren auf reinen Betriebskosten der Kraftwerke unter Berücksichtigung von Regelleistungsabrufen (s. o.). Es werden somit reine Grenzkosten betrachtet, was der Funktionsweise eines Energy-only-Marktes mit tendenziell vorhandenen Kraftwerksüberkapazitäten entspricht. Das Modell unterstellt einen vollkommenen Markt mit vollständiger Markttransparenz und fehlenden Markthemmnissen (Ausnahme: Besteuerung Elektroden-Heizkessel, CO₂-Zertifikatekosten).

Die zwischen den verschiedenen Varianten auftretenden Differenzkosten sind im Vergleich zu den zusätzlichen annuisierten Poolanbindungskosten für Sekundärregelleistung gering und können diese nicht decken. Durch das Hinzukommen neuer Marktteilnehmer verringern sich die Differenzkosten bei Teilnahme von EVs am SRL-Markt noch weiter (siehe Szenario 2035-0b ggü. 2035-1b/2b/4b/5b), insbesondere bei Hinzunahme von stationären Batteriespeichern²⁰ im Jahr 2035. Die im Szenario 2035 auftretenden höheren Differenzkosten sind im Wesentlichen dem stärkeren Markthochlauf der EVs geschuldet.

Die niedrigen Differenzkosten der Variantenrechnungen sind ein Zeichen für bereits ausreichend bestehende Flexibilitätsoptionen im angenommenen Stromversorgungssystem der Jahre 2025 und 2035, sodass aus Investitionskosten-sicht für zusätzliche Flexibilität keine Anreize bestehen. Sofern der Ausbau an neuen Flexibilitäten (Neubau Kraftwerke, Speicher, Übertragungskapazitäten ins Ausland, Demand-Side-Management(DSM)-Anwendungen, neue SRL-Anbieter etc.) jedoch nicht in dem angenommenen Maße voranschreitet oder verzögert wird, kann durch das Anbieten von Regelleistung durch EVs, insbesondere mit der Möglichkeit der Rückspeisung, eine zusätzliche Flexibilitätsoption im Stromversorgungssystem geschaffen werden. Diese kann konventionelle Kraftwerke und Pumpspeicherwerke entlasten und den Bedarf an neuen Kraftwerken und Speichern verringern.

²⁰ Stationäre Quartierspeicher der Leistungsklasse von ca. 5 MW. Im Gegensatz zu Kleinspeichern sind hier die Anbindungskosten nicht relevant.

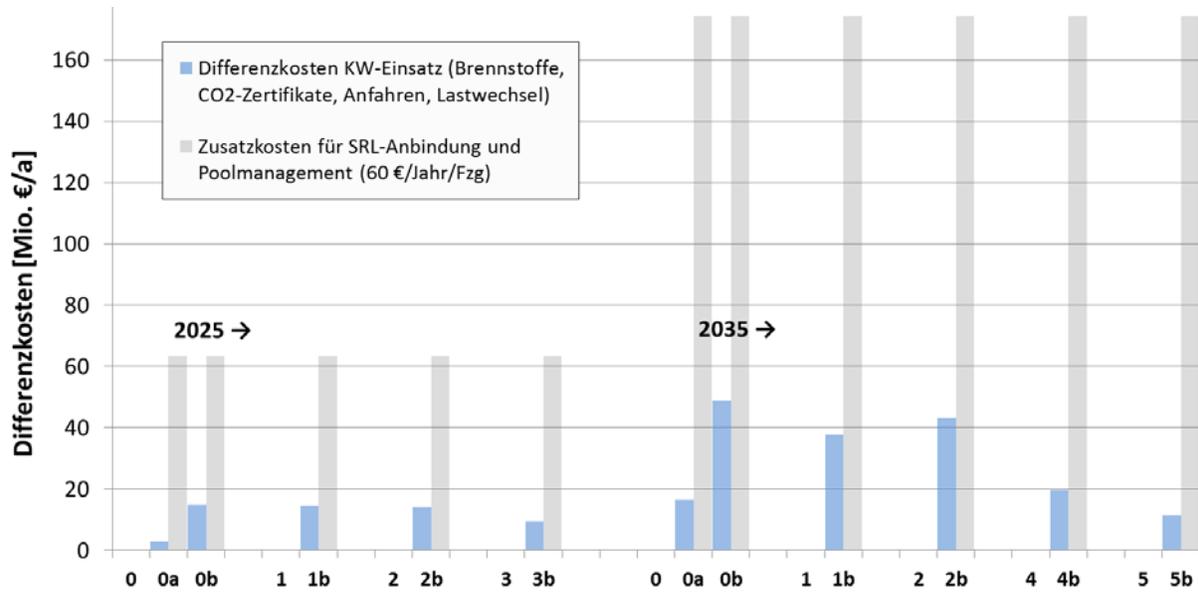


Abbildung 52: Differenzkosten des Kraftwerkseinsatzes vs. Zusatzkosten der verschiedenen Varianten

7.3 Erforschung des Alterungsverhaltens der Batterie

Für die Bereitstellung von Regelleistung im Sinne des Projektes INEES ist eine zusätzliche Be- und Entladung der Fahrzeugbatterie erforderlich. Da sich der Zustand der Fahrzeugbatterie und dessen Kapazitätsverlust durch diese weiteren Belastungen direkt auf die mögliche Reichweite eines Elektrofahrzeuges auswirkt, ist es notwendig, die Beanspruchung durch diese zusätzlichen Be- und Entladevorgänge zu untersuchen.

Definition der Lastprofile

Die Alterung einer Batterie hängt stark mit der Art der Belastung - dargestellt durch das sogenannte Lastprofil - zusammen. Zu den wesentlichen Einflussparametern gehören die Zelltemperatur, die Lade- und Entladeleistung, die Höhe der Entladehöhe und der Energiedurchsatz.

Das erwartete Belastungsprofil für den Anwendungsfall Regelleistung unterscheidet sich stark von dem üblichen Belastungsprofil eines Elektrofahrzeugs. Es wird erwartet, dass zur Erbringung von Regelleistung nur kurzzeitige Lade- und Entladeimpulse mit einer Leistung von 10 kW, gefolgt von längeren Pausenzeiten notwendig sein werden. Allerdings ist das konkrete Lastprofil nicht bekannt und musste im Rahmen des Projektes „INEES“ ermittelt werden.

Zu diesem Zweck wurden von LichtBlick und Volkswagen historische Abrufungsdaten analysiert. Die Netzfrequenz und der Sekundärregelleistungsbedarf des Netzregelverbundes werden von den Übertragungsnetzbetreibern (ÜNB) für den gesamten Netzregelverbund veröffentlicht.

Die Abrufung einzelner Anbieter erfolgt bedarfsgerecht durch den Übertragungsnetzbetreiber auf Grundlage einer sogenannten Merit-Order-Liste nach dem durch die Anbieter angebotenen Arbeitspreis (d.h. der Anbieter mit dem niedrigsten Arbeitspreis [€/MWh] wird zuerst abgerufen). Diese Daten werden auf einer gemeinsamen Internet-Plattform der Übertragungsnetzbetreiber anonym veröffentlicht.²¹ Die gesamte durch den ÜNB vorgehaltene Regelleistung ist größer als ein einzelner Abruf. Daher werden selten alle Anbieter gleichzeitig abgerufen. Anbieter, die einen niedrigen Arbeitspreis anbieten, werden generell häufiger abgerufen als Anbieter, die einen hohen Arbeitspreis anbieten. Theoretisch kann ein Anbieter vollständig über die 12 h dauernde Angebotszeitscheibe abgerufen werden.

Als Grundlage der zu erstellenden Belastungskennlinie wurden historische Abrufungsdaten des Jahres 2011 analysiert. Abbildung 53 zeigt die grundsätzliche Ableitung eines Sollsignals für verschiedene Anbieter.

²¹ www.regelleistung.net

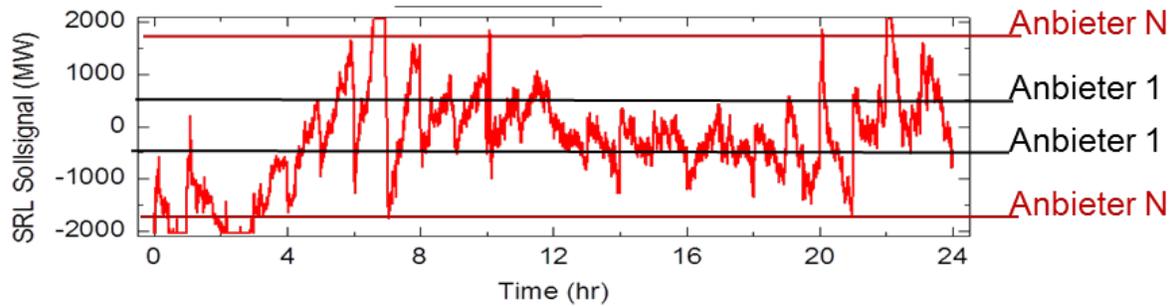


Abbildung 53: Beispiel für ein SRL-Sollsignal für unterschiedliche Anbieter

Abbildung 54 und Abbildung 55 zeigen zur Verdeutlichung des Einflusses des angebotenen Arbeitspreises das abgeleitete SRL-Sollsignal der Anbieter.

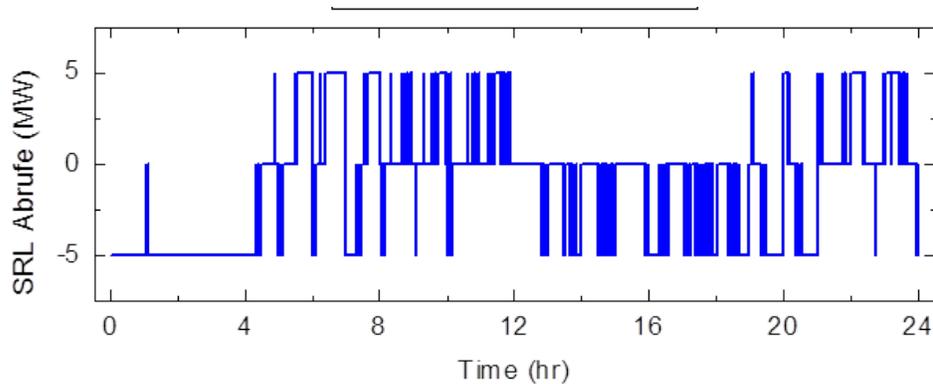


Abbildung 54: Abgeleitetes Soll-Signal für Anbieter 1

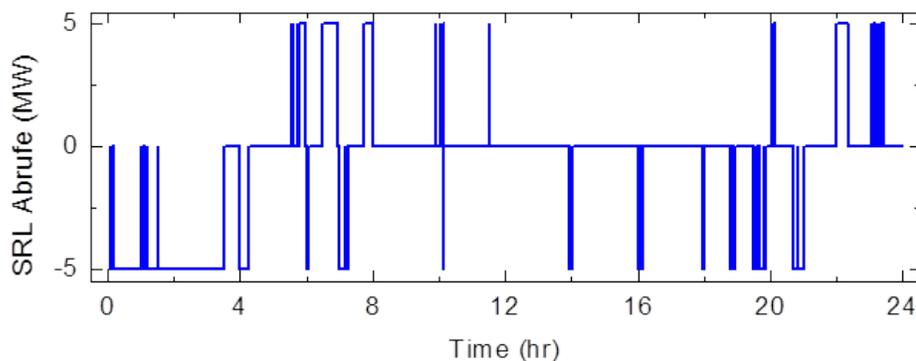


Abbildung 55: Abgeleitetes Soll-Signal für Anbieter N

Das Lastprofil der Batteriealterung unterscheidet sich für diese Anbieter stark voneinander. Zusätzlich wird die Ableitung eines Lastprofils dadurch komplexer, dass ein Abrufsignal durch die Poolsteuerung des Poolmanagers flexibel auf die Einzelfahrzeuge verteilt werden kann. Die Abrufe können sowohl positive als auch negative Leistungen (Laden- und Entladen) umfassen. Da die Abrufungssignale stochastisch verteilt sind, können sowohl mehrere positive als auch mehrere negative Abrufe aufeinander folgen. Die Energiebilanz eines Zeitraumes ist also

nicht zwangsläufig ausgeglichen. Dem Gesamtsystem muss in jedem Fall Energie zugeführt werden, um die teilnehmenden Fahrzeuge vom Ankunfts- auf den Abfahrtsladezustand zu laden.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wird ein Belastungsprofil für Teststandversuche abgeleitet, das die Häufigkeitsverteilung der Abrufe widerspiegelt. Dabei wird es jedoch so ausgelegt, dass die Energiebilanz ausgeglichen ist, so dass ein kontinuierlicher Betrieb möglich ist.

Weiterhin wurde festgestellt, dass die Preise für die Leistungsvorhaltung kontinuierlich sinken. Entgegen der ersten Annahmen war es daher wichtig, das Lastprofil so festzulegen, dass auch Aussagen über einen hohen Energiedurchsatz bei niedrigen Arbeitspreisen möglich sind. Abbildung 56 zeigt den Leistungsverlauf der definierten typischen Belastungskennlinie SRL.

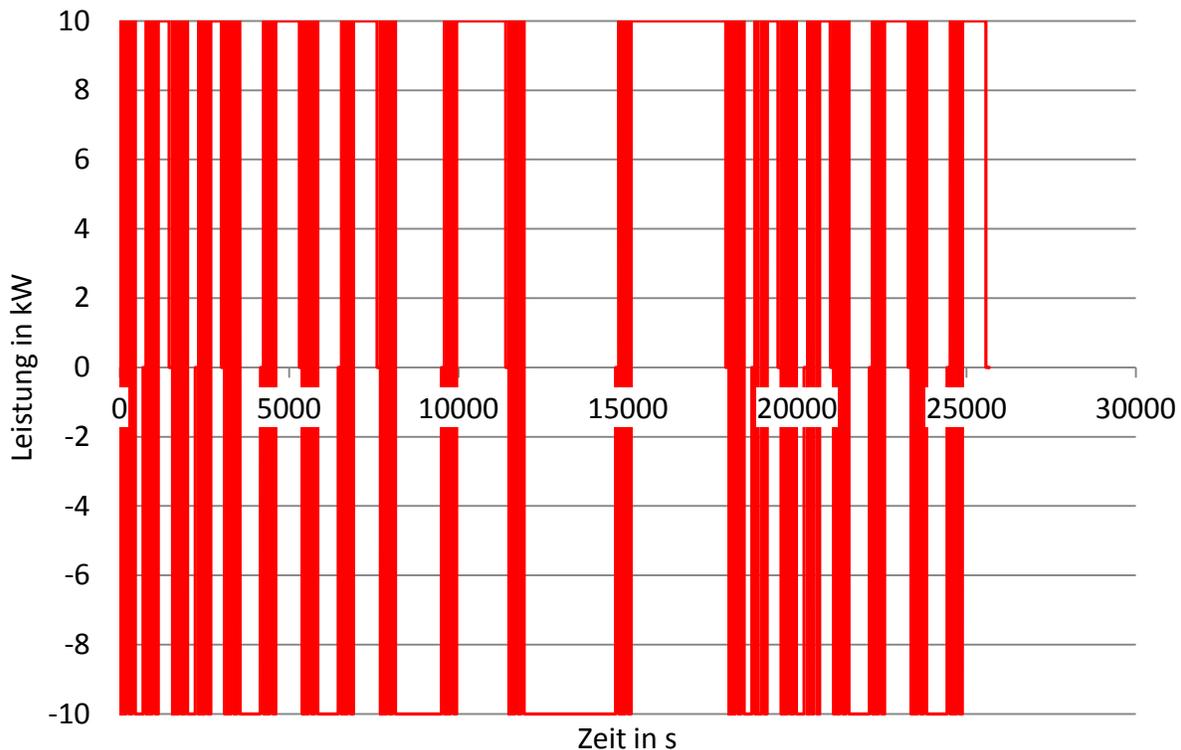


Abbildung 56: Typische Belastungskennlinie SRL, Leistung

Durchführung Tests Zellalterung

Zur Untersuchung, ob die Bereitstellung von SRL bei einer Batterie zu einer zusätzlichen Alterung führt, wurden auf Basis des festgelegten Lastprofils verschiedene Tests auf Zellebene durchgeführt.

Da neben dem Lastprofil der Ladezustandsbereich der Belastung einen möglichen Einflussfaktor auf die Alterung darstellt, wurden drei Batteriezellen bei verschiedenen Anfangsladezuständen (95 Prozent, 60 Prozent, 30 Prozent) untersucht. Das Lastprofil wird im Weiteren als voller Ladedurchsatz bezeichnet. Abbildung 57 zeigt den Ladezustandsverlauf der drei Zellen bei Belastung mit dem SRL-Profil. Der gesamte Energiedurchsatz in diesem Profil beträgt ~160 kWh/Tag.

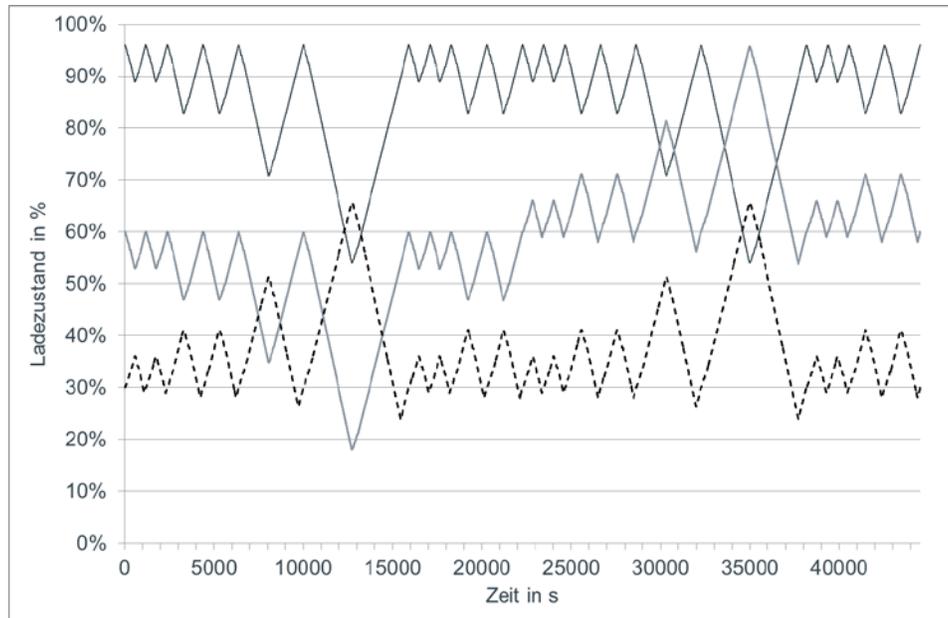


Abbildung 57: Ladezustandsverlauf des SRL-Profiles „voller Ladungsdurchsatz“ bei verschiedenen Anfangsladezuständen

Um den Einfluss von Wechselwirkungen zwischen SRL und dem normalen Fahrbetrieb zu untersuchen, wurde als zusätzliche Testbedingung bei einem Ladezustand von 95 Prozent das SRL-Profil, welches sich durch den Einsatz der Batterien zur Erbringung von Regelleistung ergibt, mit dem Fahrprofil Neuer europäischer Fahrzyklus (NEFZ) kombiniert.

Ein weiterer möglicher Einflussfaktor auf das Alterungsverhalten ist die Zelltemperatur. Um zu evaluieren, ob die Erbringung von Regelleistung von unterschiedlichen Umgebungstemperaturen beeinflusst wird, fand dazu eine Variation der Testtemperatur statt. Zusätzlich zu der durchschnittlichen Temperatur in Deutschland von 10 °C wurden 45 °C und –10 °C untersucht. Diese Versuchsreihen wurden von dem externen Dienstleister AIT über einen Zeitraum von jeweils 6 Monaten durchgeführt. Parallel dazu wurden in der Volkswagen Konzernforschung Erkenntnisse aus unter vergleichbaren Bedingungen (gleiche Außentemperatur und Ladezustand) durchgeführten kalendarischen Alterungstests genutzt, um einen Vergleich zu den INEES-spezifischen Testabläufen zu erlangen. Erste Ergebnisse der Alterungstests sind in Abbildung 58 gezeigt.

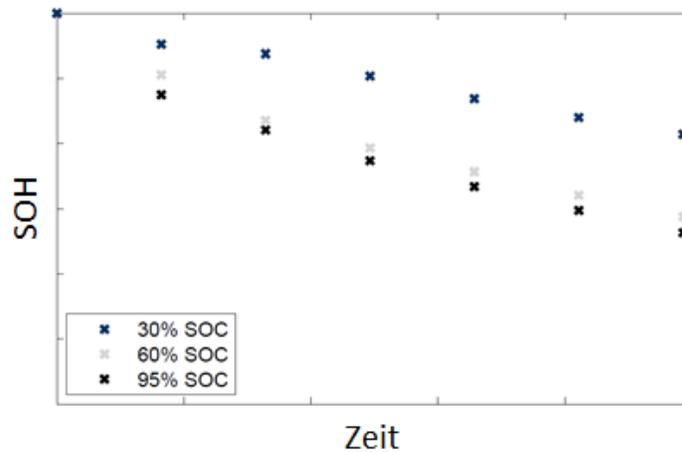


Abbildung 58: Messergebnisse der Alterungstests bei 45°C und verschiedenen SOC

Die ersten Ergebnisse zeigen eine hohe Alterung, die stark von den gewählten Anfangsladezuständen abhängt. Weiterhin haben die Ergebnisse einen zusätzlichen Einfluss durch die Be- und Entladung zur Bereitstellung von Regelleistung gezeigt. Dies ist vor allem auf den hohen Energiedurchsatz der gewählten Lastprofile zurückzuführen. Jedoch ist die daraus abgeleitete, erwartete Alterung auch bei einem geringeren Energiedurchsatz nicht irrelevant und höher als zunächst erwartet. Aus diesem Grund war es notwendig, die Testmatrix um weitere Versuche zu erweitern. Das Ziel dieser Zelltests war:

1. Detaillierte Untersuchung der Alterung bei einem geringen Energiedurchsatz
2. Untersuchung von Optionen zur Reduzierung der Alterung

Im Speziellen wurde durch eine Variation der Pausenzeiten der Ladungsdurchsatz des SRL-Profiles halbiert. Dieses Profil wird im Weiteren als „halber Durchsatz“ bezeichnet. Darüber hinaus wurden weitere Ladezustandsbereiche zusätzlich zu den Ladezuständen (95 %, 60 % und 30 %) untersucht.

Zu den Optionen der Reduktion der Alterung gehören eine geringere Lade- und Entladeleistung sowie eine aktive Steuerung des Ladezustandsbereiches, in dem die zusätzliche Be- und Entladung erfolgt. Zu diesem Zweck wurden am Volkswagen Test Zentrum Hochvolt (TZH) weitere Messreihen begonnen.

Tabelle 9 zeigt eine Beschreibung der erweiterten Zelltests.

Tabelle 9: erweiterte Messreihen

Test	Profil	Temperatur
1	„Halber Durchsatz“	45°C
2	„Halber Durchsatz“	45°C
3	„Halber Durchsatz“	45°C
4	„Halber Durchsatz“+ Fahrzyklus	45°C
5	„Halber Durchsatz“	-10°C
6	„Halber Durchsatz“	-10°C
7	„Halber Durchsatz“	-10°C
8	„Halber Durchsatz“ + Fahrzyklus	-10°C
9	„Halber Durchsatz“ begrenzte Hübe	10°C
10	„Halber Durchsatz“ begrenzte Hübe	10°C
11	„Halber Durchsatz“ begrenzte Hübe	10°C
12	„Halber Durchsatz“ begrenzte Hübe	10°C
13	„Halber Durchsatz“ begrenzte Hübe	10°C
14	„Halber Durchsatz“ begrenzte Hübe	10°C
15	Halbe Leistung	10°C
16	Halbe Leistung	10°C
17	Halbe Leistung	10°C
18	Halbe Leistung + Fahrzyklus	10°C
19	Referenzzyklus, hohe Fahrleistung	10°C
20	Referenzzyklus, hohe Fahrleistung	10°C
21	Referenzzyklus, hohe Fahrleistung	10°C
22	Referenzzyklus, geringe Fahrleistung	10°C
23	Referenzzyklus, geringe Fahrleistung	10°C
24	Referenzzyklus, geringe Fahrleistung	10°C

In Abbildung 59 ist der Vergleich der Alterung bedingt durch die reine Lagerung (Punkte) zu der Alterung mit SRL-Profil (Kreuze) bei verschiedenen Temperaturen und einem Anfangsladezustand von 95 Prozent beispielhaft dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Zusatzalterung bei höheren Temperaturen gering ist, da dort der beschleunigte Aufbau der Passivierungsschicht bedingt durch die hohe Temperatur den Hauptalterungsanteil darstellt, welcher unabhängig vom Strom – also der Belastung – ist. Bei niedrigeren Temperaturen kommt es dagegen durch Abscheidung elementaren Lithiums und durch mechanischen Stress innerhalb der Zelle beim Auf- und Entladen zu einer stärkeren zusätzlichen Alterung durch Verwendung des SRL-Profiles.

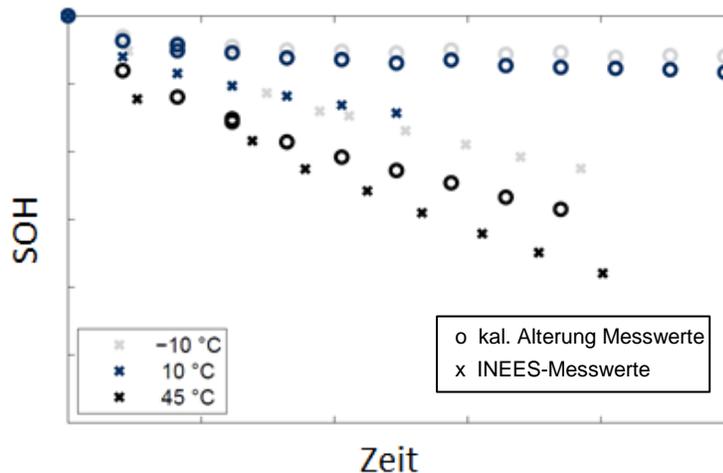


Abbildung 59: Vergleich der Alterung durch reine Lagerung und durch SRL-Profil

Durch Erweiterung der Testmatrix um die zusätzlichen Versuche beim TZh konnten genügend Daten gesammelt werden um eine ausführliche Auswertung zu starten. Es wurden neben dem Ladezustand und der Temperatur weitere Parameter variiert, so dass deren Einfluss auf die Alterung ebenfalls untersucht werden konnte und ggf. Wechselwirkungen festgestellt werden können. Die Ergebnisse dieser Auswertung werden im Folgenden dargestellt.

Auswertung Tests Zellalterung

Zur Bestimmung der Zusatzalterung durch Verwendung von SRL werden die verschiedenen Tests mit SRL-Profilen mit den entsprechenden Lagerungstests verglichen und die zusätzliche Alterung daraus extrahiert. Der Kapazitätsverlust bei der reinen Lagerung beruht hauptsächlich auf dem Wachstum der Passivierungsschicht (SEI) auf der Anode, welche die weitere Alterung hemmt. Unter der Annahme, dass die durch den Strom der INEES-Profile bedingte Alterung keinen degressiven Anteil besitzt, kann die Funktion des Alterungszustandes (engl.: State of Health (SOH)) um einen linearen Term ergänzt werden. Die SOH-Funktion ergibt sich damit zu:

$$\text{SOH [Prozent]} = 100 - k_{kal} \left[\frac{\text{Prozent}}{a} \right] \cdot \sqrt{t} - k_{INEES} \left[\frac{\text{Prozent}}{\text{kWh}} \right] \cdot E$$

Der Koeffizient vor dem Wurzelterm k_{kal} wird jeweils aus den Messwerten der entsprechenden Lagerung übernommen. Somit wird für die INEES-Versuche lediglich der Faktor k_{INEES} vor dem linearen Term bestimmt. Diese wird in Prozent-Zusatzalterung pro kWh angegeben und kann zur Hochrechnung der Zusatzalterung durch die SRL-Belastung verwendet werden.

In Abbildung 60 sind die Messdaten aus der Abbildung 59 erneut dargestellt, ergänzt wurden diese durch die Ergebnisse der Modellierung. Dabei sind die gestrichelten Linien die Modellergebnisse der Alterung durch reine Lagerung, die durchgezogenen Linien die Ergebnisse zu der Alterung durch SRL-Profil.

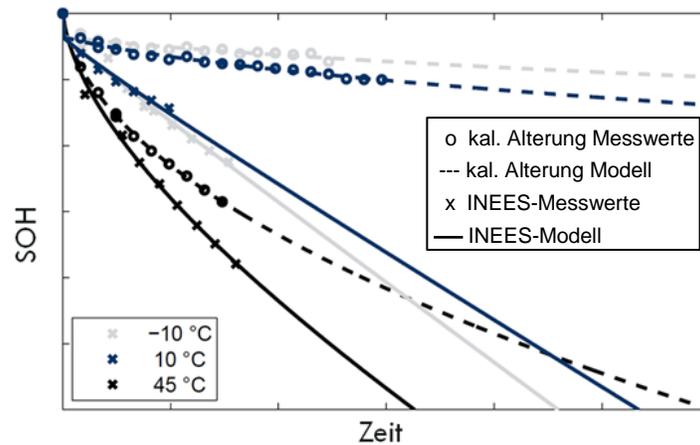


Abbildung 60: Kapazität abhängig von verschiedenen Temperaturen

Es ist zu erkennen, dass die über die Wurzelfunktion angenäherte berechnete Alterungsfunktion gut mit den Messwerten aus den Versuchen übereinstimmt.

Höhere Ladezustände führen zu größeren Kapazitätsverlusten bei der Lagerung, da dadurch eine höhere Konzentration von reaktionsfähigem Lithium an der Anode (z. B. zur Bildung der Passivierungsschicht) vorhanden ist. Dieser Effekt ist in Abbildung 61 zu erkennen, in der der Kapazitätsverlust nach einem halben Jahr Lagerung für die Profile voller Durchsatz und halber Durchsatz in Abhängigkeit von verschiedenen SOC's (State of Charge) dargestellt wird.

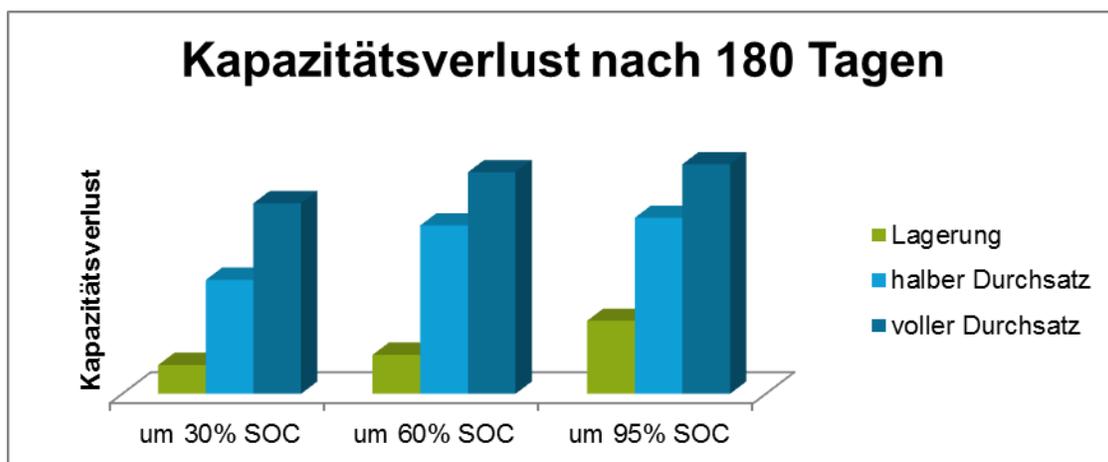


Abbildung 61: Kapazitätsverlust nach 180 Tagen

Während die Gesamtalterung vom durchschnittlichen Ladezustand abhängt, hat diese auf die Zusatzalterung durch die SRL-Profile keinen direkten Einfluss. Jedoch kann die Verwendung

von INEES einen positiven Effekt auf die Gesamalterung haben, beispielsweise wenn der Fahrzeugbesitzer das Fahrzeug dadurch nicht vollgeladen über Nacht stehen lässt, sondern es durch INEES auf einem niedrigen Ladezustand (abhängig von der minimalen Reichweite) gehalten wird. Auch die Kombination von INEES mit dem NEFZ-Fahrprofil zeigte keine zusätzliche Alterung. Die Variation des Ladungsdurchsatzes durch die Kombination aus Lagerung und INEES zeigt, dass die Zusatzalterung allein vom Durchsatz abhängig ist, daher ist eine Angabe der Zusatzalterung k_{INEES} in Prozent/kWh sinnvoll.

Die Ergebnisse dieser Zelltests und der Auswertungen haben es ermöglicht, für die in Kapitel 6 durchgeführte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung eine Abschätzung der Kosten für die zusätzliche Batteriealterung vorzunehmen. Die dort angesetzten Kosten sind abhängig vom sich tatsächlich ergebenden Energiedurchsatz des jeweiligen Fahrzeuges, und ob die hier untersuchten Optimierungsmaßnahmen wie die Einhaltung begrenzter Ladezustandsbereiche umgesetzt werden können.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Ausblick ist festzustellen, dass neben der Elektromobilität auch weitere, neue Technologien eine Teilnahme am Regelleistungsmarkt anstreben. So wird derzeit untersucht, ob beispielsweise die Erbringung von Regelleistung mit Windkraft- oder Photovoltaikanlagen möglich ist. Zudem gibt es mehrere Projekte mit großen, stationären Batteriespeichern. Zukünftig steht der energieeffiziente Einsatz von Elektrofahrzeugen dazu in Konkurrenz. Eine Abschätzung zur allgemeinen Entwicklung des Energiesystems und die Realisierbarkeit des INEES-Konzeptes ist in Abschnitt 8.1 zu finden.

Neben der allgemeinen Entwicklung am Energiemarkt ist auch die weitere (technologische) Entwicklung der Elektromobilität zu beachten. Es ist zu erwarten, dass Elektrofahrzeuge zukünftig verstärkt in das lokale Energiemanagementsystem bspw. des Hauses eingebunden werden. Die Erbringung von Regelleistung als Teilfunktion sollte dies berücksichtigen und andere Einsatzzwecke möglichst nicht ausschließen (siehe Abschnitt 8.2).

Das INEES-Projekt hatte zum Ziel, die Erbringung von Sekundärregelleistung mit einem Elektrofahrzeugpool zu untersuchen. Anbieter an diesem Markt müssen vorab mit ihren Technologien eine Präqualifikation (Marktzulassung) durch die Übertragungsnetzbetreiber durchlaufen. Die im Projekt eingesetzten Komponenten und Systeme wurden mit Hinblick auf die, in den Präqualifikationsunterlagen definierten Anforderungen entwickelt. Dabei wurden wichtige Erkenntnisse, entwickelt für eine Weiterentwicklung der Komponenten, identifiziert (Abschnitt 8.3).

Die Projektpartner kommen zu der gemeinsamen Ansicht, dass die Erbringung von Sekundärregelleistung durch zusammengeschlossene Elektrofahrzeuge nach dem im Projekt dargestellten Prinzip grundsätzlich möglich ist. Im Rahmen des Projektes wurden offene Herausforderungen identifiziert, die für eine spätere Präqualifikation zu beachten sind. Die wichtigsten regulatorischen Hindernisse sind in Abschnitt 8.4 beschrieben.

8.1 Realisierbarkeit des Konzeptes im Energiesystem der Zukunft

Die Bundesregierung hat sich zum Ziel gesetzt, die Klimagasemissionen bis 2050 um mindestens 80 Prozent gegenüber 1990 zu reduzieren. Dabei bestehen Freiheitsgrade, wie dieses Ziel zu interpretieren ist (inklusive oder exklusive internationalen Verkehrs, mögliche Berücksichtigung eines europäischen Lastenausgleichs). Ein mögliches Zielszenario ist im Projektteil „Analyse und Darstellung der Klimawirksamkeit der Elektromobilität in zukünftigen Stromversorgungsszenarien“ vorgestellt.²² Unabhängig von den Bandbreiten wird deutlich, dass nur durch eine zunehmende Elektrifizierung weiterer Bereiche des Energieversorgungssystems (Wärme, Industrie, Verkehr) bei begrenzten wirtschaftlichen und technischen Potenzialen von Biomasse, Solarthermie oder Geothermie Klimaziele erreichbar werden. Verbunden ist damit ein Anstieg des Stromverbrauchs in Summe durch einen hohen Zuwachs an neuen Verbrauchern bei gleichzeitigen Effizienzsteigerungen in bestehenden Stromanwendungen. Dabei stellen Wind-

²² Veröffentlicht in separatem Projektbericht; das Szenario ist auch Grundlage der Analysen in Kapitel 7.2

kraft und PV aufgrund des hohen technischen und wirtschaftlichen Ausbaupotenzials die tragenden Säulen des Energieversorgungssystems dar.

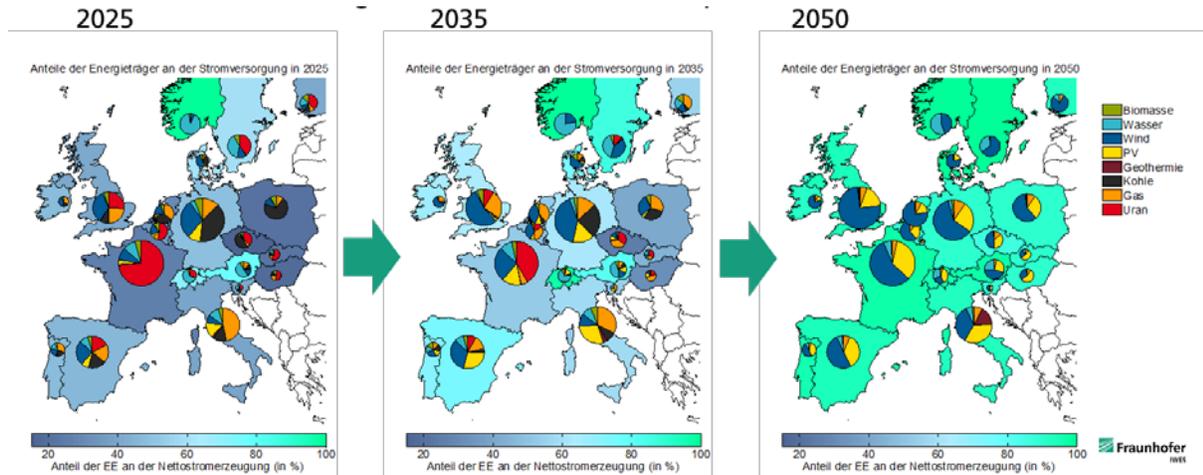


Abbildung 62: Zeitliche Entwicklung des EE-Ausbaus in Europa

Um den notwendigen EE-Ausbaubedarf zu begrenzen und wetterabhängigen EE-Strom effizient verwerten zu können, ist auch im Verkehrssektor eine hohe direkte Stromnutzung (BEV und PHEV) notwendig. Andererseits müssen neue Verbraucher auch ein hohes Maß an Flexibilität bereitstellen. Dies betrifft den flexiblen Strombezug insbesondere zu Zeiten niedriger Börsenpreise und die Bereitstellung von Systemdienstleistung. Um zu vermeiden, dass konventionelle Kraftwerke trotz sehr hoher EE-Einspeisung sich drehend am Netz befinden, müssen auch neue Verbraucher Regelleistung bereitstellen.

Der Strommarkt wird zunehmend europäisiert (Market Coupling, Abgleich Regelleistung, Netzausbau und dynamische Bewirtschaftung der Kuppelleistungen, gemeinsame Bewertung von Versorgungssicherheit). Auf der anderen Seite kann innerdeutsch das Netz sowohl auf Übertragungs- als auch auf Verteilungsebene nicht überdimensioniert ausgebaut werden. Hier werden technisch-ökonomische Lösungen entwickelt, die im Fall von Netzengpässen einen anderen Anlageneinsatz von Erzeugern, Verbrauchern und Speichern auch auf niederen Netzanschlussebenen erzielen. Auch hierfür ist ein hohes Maß an Flexibilität der Elektromobilität notwendig, um zu einem möglichst effizienten Energieversorgungssystem in Hinblick auf Stromgestehungs- und Netzkosten zu kommen. Zudem besteht im Bereich der Eigenstromversorgung ein wirtschaftliches Potenzial, welches zum einen eine Flexibilität des Verbrauchs, zum anderen Lösungen zur effizienten Kombination mit den Anreizen der übergeordneten Strommarktes und Netzes bedarf.

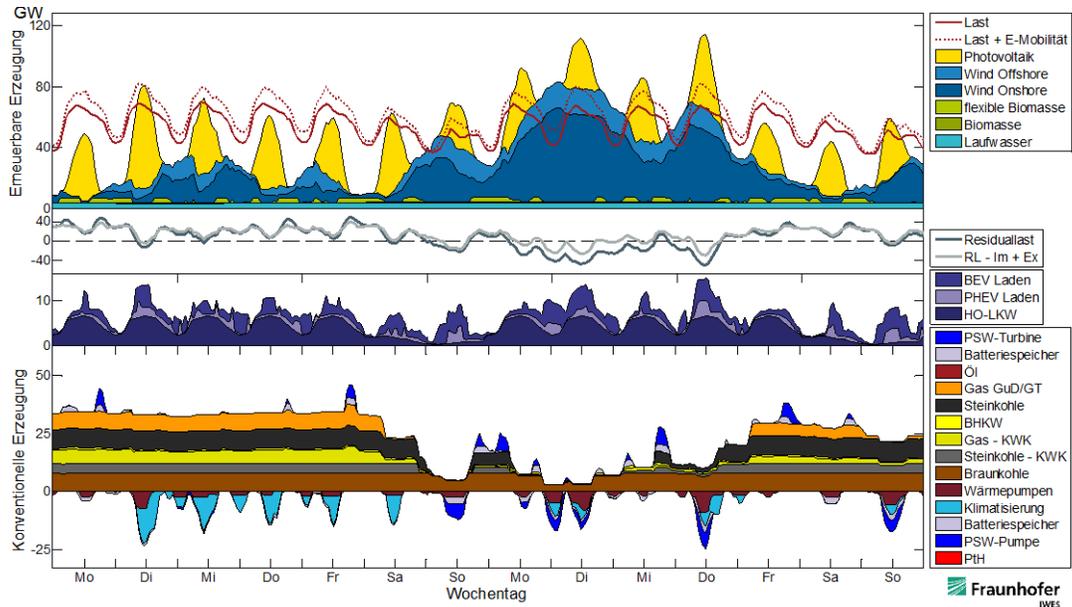


Abbildung 63: Verbrauch und Lastdeckung – zwei Beispielwochen 2035

8.2 Netzintegration von Elektrofahrzeugen im Energiesystem der Zukunft

Bei der Weiterentwicklung der laderelevanten Funktionen von Elektrofahrzeugen steht der Kundennutzen im Mittelpunkt. Einzelfunktionen, die zu einer Optimierung des Ladeereignisses beitragen, sollten sich zur Erreichung dieses Ziels zukünftig bestmöglich ergänzen und nicht miteinander konkurrieren.

Da 80 Prozent der Ladeereignisse an heimischen Ladeorten zu erwarten sind, werden erste Teilfunktionen, die Netzintegrationsaspekte aufgreifen, in diesem Kontext zu betrachten sein. Die Orientierung des Ladens an das Dargebot lokal erzeugter elektrischer Energie mit dem Ziel der Eigenverbrauchsmaximierung stellt dabei eine solche Teilfunktion dar. Für die Umsetzung dieser Funktion ist der Einsatz eines Energiemanagementsystems (EMS) zu erwarten, das sich in der Kundenumgebung befindet. Dieses hat zur Aufgabe, neben dem Energiebedarf des Fahrzeugs auch alle weiteren lokalen Energiebedürfnisse je nach Kundenwunsch hinsichtlich Zeitpunkt und Leistung z. B. an der lokalen Stromerzeugung auszurichten. Das Fahrzeug erhielt in diesem Fall monetäre Anreize vom EMS und antwortete darauf unter Berücksichtigung der Kundenvorgabe (Kostenminimal, ausschließlich EE ...) mit seinem Ladeplan. Das EMS lässt den Ladeplan in die weitere energetische Optimierung der Kundenumgebung einfließen.

Die Übertragung von Daten, die für eine solche Optimierung des Ladevorgangs erforderlich sind, wird künftig direkt über das Ladekabel oder ein lokales drahtloses Netzwerk zwischen Fahrzeug und EMS unter Verwendung des internationalen Standards ISO 15118 erfolgen. Der Wallbox wird dann die Funktion eines Gateways zukommen.

Die im Projekt INEES untersuchte Funktion „Erbringung von Sekundärregelleistung“ ist eine weitere Teilfunktion, die überregionale Schwankungen ausgleichen hilft. Beide Teilfunktionen gilt es zukünftig in geeigneter Weise zusammenzuführen, sodass für den Kunden sowohl lokal als auch überregional ein größtmöglicher Nutzen entstehen kann, ohne hierbei den Kundennutzen einzuschränken. Im Projekt INEES wurde ein proprietärer Kommunikationskanal genutzt, der eine kurze Latenzzeit der Signalkette ermöglichte, jedoch im Massenmarkt ungeeignet ist, eine lokale Optimierung effizient zu unterstützen. Eine Berücksichtigung lokaler Optimierungsziele war jedoch nicht Bestandteil des Projektes.

In einem künftigen Szenario könnte im Vergleich zu diesem proprietären Kommunikationskanal nicht das Fahrzeug der Empfänger von Signalen zur spontanen Ladeleistungsbeeinflussung sein, sondern das EMS in der Kundenumgebung. Das EMS könnte die Flexibilität aller intelligenten Verbraucher (wie z. B. des Elektrofahrzeugs) ermitteln und die gesamte Flexibilität des Haushaltes einer übergeordneten Instanz anbieten, die diese Flexibilität gegen Entgelt nutzen möchte. Der Abruf der Flexibilität könnte sich dann an den aktuellen Funktionsprinzipien der Regelleistung orientieren und eine Weiterentwicklung dieser darstellen. Dieser Ansatz wirft jedoch offene Fragestellungen hinsichtlich der energiewirtschaftlichen Abwicklung und technischen Umsetzung auf, die im Zusammenhang mit der Erbringung von Regelenergie zu beachten sind. Diese sind in weiteren Forschungsarbeiten zu untersuchen.

8.3 Empfehlungen zur technischen Überarbeitung der Komponenten

Die Komponenten des Fahrzeugs funktionierten grundsätzlich stabil und waren von den INEES-Teilnehmern gut bedienbar. Dennoch kann ein zukünftiges Seriensystem in fünf Bereichen noch nutzerfreundlicher und effizienter gestaltet werden:

1. Verbesserte automatische Wiederherstellung der Funktionsbereitschaft nach temporären Systemfehlern. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Systemfehler im Rahmen einer Serienentwicklung weitestgehend ausgeschlossen und Unwägbarkeiten in den jeweiligen Komponenten lokal abgefangen werden.
2. Optimierung der Kommunikation zwischen Fahrzeug und Server mit dem Ziel, die Erreichbarkeit zu verbessern und Latenzzeiten zu minimieren. Möglich wäre dies durch eine Datenübertragung via Ladekabel, kombiniert mit LAN- oder WLAN-Verbindungen zu den Backend-Servern.
3. Anpassung der Betriebsstrategie zur Minimierung der Batteriealterung durch geringe Lade- und Entladehübe.
4. Reduzierung der Verlustleistung durch Vermeidung von Ladezuständen, welche die Ladeströme stark begrenzen (nahe 0 Prozent und nahe 100 Prozent Ladefüllstand).
5. Anpassen von Symbolik und Terminologie der Anzeigen der INEES-Bedienelemente, um die intuitive Bedienbarkeit zu verbessern.

Ebenso besteht auch bei der im Vorhaben zunächst nur als Experimentiersystem konzipierten Ladestation noch ein beträchtliches technisches Weiterentwicklungspotenzial. Allem voran wäre hier die Entwicklung dieser Ladestation zu einer serientauglichen Produktlösung mit Erfüllung aller üblichen Serienproduktstandards hinsichtlich Zuverlässigkeit, Lebensdauer, anwendungsspezifischem Design und Kostenreduktion zu nennen, einen entsprechenden Bedarf seitens der Elektromobilität und Kundennachfrage einerseits und langfristig stabile normative Standards (insb. Schnittstellen) andererseits vorausgesetzt. Insgesamt wurden mehrere technische Schwerpunktbereiche für einen notwendigen Weiterentwicklungsbedarf identifiziert:

1. Sicherstellung einer deutlich robusteren Kommunikation zwischen Fahrzeug und Ladestation inkl. einer herstellerunabhängigen Interoperabilität.
2. Nutzung der kabelgebundenen Kommunikation anstelle der derzeitigen Funklösungen für die Verbindung von Fahrzeug, Ladestation und zentraler Poolbetriebsführung für die Regelleistungserbringung.
3. Einbindung der sich aktuell abzeichnenden Standards zur Energiemanagement-Anbindung von Fahrzeugen an stationäre Heimenergiemanagementsysteme (z. B. für PV-Eigenverbrauchsoptimierung oder aber auch effiziente Nutzung variabler Stromtarife usw.), sodass die unterschiedlichen Use Cases, was die Schnittstellen und Protokolle betrifft, miteinander verträglich sind und ein einfacher Wechsel zwischen den verschiedenen Betriebsmodi möglich wird.
4. Ein Ersatz der derzeit noch bestehenden Anforderung der galvanischen Trennung (Fahrzeug/Ladestation) durch andere, kostengünstigere Lösungen – wie beispielsweise in der Photovoltaik heute bereits üblich – wird die Effizienz verbessern und Kosten sparen.
5. Nutzung der Wechselrichter-Messdaten auch für Zwecke des Regelleistungsnachweises gegenüber dem ÜNB und entsprechende Anpassung der Systemarchitekturen in der Ladestation (Schnittstellen, Protokolle), siehe auch Ausführungen hierzu in Kapitel 4.4.3.

Das System SchwarmDirigent[®] wurde im Projekt hinsichtlich der Anbindung von Elektrofahrzeugen des Typs e-up! entwickelt. Zukünftig ist es notwendig, über eine generische Schnittstelle die Möglichkeit zu haben, auch weitere Fahrzeugtypen einzubinden. Zudem sind die im Projekt zwi-

schen SchwarmDirigent[®] und Fahrzeug auszutauschenden Daten auf die wirklich zwingend notwendigen Daten zu begrenzen, hier hat eine Überarbeitung zu erfolgen. Notwendige Anpassungen an den im Projekt entwickelten Prozessen im SchwarmDirigent[®] sind in Kapitel 4.4.2 beschrieben.

8.4 Handlungsempfehlungen zur Entwicklung der regulatorischen Rahmenbedingungen

Im Rahmen des Projektes wurde eine Bewertung der bestehenden energierechtlichen Rahmenbedingungen und des notwendigen Regulierungsbedarfs für die Einbindung im Energiemarkt und die wirtschaftliche Optimierung von Elektrofahrzeugen vorgenommen. Daraus wurden Handlungsempfehlungen in Richtung Politik und Verbände zur Anpassung des energie-wirtschaftlichen Rahmens erarbeitet.

8.4.1 Regulatorischer Rahmen

Das in INEES umgesetzte Zähler- und Messkonzept hat sich in den bisherigen regulatorischen Rahmen gut eingefügt. Es wurden jeweils pro bidirektionaler Ladestation ein eigener Netzanschlusspunkt gesetzt. Eine registrierende Lastgangmessung diente der energiewirtschaftlichen Abrechnung der eingespeisten und bezogenen Energiemengen gegenüber dem Verteilungsbetreiber sowie zu Nachweisführungszwecken gegenüber dem Übertragungsbetreiber.

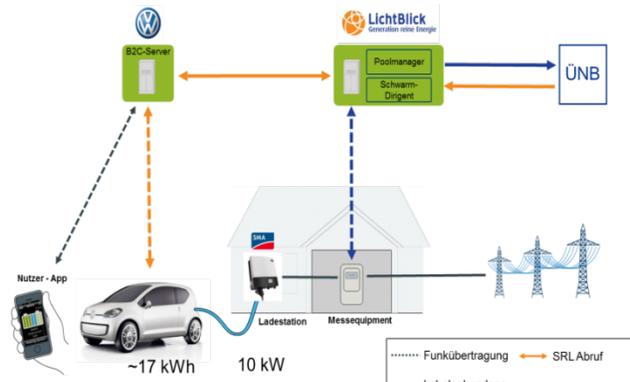


Abbildung 64: Übersicht Gesamtsystem INEES

Der Rechtsrahmen generell für Systemdienstleistungen findet sich im Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) und in den dazugehörigen Verordnungen. Die Regel- und Systemverantwortung der Übertragungsbetreiber ist in den §§ 11, 12, 13 Energiewirtschaftsgesetz geregelt. Die Beschaffung von Regelenergie (SRL) in § 2 Nr. 9, 10 Stromnetzzugangsverordnung (StromNZV), die Abrechnung von Regelenergie in § 8 I, II StromNZV.

Für die Erbringung von Sekundärregelenergie aus einem Pool von Elektrofahrzeugen können die bisherigen Rahmenbedingungen gut eingehalten werden. In den §§ 17 und 20 EnWG ist der Netzanschluss- und Netzzugangsanspruch für Anlagen eines Anbieters für SRL geregelt. In § 22 Abs. 2 EnWG ist die Pflicht der ÜNB zum Anbieten eines transparenten, diskriminierungsfreien Verfahrens geregelt. Über die §§ 6 – 9 StromNZV sind die Beschaffung, Erbringung von Regelenergie geregelt und über § 6 Abs. 2 i. V. m. § 27 Abs. 2 StromNZV findet das Festlegungsverfahren der BNetzA BK 6-10-098 vom 12.04.2011 entsprechende Anwendung. Zur Präqualifikation und damit Marktteilnahme muss mit dem jeweiligen Übertragungsbetreiber, in dessen Regelzone SRL angeboten werden soll, nach Durchführung eines erfolgreichen Präqualifikationsverfahrens ein Rahmenvertrag abgeschlossen werden.

In dem Festlegungsverfahren BNetzA, BK 6-10-098 zur Festlegung zur Durchführung der Ausschreibung von Regelenergie sind die relevanten Vorgaben für die Erbringung von SRL in den Ziffern 1 – 10 festgelegt. U. a. sind dort die wöchentliche Ausschreibung (Ziffer 1), die Ausschreibungszeiträume (zwei Zeitscheiben (HT/NT), Ziffer 4), die Mindestangebotsgröße 5 MW pos./neg. (Ziffer 7), das mögliche Pooling von Anlagen (Ziffer 8), die Möglichkeit der Besicherung der technischen Einheit durch Anlagen Dritter (Ziffer 9) geregelt.

Für den erfolgreichen Abschluss eines Präqualifikationsverfahrens vor Abschluss eines Rahmenvertrages müssen die Präqualifikationsanforderungen aus dem Transmission Code 2007 nebst Anhängen und IT-SRL-Anforderungen eingehalten werden.

8.4.2 Hindernisse und Handlungsempfehlungen

Mit den Erkenntnissen des Projektes und nach der Analyse des regulatorischen Rahmens sind folgende Hindernisse bei der Umsetzung der Projektansätze in einem möglichen Massenmarkt zu benennen.

Technische Hindernisse

Die bidirektionale Anbindung der Elektrofahrzeuge ist eine Voraussetzung für die wirtschaftliche Darstellbarkeit, eine bidirektionale Ladeinfrastruktur im Massenmarkt ist jedoch erst in einem langfristigen Zukunftsmarkt zu erwarten. Perspektivisch müssen die Zusatzkosten für die Bidirektionalität sinken und/oder sich die Bidirektionalität als Standard etablieren.

Die leittechnische Anbindung von Elektrofahrzeug/Ladestation \leftrightarrow [Backend-OEM] \leftrightarrow Anbieterleitstelle muss hohen, durch die Übertragungsnetzbetreiber festgelegten Präqualifikationsanforderungen genügen. Die geforderte Zeitdauer zur Weitergabe SRL-relevanter Signale von < fünf Sekunden lässt sich perspektivisch in einem serienreifen System einhalten, aber die Umsetzung einer geschlossenen Benutzergruppe bleibt eine Herausforderung. Eine technische Lösung ist möglich, unter Umständen jedoch mit höherem Aufwand verbunden.

Zudem bleibt die weitere Standardisierung der leittechnischen Schnittstelle von Elektrofahrzeug und Ladestation eine Herausforderung. Im Projekt wurde ein proprietärer Ansatz gewählt, in einem Massenmarkt ist dies nicht möglich.

Es ist unklar, wie eine Präqualifikation der technischen Einheiten bezogen auf Elektrofahrzeuge und Ladestationen durchzuführen ist.

Perspektivisch muss es dem Anbieter von Regelleistung möglich sein, die momentane Leistung einer technischen Einheit – die dem ÜNB zu melden ist – mit vorhandenen Systemen zu erfassen. Im Falle der Elektromobilität sind diese Systeme im Fahrzeug oder der Ladestation bereits integriert.

Weitere identifizierte Herausforderungen sind die Informationen über Wartungsarbeiten auf der Kommunikationsstrecke, die geforderte Redundanz der Übertragungswege und die Anforderungen an die Verfügbarkeit.

Für einen späteren Massenmarkt müssen bei der künftigen Anbindung von Elektrofahrzeugen über ein Smart Meter Gateway die Anforderungen an die technische Richtlinie und die Schutzprofile des BSI eingehalten werden. Es bleibt zu klären, ob künftig über das SMGW dezentrale kleinteilige Anlagen ferngesteuert und Elektrofahrzeuge beeinflusst und der Datenschutz und die PQA (geschlossene Benutzergruppen und Latenzzeiten) für SRL-Erbringung gewährleistet werden können.

Wirtschaftliche Hindernisse

Durch den zeitlichen Vorlauf der Ausschreibungen (eine Woche im Voraus) und der Länge der Angebotszeitscheiben (HT/NT jeweils 12-h-Zeitscheiben) kann das energiewirtschaftliche Leistungspotenzial unter den gegebenen Voraussetzungen nicht voll ausgeschöpft werden. Eine Änderung/Verbesserung ist künftig möglich durch Verkürzung des zeitlichen Vorlaufs zur Ange-

botsabgabe auf einen Tag und Verkürzung der Angebotszeitscheiben (1-h-/4-h- Zeitscheiben). Diese Empfehlung findet sich auch im Weißbuch zum Strommarktgesetz des Bundeswirtschaftsministeriums wieder.

Die Kosten für Messung und Abrechnung einer Messstelle mit registrierender Lastgangmessung sind derzeit nicht einheitlich, intransparent und im Allgemeinen zu hoch und stellen ebenfalls ein wirtschaftliches Hindernis dar. Eine Änderung ist möglich durch kostengünstige Messverfahren und Wegfall der Abrechnungsentgelte (gegenüber dem Verteilungsnetzbetreiber).

Die aktuellen energierechtlichen Rahmenbedingungen, wonach Netzentgelte sowohl bei Entnahme als auch bei Einspeicherung zu entrichten sind (§ 17 Abs. 1 Satz 2 StromNEV) und die aktuelle Regelung, wonach es keine Freistellung nach § 118 Abs. 6 EnWG für mobile Speicher gibt, stellen ebenfalls ein wirtschaftliches Hindernis und eine Diskriminierung gegenüber stationären Speichern dar. Eine Änderung ist künftig möglich durch die explizite Aufnahme von mobilen Speichern in § 118 Abs. 6 EnWG; § 60 Abs. 3 EEG, § 9 Abs. 1 Nr. 6 StromStG. Auch zwischengespeicherter Strom in Elektrofahrzeugen trägt zur Netzentlastung bei Rückspeisung bei, genauso wie dies bei stationären Speichern der Fall ist.

Zusammenfassend sind folgende Handlungsempfehlungen bezüglich der technischen und wirtschaftlichen Hindernisse zu definieren:

- Abschaffung bzw. Regulierung der Abrechnungsentgelte für die RLM-Messung;
- Anpassung der Präqualifikationsanforderungen auch auf kleinteilige Pools (Leistungsmessung, Kommunikationsform, typenscharfe Präqualifikation);
- es ist eine Reduzierung der Ausschreibungszeiträume/-fristen und Angebotsgröße in der Sekundärregelung notwendig;
- weitere Standardisierung der Kommunikationsschnittstellen einer Ladestation/eines Fahrzeuges mit Blick auf deren Vernetzung im heimischen oder öffentlichen Umfeld, um auch einen energiewirtschaftlichen Einsatz zu ermöglichen;
- explizite Aufnahme von mobilen Batteriespeichern in § 118 Abs. 6 EnWG, § 60 Abs. 3 EEG mit dem Ziel der Befreiung von Netzentgelten und Umlagen.²³

²³ Formulierungsvorschlag für § 118 Abs. 6 Satz 2 EnWG: „Das gilt auch für Anlagen zur Speicherung von Elektrizität in Elektrofahrzeugen, wobei die freigestellte jährliche Bezugsmenge der Strommenge entspricht, die aus dem Elektrofahrzeug in demselben Jahr wieder in ein Netz eingespeist wurde.“

9 Veröffentlichungen

Berichte aus dem Projekt:

- Fachtagung des Bundesumweltministeriums *Aktuelle Vorhaben zum Klimaschutz und zur Umsetzung der Energiewende: Regelenergie durch Elektromobilität*
- Posterbeitrag auf dem ETG-Kongress 2013 (IWES, alle)
- 4. Jahreskonferenz Zukunftsperspektiven für den Regelenergiemarkt Strom 2014: *Regelleistung mit Elektrofahrzeugen – Forschungsprojekt INEES* (LichtBlick, Volkswagen)
- Christian Höhle, Torsten Leifert: *Intelligente Nutzung von PV-Strom für die Elektromobilität als Wegbereiter für eine 100 % erneuerbare Stromversorgung*, Vortrag & Tagungsbandveröffentlichung auf dem 29. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein 2014
- ETG-Kongress 2015 – Die Energiewende, 17.11.2015 – 18.11.2015, Bonn: *Modelling of the vehicle to grid storage potential considering uncertainties in user behavior based on fleet test data* (Volkswagen, LichtBlick)
- EST – Energy Science Technology, 20.05.2015 – 22.05.2015, Karlsruhe: *Vehicle to Grid storage potential based on fleet test data of user behavior* (Volkswagen)
- Thomas Degner, Gunter Arnold, Ron Brandl, Julian Dollichon, Alexander Scheidler *Grid integration and grid impact of electric vehicles with secondary control reserve capability*, Veröffentlichung akzeptiert für das DER-Journal, 2016, siehe <http://www.der-journal.org/>

Berichte über das Projekt:

- Umwelt 02/2013: *Unter der Lupe*
- Erneuerbar mobil 04/2013: *INEES: Intelligente Netzanbindung für ein stabiles Stromnetz*
- L'Opinion 04/2015: *Volkswagen teste la voiture électrique comme stockage d'énergie*
- Zeit Wissen 05/2015: *Aufbruch mit Akku*
- Deutschlandfunk 08/2015, Beitrag in Forschung aktuell: *Forscher setzen E-Autos als Energiespeicher ein*
- PV-Magazin 09/2015: *Speicher auf vier Rädern*
- Erneuerbare Energien 01/2016: *Das Auto wird zum Speicher*

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung/ Stichwort	Beschreibung
AC	Alternating Current; Wechselstrom
AG	Arbeitgeber
AP	Arbeitspaket
Backend-Server	Rechen- und Speicherkapazität auf einem zentralen Großrechner
BDSG	Bundesdatenschutzgesetz
BHKW	Blockheizkraftwerk
B2C	Back-to-Car-Server, Forschungsserver Volkswagen
BEV	Battery Electrical Vehicle; rein batteriebetriebenes Elektrofahrzeug
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BNetzA	Bundesnetzagentur
BSI	Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik
CAN-Bus	Controller Area Network; Datenbus im Fahrzeug für Steuerungs-/Fahrzeugtechnik
CaTe	Car-Telematik-Box
CCS-Ladedose	Combined Charging System; Schnellladestandard der europäischen Automobilhersteller
Combo2	Combo2-Stecksystem; integriert sowohl das AC-Laden bei längeren Stillstandzeiten als auch das schnelle Laden im DC-Verfahren mit nur einem Steckgesicht
CP	Control Pilot
DB	Datenbank
DC	Direct Current; Gleichstrom
DIN 70121	Standardisierungsnorm (z. T. noch in der Entwicklung): Elektromobilität – digitale Kommunikation zwischen einer Gleichstromladestation und einem Elektrofahrzeug zur Regelung der Gleichstromladung im Verbundladesystem
DKE	Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik
EE	Erneuerbare Energien
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz

E-Kfz	Elektrofahrzeug
Ethernet	Technologie, die Software (Protokolle usw.) und Hardware (Kabel, Verteiler, Netzwerkkarten usw.) für kabelgebundene Datennetze spezifiziert, implementiert Schichten 1 und 2 des ISO/OSI-Referenzmodells
EMS	Energiemanagementsystem
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
EV	Electricial Vehicle; Elektrofahrzeug, innerhalb von INEES vereinfachend für BEV
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis; Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse
GPRS	Global Positioning System
GPS	General Packet Radio Service; ein paketorientierter Nachrichtendienst, der auf dem GSM-Standard basiert
GSM	Global System for Mobile Communications; Mobilfunkstandard der zweiten Generation (2G)
HF	Hochfrequenz
HMI	Human Machine Interface; wird seltener mit MOD-HMI abgekürzt
HT	Hochtarif
ISO 15118	Standardisierungsnorm (z. T. noch in Entwicklung) für Road Vehicles – Vehicle to Grid Communication Interface
KP	Kommunikationsprozessor
Latenzzeit	Zeitraum zwischen dem Aussenden des Poolmanager-Lade/ Entladebefehls und dem Start desselben –Servers – Rechen- und Speicherkapazität auf einem zentralen Großrechner.
LAN	Local Area Network
LGZ	Lastgangzähler
Lademanager (LM)	Steuergerät im Fahrzeug, welches das Laden und Entladen der Traktionsbatterie kontrolliert
LS	Ladesäule/Ladestation
M-Bus	Meter-Bus; Feldbus für die Verbrauchsdatenerfassung (Messaufgaben zur Anbindung von Zählern)
MsysV	Messsystemverordnung
MOD	Mobile Onlinedienste
MRL	Minutenreserveleistung
NT	Niedertarif

NNE	Netznutzungsentgelte
OCU	Online Connectivity Unit; Komponente im e-up!, die Datensammlungen im Fahrzeug vornimmt und mit dem Serien-Backend kommuniziert
OEM	Original Equipment Manufacturer; Originalausrüstungshersteller
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
PLC	Power Line Communication
PRL	Primärregelenergie
PP	Proximity Pilot
PV	Photovoltaik
RLM	Registrierende Lastgangmessung
SDL	Systemdienstleistungen sind jene für die Funktionstüchtigkeit notwendigen Dienste in der Elektrizitätsversorgung, die Netzbetreiber neben der Übertragung und Verteilung elektrischer Energie zusätzlich erbringen
SECC	Supply Equipment Communication Controller
SMGW	Smart Meter Gateway
SRL	Sekundärregelleistung; eine Spezialform von SDL zur Erhaltung der Netzfrequenz
StromNEV	Stromnetzentgeltverordnung
StromNZV	Stromnetzzugangsverordnung
SOC	State of Charge
SOH	State of Health
TBD	to be defined
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol (TCP/IP); Standard-Internetprotokolle, implementieren Schichten 3 und 4 des ISO/OSI-Referenzmodells
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter; serielle Schnittstelle
ÜNB	Übertragungsnetzbetreiber
VHB	Vorhabenbeschreibung des INEES-Projekts
VNB	Verteilungsnetzbetreiber
WLAN	Wireless Local Area Network