



eWayBW II Working Paper 01/2022

Ansatz einer wirtschaftlichen Bewertung von Batterien im Zusammenhang mit Oberleitungs-LKW auf Basis spezifischer Fahrprofile

Autoren:

Markus Hagen (Fraunhofer ICT)

Martin Miller (Fraunhofer ICT)

Tobias Burgert (Fraunhofer ICT)

Andreas Dollinger (Fraunhofer ICT)

Ansatz einer wirtschaftlichen Bewertung von Batterien im Zusammenhang mit Oberleitungs-LKW auf Basis spezifischer Fahrprofile

Gefördert durch:



Vorhabenträger:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Herausgeber

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Straße 48
76139 Karlsruhe

Projektpartner

Regierungspräsidium Karlsruhe
Südwestdeutsche Verkehrs-Aktiengesellschaft (SWEG)
Landkreis Rastatt
Konsortium Forschung eWayBW:
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
PTV Transport Consult GmbH (PTV)
Forschungszentrum Informatik (FZI)
Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT

Assoziierte Partner

Spedition Fahrner GmbH
Huettemann Logistics GmbH
Casimir Kast Verpackung und Display GmbH
MM Gernsbach GmbH
Netze BW GmbH
Bundesanstalt für Straßenwesen
e-mobil BW GmbH
Verband Spedition und Logistik Baden-Württemberg

Ansprechpartner Projektgesamtleitung

Marcel Zembrot
Mobilitätszentrale BW
Verkehrsministerium Baden-Württemberg
E-Mail: marcel.zembrot@vm.bwl.de

Wissenschaftliche Begleitforschung

Prof. Dr. Martin Wietschel
Leitung Competence Center Energietechnologien und Energiesysteme
Dr. Uta Burghard
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Straße 48
76139 Karlsruhe
Telefon: +49 721 6809-254
E-Mail: martin.wietschel@isi.fraunhofer.de

Projekt-Webseite

<https://ewaybw.de/>

Bildnachweis

Deckblatt: Renata Sas

Zitierempfehlung

Hagen, M.; Miller, M.; Burgert, T.; Dollinger, A. (Fraunhofer ICT) (2022): Ansatz einer wirtschaftlichen Bewertung von Batterien im Zusammenhang mit Oberleitungs-LKW auf Basis spezifischer Fahrprofile. eWayBW II Working Paper 01/2022. Karlsruhe: Fraunhofer ISI (Hrsg.).

Veröffentlicht

November 2022

Hinweise

Dieser Bericht einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Die Informationen wurden nach bestem Wissen und Gewissen unter Beachtung der Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis zusammengestellt. Die Autorinnen und Autoren gehen davon aus, dass die Angaben in diesem Bericht korrekt, vollständig und aktuell sind, übernehmen jedoch für etwaige Fehler, ausdrücklich oder implizit, keine Gewähr. Die Darstellungen in diesem Dokument spiegeln nicht notwendigerweise die Meinung des Auftraggebers wider.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung.....	7
2	Ermittlung des Fahrprofils.....	9
3	Charakterisierung der Batteriezellen.....	12
3.1	Vorbereitung und Testdurchführung.....	12
3.2	Untersuchte Lithium-Ionen-Zellen.....	13
3.3	Testergebnisse.....	15
4	Zusammenfassung.....	20
	Literaturverzeichnis.....	21
	Abbildungsverzeichnis.....	22
	Tabellenverzeichnis.....	23

1 Einleitung und Zielsetzung

Mit einer Nachschärfung des Klimaschutzgesetzes im Juni 2021 hat sich die Bundesregierung eine Reduzierung des CO₂-Ausstoßes um 65 % bis zum Jahr 2030 als Ziel gesetzt (Bundesregierung, 2021). Die Straße ist in Deutschland mit 71 % der Transportleistung dominierender Verkehrsträger des Güterverkehrs, bei dem zum Transport quasi. Dementsprechend wird im Zusammenhang mit den notwendigen Emissionsreduzierungen diesem eine besondere Bedeutung zugemessen. Zu diesem Ziel trägt das im Oktober 2019 beschlossene Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung bei. In diesem wird festgelegt, dass bis 2030 etwa ein Drittel der Fahrleistung im schweren Straßengüterverkehr rein elektrisch oder auf Basis strombasierter Kraftstoffe zurückgelegt werden soll (BMU, 2019). Um das gesetzte Ziel umsetzen zu können, gibt es mehrere technologische Ansätze: rein batterieelektrisch, verbrennungsmotorisch auf Basis synthetischer Kraftstoffe oder Wasserstoff, brennstoffzellenelektrisch oder auch in Kombination mit dynamischer Ladung durch Oberleitungstechnologie. Laut Bundesregierung sollen in Deutschland sämtliche Technologien in den kommenden Jahren weiterverfolgt und erprobt werden (BMVI / Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2020). In drei Innovationsclustern des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) sollen die Technologien batterieelektrisch, brennstoffzellenelektrisch sowie das Laden während der Fahrt über eine Oberleitung auf längeren Korridoren getestet werden (BMDV, 2021).

Nicht zuletzt durch die stetig fortschreitende Entwicklung der Zell- und Batterietechnologie stellt der (rein) batterieelektrisch angetriebene LKW dabei ein vielversprechendes Konzept dar. Das Nachladen der Traktionsbatterie kann dabei sowohl stationär an einer Ladesäule als auch wegseitig, z. B. über eine Oberleitungstechnologie, erfolgen (vgl. Plötz, Speth & Rose, 2020 und Jöhrens et al., 2020). Um die Synergien der beiden Ladetechnologien im Verbund mit elektrifizierten Nutzfahrzeugen untersuchen zu können, bedarf es einer detaillierten Betrachtung der Lastzyklen und damit deren Auswirkungen auf die Alterung der Traktionsbatterie und deren Batteriezellen.

Im Projekt eWayBW werden Batteriezellen vom Fraunhofer ICT wirtschaftlich für einen Einsatz im Oberleitungs-LKW (O-LKW) bewertet werden. Hierzu wurde eine Bundesstraße in Baden-Württemberg abschnittsweise mit Oberleitungstechnik ausgestattet. Aktuell pendeln entlang dieser Strecke auf insgesamt 18 km konventionelle Diesel-LKW zweier Speditionen, um Güter der beteiligten Papierfabriken zu ihrem Depot in Kuppenheim, südlich von Rastatt, zu transportieren. Diese Transportaufgabe wird im Projektverlauf eWayBW von den Oberleitungs-LKW übernommen und so die Oberleitungstechnologie erstmalig auf einer innerdeutschen Bundesstraße erprobt. Da die Strecke nur abschnittsweise elektrifiziert ist, muss die Fahrt zwischen zwei Oberleitungssektionen über eine zweite Energiequelle überbrückt werden. Dies kann zum einen durch einen verbrennungsmotorischen Antrieb geschehen oder aber auch durch die Nutzung einer größeren Traktionsbatterie, mit der die elektrische Fahrt zwischen zwei Oberleitungsabschnitten sichergestellt ist. Ein Szenario darzustellen, das vom LKW rein elektrisch und ohne Unterstützung des Verbrennungsmotors zurückgelegt wird, steht im Fokus der Untersuchung in diesem Arbeitspapier. Zum Zeitpunkt der Ausarbeitung war als realer Technologieträger kein O-LKW mit ausreichend hoher Batteriekapazität und Batterie-Ladeleistung verfügbar, weshalb die nachfolgende Untersuchung im virtuellen Fahrversuch vorgenommen wurde. Zunächst wurde das Bewegungsprofil der konventionellen Diesel-LKW entlang der eWayBW-

Strecke aufgezeichnet und daraus ein typisches, zu erwartendes Fahrprofil der im Projekt eingesetzten O-LKW bestimmt. Für das gemessene Fahrprofil wird anschließend in der Fahrzeugsimulation die erforderliche Leistungsaufnahme bestimmt und diese auf eine einzelne Batteriezelle heruntergerechnet. Auf Basis dieser Daten erfolgt das Erstellen eines Prüfplans, mit dem Batteriezellen unabhängig von einem Einsatz im LKW im Labor getestet werden können. Durch dieses Vorgehen können die Bedingungen im LKW exakt nachgebildet werden, indem z. B. Temperatur und Anpressdruck auf die Zellen eingestellt werden. Die Batteriezelle durchlebt im Labor beim Entladen exakt das Fahrprofil des LKW mit und muss bei Fahrten bergauf Leistungsspitzen erbringen, während bergab auch eine Rekuperation genutzt werden kann.

Im Ergebnis kann anhand der Lebensdauer der Zellen (Anzahl der Lade- und Entladezyklen bis ein Schwellwert erreicht wird, z. B. 80 % der initialen Kapazität) bestimmt werden, inwiefern sich diese für einen Einsatz im LKW eignen und ob sich ein Einsatz wirtschaftlich lohnt. Kommerziell in LKW eingesetzte Zellen standen dem Fraunhofer ICT nicht zur Verfügung und konnten im Projektverlauf auch nicht beschafft werden. Hernach wird die aufgebaute Methodik an zwei Typen von Lithium-Ionen-Zellen demonstriert.

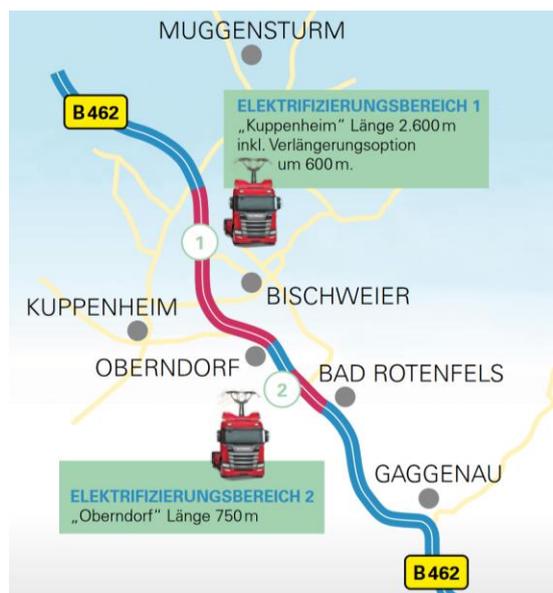
2 Ermittlung des Fahrprofils

Gerade in der frühen Entwicklungsphase sind die Erprobungsmöglichkeiten durch den Mangel an Technologieträgern und Teststrecken beschränkt. Die Gesamtfahrzeugsimulation setzt an diesem Punkt an und bietet die Möglichkeit, virtuelle Prototypen zu erzeugen. Diese können im virtuellen Fahrversuch erprobt und miteinander verglichen werden.

Pilotstrecke eWayBW

Zur Erprobung der Oberleitungstechnologie zur Elektrifizierung des straßengebunden Schwerlastgüterverkehrs wurden in Deutschland drei Pilotstrecken aufgebaut: ELISA in Hessen, FESH in Schleswig-Holstein und eWayBW in Baden-Württemberg. In ELISA wurde die A5 und in FESH die A1 abschnittsweise mit Oberleitungstechnologie ausgestattet. Demgegenüber steht eWayBW; hier befinden sich die Elektrifizierungsabschnitte erstmalig entlang einer Bundesstraße. Die Pilotstrecke verläuft zwischen den Städten Kuppenheim und Gernsbach-Obertsrot im Murgtal in Baden-Württemberg auf der B 462 und hat eine Gesamtlänge von etwa 18 Kilometern, von denen 3,35 km in jede Fahrrichtung elektrifiziert sind. Auf der Pilotstrecke werden jährlich bis zu 500.000 t Papier im vollkontinuierlichen 24-Stunden-Betrieb an sieben Tagen pro Woche von zwei Papierherstellern in Obertsrot zu zwei Logistikzentren in Kuppenheim verbracht. Dabei ergeben sich pro Tag bis zu 64 Umläufe, die im Projekt von insgesamt fünf LKW mit Oberleitungstechnologie übernommen werden. Zusätzlich findet ein Technologievergleich verschiedenster alternativer Antriebssysteme statt. Zur Erprobung der Oberleitungstechnologie wurden dabei je Fahrtrichtung zwei Elektrifizierungsabschnitte der B 462 erstellt, siehe Abbildung 1.

Abbildung 1: Elektrifizierungsabschnitte der Pilotstrecke eWayBW



Der O-LKW kann unter einer Oberleitung und somit im elektrifizierten Streckenabschnitt stets elektrisch fahren.

Für die Zu- und Abfahrten zwischen den Oberleitungsabschnitten gibt es verschiedene Hybridmöglichkeiten. Der Einsatz eines Hybrid-LKWs, der neben den elektrischen Traktionskomponenten noch einen Diesel-Verbrennungsmotor hat, wird im Projektverlauf auf der Strecke erprobt. Dabei kommen fünf LKW zum Einsatz und übernehmen die Logistikaufgaben der konventionellen Diesel-LKW.

Neben den in eWayBW eingesetzten LKW mit ergänzendem Dieselmotor stellt der batterieelektrische LKW eine weitere Möglichkeit dar. Auf der Teststrecke wird dieser voraussichtlich im Jahr 2023 eingesetzt werden. Im virtuellen Fahrversuch kann er bereits vorab untersucht und bewertet werden.

Virtueller Fahrversuch des batterieelektrischen Oberleitungs-LKW

Mithilfe der Gesamtfahrzeugsimulation lassen sich alle Antriebsstrangkomponenten eines O-LKW abbilden. So kann auf die Belastung der einzelnen Batteriezellen zurückgeschlossen werden.

Der Aufbau des Fahrzeugmodells erfolgt in der eigens entwickelten Simulationsplattform des Fraunhofer ICT (Burgert, Dollinger & Fischer, 2019). Die entsprechenden Antriebskomponenten können darin modular miteinander verschaltet werden und ermöglichen die Darstellung sämtlicher Antriebskonfigurationen. Ausgehend von den Kenndaten der in Abschnitt 3 getesteten Batteriezellen wurde die Fahrzeugbatterie so parametrisiert, dass die Spezifikationen zur maximalen Lade- und Entladeleistung eingehalten werden. Als Eingangsgröße für das Simulationsmodell dient das aufgezeichnete Bewegungsprofil eines Diesel-LKW der Spedition Fahrer. Zusätzlich wurden die Streckenkarten der eWayBW-Pilotstrecke digitalisiert und die Oberleitungsabschnitte in der Simulation hinterlegt. Um den technischen Spezifikationen gerecht zu werden und die Synergien zwischen wegseitiger und stationärer Ladetechnologie nutzen zu können, wurde am Standort des Logistikzentrums eine zusätzliche Lademöglichkeit hinterlegt.

So ergibt sich exemplarisch das in Abbildung 2 gezeigte Stromprofil. Es zeigt den Geschwindigkeitsverlauf für vier zusammenhängende Shuttle-Fahrten entlang der Pilotstrecke eWayBW. Nach jedem Umlauf erfolgt ein stationäres Aufladen an dem Logistikzentrum während die Transportgüter des LKW abgeladen werden. Ist der LKW auf der Strecke, so fährt er im Bereich der Oberleitungsabschnitte rein elektrisch. Zusätzlich erfolgt das Laden der Traktionsbatterie. Die Auslegung der Simulationsparameter erfolgte, wie eingangs erwähnt, durch die verfügbaren Batteriezellen. Durch die somit begrenzten Ladeleistungen wurde für diesen Testlauf eine fiktive Pausenzeithöhung nach dem vierten Umlauf eingesetzt. Dies ermöglicht das vollständige Aufladen der Batteriezellen im nachfolgenden Testlauf und die Bestimmung eines möglichen Kapazitätsverlustes während des repetitiven Abfahrens der Teststrecke.

Abbildung 2: Strom- und Leistungsprofil der zu testenden Batteriezelle. Vier zusammenhängende Shuttle-Fahrten entlang eWayBW. Anschließend erfolgt die Aufladung auf den maximalen Ladezustand von 80 %.

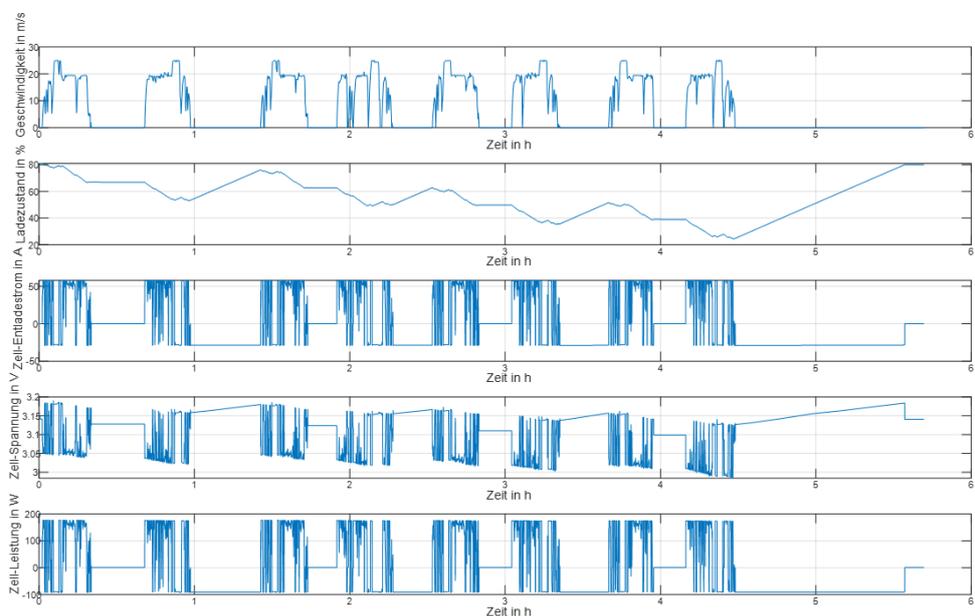


Tabelle 1: Eingestellte fahrzeugspezifische Randbedingungen der Traktionsbatterie des virtuell untersuchten batterieelektrischen Oberleitungs-LKW

Parameter	Wert	Bemerkung
Maximale Laderate	0,5 C ¹	Vorgabe aus Zellspezifikation
Maximale Entladerate	1 C	Vorgabe aus Zellspezifikation
Maximale stationäre Ladeleistung	40 kW	Abgeleitet aus Zellspezifikation und gewählter Batteriekapazität
Maximale Bezugsleistung via Oberleitung	40 kW in die Batterie + Traktion	Abgeleitet aus Zellspezifikation und gewählter Batteriekapazität; Traktionsanteil: unter der Oberleitung wird die gesamte – zur Traktion erforderliche – Leistung von der Oberleitung bezogen
Ladezustand der Traktionsbatterie	20 %–80 %	Nach dem vierten Zyklus wird die Batterie wieder auf den maximalen Ladezustand geladen

¹ Maximale Lade- und Entladerate (engl. C-Rate): gibt an, mit welcher elektrischen Stromstärke eine Zelle maximal ge- und entladen werden darf. Dabei werden Lade- bzw. Entladestrom auf die maximale Kapazität einer Batterie bezogen, um Batteriezellen miteinander vergleichen zu können. Ein Koeffizient von 1 C bedeutet, dass eine Batterie innerhalb von einer Stunde komplett ge- oder entladen ist, ein C-Koeffizient kleiner als 1, dass es länger als eine Stunde dauert und ein C-Koeffizient größer als 1, dass es weniger als eine Stunde dauert.

3 Charakterisierung der Batteriezellen

Ziel der Arbeiten der Abteilung Angewandte Elektrochemie (AE) des Fraunhofer ICT war die Abschätzung, wie stark Lithium-Ionen-Zellen beim gemessenen Fahrprofil des O-LKW altern. Daraus lassen sich wiederum Aussagen zur Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von O-LKW ableiten. Altert die Batterie schnell, so sinkt die mögliche Anzahl der batteriebetriebenen Fahrzyklen. Die Batterie muss schneller ausgetauscht werden, es entstehen signifikante Kosten beim Nutzer (z. B. Spediteur) und die Akzeptanz bzw. der Nutzerkreis würden signifikant sinken. Umgekehrt würden eine hohe Lebensdauer und Wirtschaftlichkeit der Batterie Anreize für eine Elektrifizierung von LKW geben. Dementsprechend sind Wirtschaftlichkeitsdaten für die Ausweitung des Nutzerkreises ein erheblicher und wichtiger Faktor.

Im Projekt eWayBW II wurden am Fraunhofer ICT Fähigkeiten und Werkzeuge aufgebaut, um entsprechende Tests an beliebigen Lithium-Ionen-Zellen durchführen zu können.

3.1 Vorbereitung und Testdurchführung

Zur Durchführung der Messungen hat das Fraunhofer ICT während der Projektlaufzeit eine Testgarage gebaut, ausgerüstet und in Betrieb genommen (vgl. Abbildung 3). In der Testgarage wurden mehrere Teststationen, Temperier- und Klimaschränke und die zugehörigen Messrechner aufgebaut und angeschlossen. Tests an größeren Batteriezellen mit einem Ladungsspeichervermögen ab ca. 5 Ah werden aus Sicherheitsgründen nicht mehr in regulären Laboren, sondern nur noch in der Testgarage durchgeführt.

Abbildung 3: Garagenerweiterung für sicherheitskritische Tests an Energiespeichern am Fraunhofer ICT + Ausbau



Zur Kontaktierung der Zellen wurden kommerziell verfügbare Werkzeuge beschafft und eingesetzt (vgl. Abbildung 4, links). Da Lithium-Ionen-Zellen und insbesondere Pouchzellen im Modul mit Druck beaufschlagt werden, wurde eine entsprechende Vorrichtung für die Tests gebaut (vgl. Abbildung 4, rechts). Die Testvorrichtung soll einen möglichst anwendungsnahen Einsatz der Zelle in einem LKW simulieren und es wurde mit einem Anpressdruck von 620 N gearbeitet. Vergleichend wurden auch Messungen an unverspannten Zellen gestartet. Die Messungen an sämtlichen Zellen wurden darüber hinaus parallel in Klimaschränken bei einer konstanten Temperatur von 20 °C durchgeführt. Dadurch konnte in einer ersten Untersuchung

der Temperatureinfluss auf die Messungen durch einen Wechsel von Tag und Nacht und von Winter auf Frühling negiert werden. Als Testgerät wurde ein Basytec CTX Zyklierer mit acht parallel schaltbaren Testkanälen und max. 80 A pro Kanal eingesetzt.

Abbildung 4: Links: Werkzeug zum Kontaktieren von Li-Ionen-Pouchzellen. Rechts: Testvorrichtung im Klimaschrank für den elektrochemischen Test der Zellen unter Druckbeaufschlagung.

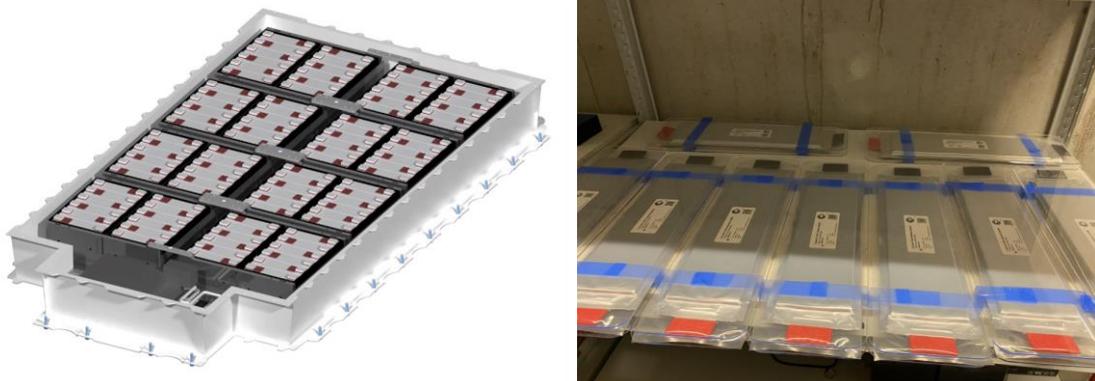


3.2 Untersuchte Lithium-Ionen-Zellen

Für eine aussagekräftige elektrochemische und wirtschaftliche Bewertung ist es sinnvoll, Zellen einzusetzen, die auch in O-LKW kommerzieller Hersteller im Einsatz sind. Nur so können die Ergebnisse aus den Zelltests übertragen werden. Leider war es nicht möglich, während der Projektlaufzeit entsprechende Zellen zu erhalten oder zu beschaffen.

Um die geplanten Arbeiten durchführen zu können, wurde vom Fraunhofer ICT auf Zellen aus einem BMW I3 zurückgegriffen. Für die im Rahmen von eWayBW durchzuführenden Untersuchungen wurde die BMW I3 Batterie (vgl. Abbildung 5, links) demontiert und einzelne Module und Zellen entnommen. Die Module sind aus 60 Ah Zellen der Firma Samsung SDI aufgebaut, welche ein Aluminiummetallgehäuse („Hardcase“) aufweisen.

Abbildung 5: Links: Renderzeichnung BMW i3 Batterie, aufgebaut aus Samsung SDI 60 Ah Zellen. Rechts: Eingelagerte Testzellen der Firma CUSTOMCELLS®



Die Parameter der Samsung SDI Zellen sind in der nachfolgenden **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zusammengefasst. Mit einer Energiedichte von 120 Wh/kg ist klar ersichtlich, dass die Samsung SDI Zellen technisch nicht auf dem neuesten Stand sind. Aktuelle Hochenergiezellen mit nickelreichem Kathodenaktivmaterial (z. B. NCM811) und Siliziumanteil in den Anoden erreichen fast 300 Wh/kg.

Tabelle 2: Datenblatt Samsung SDI 60 Ah Li-Ionen-Zelle

Samsung SDI-60 Ah Zelle (BMW i3)	Typ: Prismatische Hardcase Zelle
Höhe	125 mm
Breite	45 mm
Länge	173 mm
Gewicht	1,84 kg
Kapazität (1/3 C, 25 °C)	60 Ah
Energiedichte	120 Wh/kg, 230 Wh/L
Ladecutoffspannung	4,12 V
Spannung Vmin / Vnominal / Vmax	2,7 V / 3,75 V / 4,12 V
Max Zyklenzahl (25 °C, 1C/1C, 80 % EOL)	~4000
Aktivmaterial	Kathode: Blend: LMO, NMC1, NMC2 – PVdF Binder Anode: Blend: Graphit (NG/AG) – SBR Binder
Elektrolyt	EC/EMC/DMC, LiPF6
Separator	Trilayer PP/PE/PP, 25 µm
Jelly Roll Anzahl	4

Aus diesem Grund und um eine alternative Zellchemie und ein alternatives Format untersuchen zu können, wurden neun großformatige Li-Ionen-Zellen bei der Firma CUSTOMCELLS® gekauft. Die Zellen wurden extra für das Projekt manuell hergestellt, um ein System mit Materialien testen zu können, das so im Markt aktuell noch nicht großflächig im Einsatz ist bzw. war.

Bei diesen Zellen handelte es sich um Pouchzellen, mit einem Gehäuse aus einem Blend aus Aluminium und diversen Kunststofffolien. Die CUSTOMCELLS®-Zellen hatten eine spezifische Kapazität von ca. 52 Ah und die Kathode beinhaltete nickelreiches NCM811 als Aktivmaterial.

Die Anode bestand aus einem konventionellem Graphitblend. Die Energiedichte der entsprechenden Zellen lag bei ca. 220 Wh/kg. Die Kenndaten der CUSTOMCELLS®-Zelle sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Datenblatt CUSTOMCELLS® ~52 Ah Pouch Li-Ionen-Zelle

CUSTOMCELLS®	Typ: Pouchzelle
Höhe	12,9 mm
Breite	87 mm
Länge	314 mm
Gewicht	Ca. 887 g
Kapazität	~ 57 Ah, praktisch 52 Ah - 3,6 mAh/cm ²
Energiedichte	Ca. 220 Wh/kg
Ladecutoffspannung	4,2 V
Spannung Vmin / Vnominal / Vmax	3,0 V / 3,6 V / 4,12 V
Max Zyklenzahl:	?
Aktivmaterial	Kathode: Blend: NCM811 Anode: Blend: Graphit
Elektrolyt	CUSTOMCELLS® Standard
Separator	-
Elektrodenanzahl	29

Im Ergebnis standen zwei unterschiedliche Zellen für Tests zur Verfügung. Ein kommerzialisierendes, erprobtes System (Samsung SDI) mit moderater Energiedichte und ein System mit vielversprechendem Aktivmaterial NCM811, das weltweit aktuell in Vorserien getestet und optimiert wird (CUSTOMCELLS®). Letztere Zellen wiesen mit 220 Wh/kg vergleichbar hohe Energiedichten auf. Durch elektrochemische Tests sollte insbesondere untersucht werden, wie sich die Systeme im Einsatz mit einem Fahrprofil eines O-LKWs eignen.

3.3 Testergebnisse

Abbildung 6 zeigt den Kapazitätsverlauf ausgewählter Zellen über die Anzahl der fiktiven Fahrzyklen multipliziert mit 10. Das heißt, dass ein X-Achsenwert von 2 praktisch 20 Entlade- bzw. Fahrzyklen entspricht.

Auffallend im Vergleich zu den anderen illustrierten Messungen ist der deutlich höhere Kapazitätsverlust der unverspannten Pouchzelle der Firma CUSTOMCELLS® (schwarze Kurve). Unverspannt bedeutet, dass auf die Pouchfolie der Zelle kein externer Anpressdruck gegeben wurde. Der vergleichsweise starke Kapazitätsabfall lässt sich primär durch mechanische Bewegungen beim Laden und Entladen in der Zelle erklären. Ohne den Anpressdruck verschlechtert sich bei den Elektrodenpartikeln der elektrische Kontakt. Es kann ein Ansteigen des elektrischen Widerstands und mittelfristig auch eine Zunahme der Zelldicke beobachtet werden. Da in kommerziellen Modulen immer ein definierter Anpressdruck vorliegt, kann die entsprechende Messung als wenig relevant für eine Bewertung betrachtet werden. Mit Anlegen eines Anpressdrucks reduzierte sich der Kapazitätsverlust der CUSTOMCELLS®-Zellen erheblich, wie der

deutlich stabilere Verlauf der blauen und roten Kurve zeigt. Den stabilsten Verlauf zeigten jedoch die Samsung SDI Zellen (grüne Kurve).

Abbildung 6: Kapazitätsverlauf ausgewählter Lithium-Ionen-Zellen über die Anzahl der eWayBW II Fahrzyklen

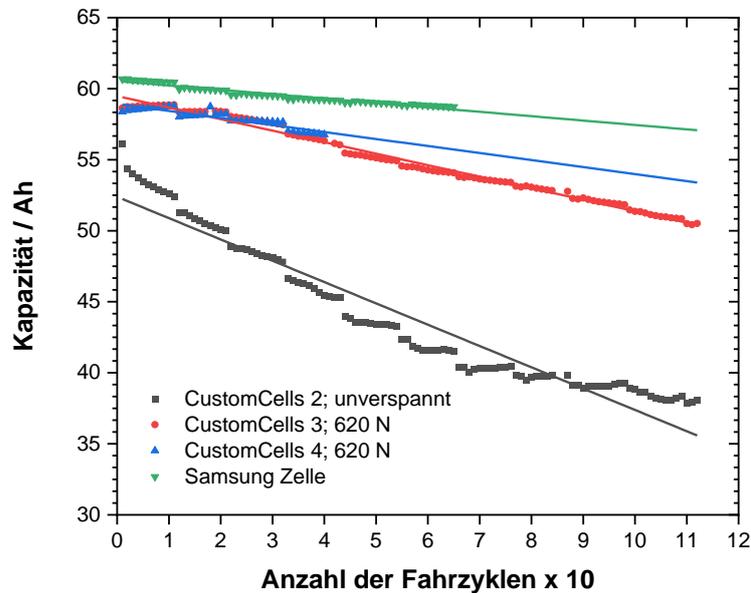
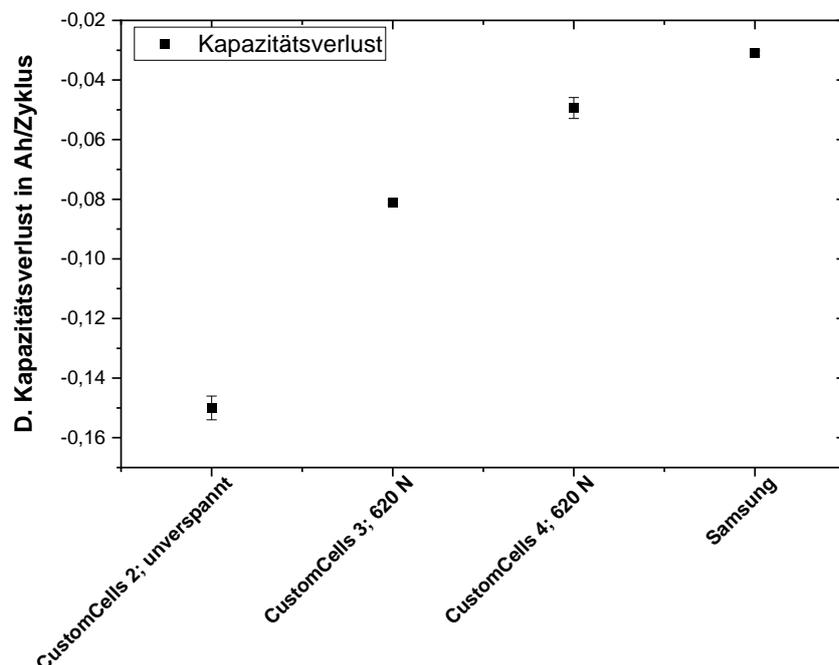


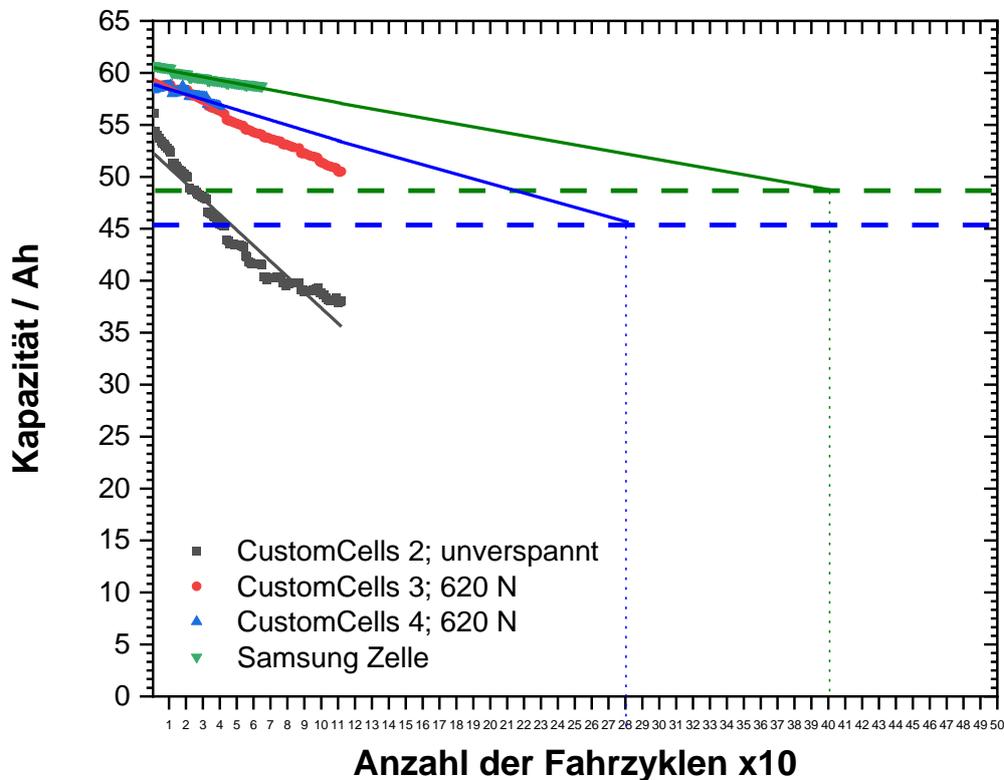
Abbildung 7 zeigt den durchschnittlichen Kapazitätsverlust pro Zyklus für die untersuchten Zellen. Je kleiner der entsprechende Wert, desto stabiler verhielt sich dementsprechend die Zelle im Test. Die Samsung SDI Zelle zeigte dabei einen Verlust von ca. 0,03 Ah pro Zyklus, während der Verlust bei den verspannten CUSTOMCELLS®-Zellen zwischen 0,08 und 0,05 Ah pro Zyklus lag.

Abbildung 7: Durchschnittlicher Kapazitätsverlust pro Zyklus ausgewählter Lithium-Ionen-Zellen

Für eine technisch-wirtschaftliche Bewertung ist insbesondere interessant, wie viele Entladezyklen und damit Fahrten mit einem O-LKW möglich wären, bis die Batterie ausgetauscht werden muss. Typischerweise wird hierfür als Kriterium 80 % der initialen Zellkapazität festgelegt. Das heißt, dass die Samsung-Zellen bei Unterschreiten von 48 Ah und die CUSTOMCELLS®-Zellen bei ca. 45 Ah ausgetauscht werden müssten.

Näherungsweise und in gewissen Grenzen verläuft der Kapazitätsabfall bei Lithium-Ionen-Zellen linear. **Abbildung 8 Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt eine Extrapolation des Kapazitätsverlaufs auf Basis der Testdaten, um feststellen zu können, ab wann 80 % der initialen Zellkapazität unterschritten werden. Im Ergebnis erreicht die Samsung-Zelle diesen Wert nach ca. 400 Fahrzyklen und die CUSTOMCELLS®-Zelle nach ca. 280 Fahrzyklen. Bei rund 250 Werktagen im Jahr und einer Fahrt am Tag bedeutet dieses Ergebnis also, dass die fiktive Batterie, bestehend aus den untersuchten Zellen, nach jeweils weniger als zwei Jahren ausgetauscht werden müsste.

Dementsprechend kann davon ausgegangen werden, dass die betrachteten Zellen nicht wirtschaftlich in O-LKW einsetzbar sind.

Abbildung 8: Extrapolation des Kapazitätsverlauf ausgewählter Lithium-Ionen-Zellen über die Anzahl der eWayBW II Fahrzyklen**Einordnung des Testergebnisses:**

Die untersuchten Zellen waren entweder nicht auf dem aktuellen technischen Stand (Samsung SDI 60 Ah) oder vom eingesetzten Elektrodenmaterial noch in Entwicklung (CUSTOMCELLS®). Es kann daher nicht von den erzielten Ergebnissen auf andere Zellen oder auf die Einsetzbarkeit in O-LKW geschlossen werden. Auch der Nutzerkreis konnte mit den betrachteten Zellen nicht sinnvoll eingeordnet oder begrenzt werden. Für eine valide Bewertung werden real eingesetzte Zellen oder Zellen aus einer näheren Auswahl für den O-LKW Einsatz benötigt.

In Bezug auf die **Batteriezelltechnologie** gibt es unterschiedliche Trends. Auf der einen Seite wurde in den letzten Jahren durch Hochenergieaktivmaterialien wie nickelreiche Kathoden oder Silizium in den Anoden erfolgreich die Energiedichte auf Werte bis knapp 300 Wh/kg auf Zellebene gesteigert. Auf der anderen Seite spielen Kosten und Materialverfügbarkeit eine immer größere Rolle, wodurch Batteriezellen ohne Cobalt und Nickel in der Kathode verstärkt produziert werden. Bei Letzteren ist insbesondere LiFePO₄ das Kathodenaktivmaterial der Wahl. Dieses zeichnet sich durch eine hohe Zyklenstabilität aus. Hingegen weisen Hochenergiezellen insbesondere mit Silizium in der Anode vergleichbar deutlich geringere Stabilitäten auf. Dies ist für Elektroautos im privaten Einsatz eher nachrangig, da diese – gerade vor dem Hintergrund bzw. der Kombination steigender Batteriekapazitäten und geringer Tagesfahrleistungen – nicht täglich geladen werden müssen (siehe auch Krug et al. (2020)). Unter der Annahme, dass nur einmal wöchentlich vollgeladen wird, würden dementsprechend 500 mögliche Ladezyklen bis zum Erreichen des Austauschriteriums praktisch fast zehn Jahre Lebensdauer für ein Elektroauto bedeuten.

Im Bereich von O-LKW, die täglich im Einsatz sind und geladen werden müssen, wäre die entsprechende mögliche Zyklenzahl viel zu gering. Für O-LKW ist die Zyklenstabilität der Zellen damit das ausschlaggebende Kriterium. Im Ergebnis eignen sich insbesondere langlebige Zellen mit LiFePO_4 -Kathoden für den Einsatz in batterieelektrischen Lkw, die stationär und dynamisch an der Oberleitung geladen werden können.

4 Zusammenfassung

Die Fahrprofilaten eines O-LKW wurden für eine Strecke ohne Oberleitung ermittelt und auf die Leistungsanforderung an eine Batteriezelle heruntergerechnet. Mit dem entsprechenden Leistungsprofil wurde ein Prüfplan erstellt und zwei Zelltypen unter fiktiven Einsatzbedingungen eines O-LKW getestet. Die beiden betrachteten Zelltypen zeigten nur eine geringe Lebensdauer und wären im Einsatz in einem realen LKW nicht wirtschaftlich.

Die untersuchten Zelltypen waren entweder nicht auf dem neusten technischen Stand oder wurden prototypisch, mit einer noch nicht ausgereiften, aber vielversprechenden Zellchemie hergestellt. Dementsprechend haben die Ergebnisse nur eine geringe Relevanz für die generelle Bewertung von O-LKW.

Für eine praktisch verwertbare Aussage hätte das ICT kommerziell eingesetzte oder in naher Zukunft geplante Zellen benötigt. Diese konnten weder beschafft noch zur Verfügung gestellt werden.

Falls entsprechende Systeme in Zukunft bereitgestellt werden können, hat das Fraunhofer ICT durch eWayBW entsprechende Werkzeuge, Infrastruktur und Erfahrung für einen praxisnahen Test zur Verfügung.

Literaturverzeichnis

- Bundesregierung (2021): Klimaschutzgesetz 2021 Generationenvertrag für das Klima. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klima-schutzgesetz-2021-1913672> (Zugriff am: 24. August 2021).
- BMU (2019): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bundesregierung.de/re-source/blob/975226/1679914/e01d6bd855f09bf05cf7498e06d0a3ff/2019-10-09-klima-massnahmen-data.pdf> (Zugriff am: 23. August 2021).
- BMVI (2020): Gesamtkonzept klimafreundliche Nutzfahrzeuge - Mit alternativen Antrieben auf dem Weg zur Nullemissionslogistik auf der Straße. Berlin: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI); Referat G 22 - Alternative Kraftstoffe und Antriebe, Infrastruktur, Energie. Online verfügbar unter: https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/gesamtkonzept-klimafreundliche-nutzfahrzeuge.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 17.07.22.
- BMDV (2021): BMVI bringt Innovationscluster für klimafreundliche Lkw-Antriebstechnologien auf den Weg. Online verfügbar unter: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2021/104-scheuer-innovationscluster-strassennutzverkehr.html>, zuletzt geprüft am 17.07.22.
- Plötz, P.; Speth, D.; Rose, Ph. (2020): Hochleistungsschnellladenetz für Elektro-Lkw. Kurzstudie im Auftrag des Verbandes der Automobilindustrie (VDA). Karlsruhe: Fraunhofer ISI. Online verfügbar unter: <https://publica.fraunhofer.de/handle/publica/300555>, zuletzt geprüft am 17.07.22.
- Jöhrens, J.; Rücker, J.; Kräck, J.; Allekotte, M.; Helms, H.; Biemann, K.; Schillinger, M.; Waßmuth, V.; Paufler-Mann, D. (2020): Einführungsszenarien 2020-2030. Optimierung des Infrastrukturaufbaus für Oberleitungs-Lkw und Analyse von Kosten- und Umwelteffekten in der Einführungsphase. Untersuchung im Rahmen des Verbundvorhabens „Roadmap OH-Lkw“. Heidelberg: ifeu. Online verfügbar unter: <https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/Roadmap-OH-Lkw-Bericht-Einfuehrungsszenarien-web.pdf>, zuletzt geprüft am 17.07.22.
- Burgert, T.; Dollinger, A.; Fischer, T. (2019): Methodology for Modeling a Plugin Hybrid Electric Vehicle Based on Data Logging. Lyon: EVS32. Online verfügbar: <https://papers.evs32.org/download.php?f=papers/evs32-7400481.pdf>, zuletzt geprüft am 17.07.22.
- Krug, S.; Krey, O.; Ohm, B.; Weider, M.; Ziem-Milojevic, S.; Braune, O. (2020): Elektromobilität in der Praxis. Zweiter Ergebnisbericht des Zentralen Datenmonitorings des Förderprogramms Elektromobilität vor Ort. Berlin: NOW GmbH. Online verfügbar: https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/now_elektromobilitaet-in-der-praxis-zdm.pdf, zuletzt geprüft am 17.07.22.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Elektrifizierungsabschnitte der Pilotstrecke eWayBW	9
Abbildung 2: Strom- und Leistungsprofil der zu testenden Batteriezelle. Vier zusammenhängende Shuttle-Fahrten entlang eWayBW. Anschließend erfolgt die Aufladung auf den maximalen Ladezustand von 80 %	11
Abbildung 3: Garagenerweiterung für sicherheitskritische Tests an Energiespeichern am Fraunhofer ICT + Ausbau	12
Abbildung 4: Links: Werkzeug zum Kontaktieren von Li-Ionen-Pouchzellen. Rechts: Testvorrichtung im Klimaschrank für den elektrochemischen Test der Zellen unter Druckbeaufschlagung.....	13
Abbildung 5: Links: Renderzeichnung BMW I3 Batterie, aufgebaut aus Samsung SDI 60 Ah Zellen. Rechts: Eingelagerte Testzellen der Firma CUSTOMCELLS®	14
Abbildung 6: Kapazitätsverlauf ausgewählter Lithium-Ionen-Zellen über die Anzahl der eWayBW II Fahrzyklen	16
Abbildung 7: Durchschnittlicher Kapazitätsverlust pro Zyklus ausgewählter Lithium-Ionen-Zellen.....	17
Abbildung 8: Extrapolation des Kapazitätsverlauf ausgewählter Lithium-Ionen-Zellen über die Anzahl der eWayBW II Fahrzyklen	18

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Eingestellte fahrzeugspezifische Randbedingungen der Traktionsbatterie des virtuell untersuchten batterieelektrischen Oberleitungs-LKW.....	11
Tabelle 2:	Datenblatt Samsung SDI 60 Ah Li-Ionen-Zelle	14
Tabelle 3:	Datenblatt CUSTOMCELLS® ~52 Ah Pouch Li-Ionen-Zelle	15