

Abschlussbericht

Zuwendungsempfänger: Daimler AG / Mercedes-Benz AG 70372 Stuttgart	Förderkennzeichen: 16EMO0261K
Vorhabenbezeichnung: „Einfluss von SiC-Wechselrichtern auf die Lebensdauer von Traktionsbatterien (SiCWell)“	
Teilvorhaben: „Optimierungspotenziale für zuverlässige Elektrofahrzeuge“	
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2018 bis 30.11.2022	
Berichtsdatum 20. Februar 2023	
Vorgelegt beim Projektträger: VDI/VDE Innovation + Technik GmbH Steinplatz 1 10623 Berlin	
Vorgelegt durch: Dr. Wolfgang Wondrak E-Mail: wolfgang.wondrak@daimler.com Telefon: +49 160 8627239 Maximilian Hepp E-Mail: maximilian.h.hepp@daimler.com Telefon: +49 176 30983271	

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

1. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse im Teilprojekt

Gesamtziel des Projektes:

In dem Projekt sollten die Auswirkungen von schnell schaltenden SiC Leistungshalbleitern auf die Lebensdauer der Fahrzeugbatterie untersucht werden. Da mit diesen neuen Bauteilen höhere Schaltfrequenzen und steilere Schaltflanken möglich werden, die gleichzeitig eine höhere Leistungsdichte und einen höheren Wirkungsgrad versprechen, stellt dies auch die weiteren Komponenten des Antriebsstrangs vor höhere Anforderungen. Zu Projektbeginn war nicht bekannt, welche Auswirkungen hohe Schaltfrequenzen auf die Lebensdauer der Traktionsbatterien haben.

Diese Fragestellungen sollten durch Lebensdauertests an Lithium-Ionen-Zellen im Labor untersucht werden, wobei verschiedene Parameter wie Schaltfrequenz, Amplitude und weitere gezielt variiert werden sollten.

Parallel zu den synthetischen Tests sollten die tatsächlich vorkommenden Rippel an einem SiC Umrichter vermessen werden, um dann im weiteren Verlauf des Projektes reale Tests an einem Umrichter durchführen zu können.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Alterungstests sollte ein Simulationsmodell erstellt werden, das diese Einflüsse abbildet und das es ermöglicht, Handlungs- und Designempfehlungen für Umrichter auf SiC-Basis zu erstellen, beziehungsweise die Alterung der Batterie bei der Auslegung des HV Bordnetzes in Elektrofahrzeugen besser zu berücksichtigen.

Das Projekt wurde in 9 Arbeitspakete gegliedert, die in Abb. 1 in ihrem Zusammenspiel dargestellt sind. Der finale Arbeitsplan ist kompakt in Abb. 2 aufgezeigt.

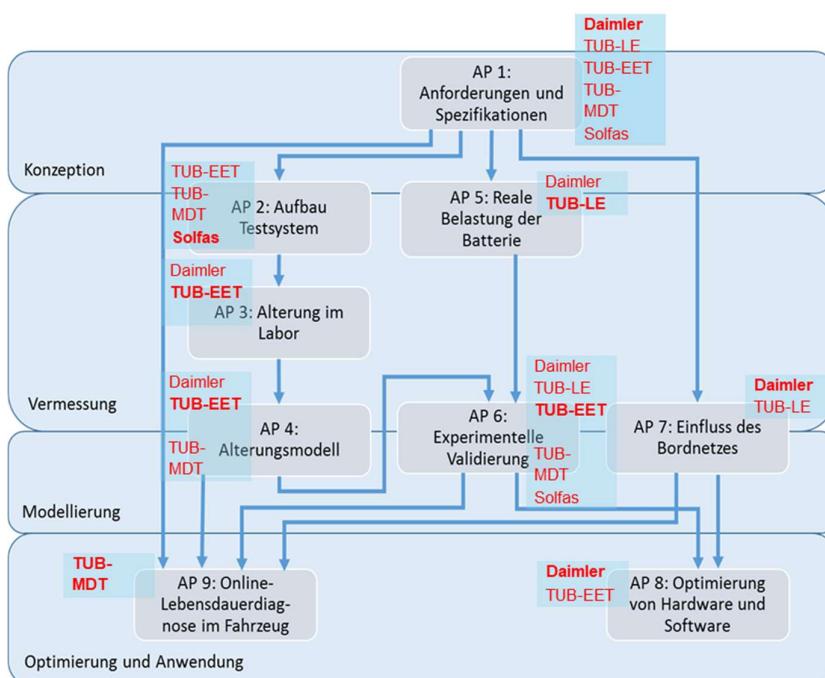


Abb. 1: Arbeitspakete und Zusammenarbeit in SiCWell

01.09.2018

31.08.2021

30.11.2022

AP	Inhalt	Jahr 1		Jahr 2		Jahr 3		Jahr 4		J 5
AP1	Anforderungen und Spezifikationen		M1							
AP2	Aufbau Testsystem				M2					
AP3	Alterung im Labor									
AP4	Alterungsmodell					M3				
AP5	Reale Belastung der Batterie durch den Inverter			M4	M5					
AP6	Experimentelle Validierung für Batteriepacks								M6	
AP7	Einfluss von Bordnetzschwingungen auf die Batterie									M7
AP8	Optimierung von Hard- und Software									
AP9	Online- Lebensdauerdiagnose im Fahrzeug									M8

Abb. 2: Finaler SiCWell Arbeitsplan

Die Arbeiten der Mercedes-Benz AG betrafen die folgenden Bereiche.

In AP 1 wurde die Definition der Anforderungen an Batteriezellen, deren Belastungen und Testbedingungen festgelegt und die zu untersuchenden Fahrzeugklassen, Fahrprofile sowie deren Stromanforderungen, Bordnetzeigenschaften und die relevanten Normen ausgetauscht.

In AP 3 und 4 leistete die MBAG Unterstützung der Testplanung durch Alterungsdaten und bestehende Erfahrungen sowie bei der Durchführung von Befunden von Zellen. Weiterhin wurden Informationen zu bestehenden Lebensdauer- und Degradationsmodellen bei der MBAG ausgetauscht. Zur Ertüchtigung der TUB für weitergehende eigene Analysen wurden Teile für Experimentalzellen bereitgestellt.

In AP 5 wurden der TUB Teile für den Aufbau eines SiC Stromrichters bereitgestellt. In AP 5 und 7 wurden die durch den Inverter hervorgerufenen Strom- und Spannungswelligkeiten auf dem HV Bordnetz an einer Batterienachbildung und an einer Bordnetznachbildung messtechnisch untersucht.

In AP 6 und 9 wurde zur Unterstützung der Arbeiten an der TUB zur Quantifizierung der Belastungen von Batterien mittels Messungen an einer physikalischen Bordnetznachbildung Fahrzeug Komponenten aus dem HV Bordnetz übergeben und gemessene Stromwerte aus einem Flottenversuch bereitgestellt.

In AP 8 wurde die Bewertung der Projektergebnisse und des Lebensdauermodells der TUB für die Auslegung von Antrieben und Wechselrichtern unter Berücksichtigung der Alterung durchgeführt. Dazu wurde das Potential von SiC (schnelleres Schalten, höhere Taktfrequenzen) auf die Auslegung von Zwischenkreiskondensatoren analysiert sowie die Nutzung neuer Freiheitsgrade bei der Pulsmustererzeugung für die Ansteuerung der E-Motoren betrachtet.

Die Projektbeiträge der Mercedes-Benz AG werden nachfolgend im Detail beschrieben dokumentiert.

1.1. Projektbeiträge der Daimler AG im Arbeitspaket 1 (Anforderungen und Spezifikationen)

Spezifikation von Fahrzeugarchitektur und Testsystem

Um in einer Simulation die Inverterströme in einem Fahrzeug zu ermitteln, sind verschiedene Angaben zum Fahrzeug, dem Antriebsstrang aber auch zum Fahrzyklus notwendig. In der unten dargestellten Grafik (Abb. 3) ist ein Fahrzyklus dargestellt, der auf dem WLTP-Fahrzyklus basiert. Allerdings wurden seine Geschwindigkeiten aber auch die Beschleunigungen etwas erhöht, wodurch eine etwas zügigere Fahrweise dargestellt wird, die einem realen Fahrverhalten nahekommt.

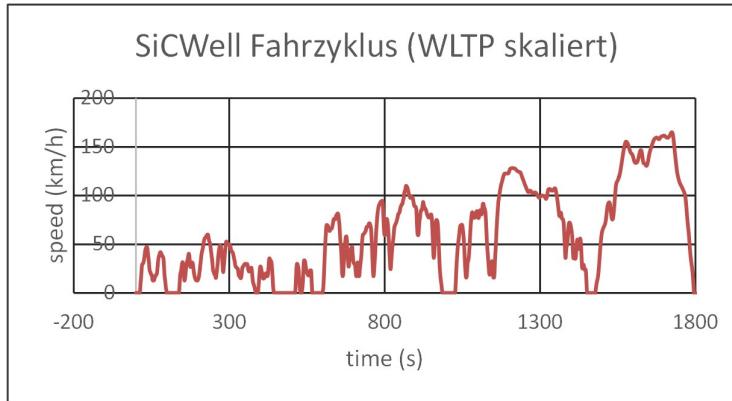


Abbildung 3: Gewählter Fahrzyklus für die Simulation der Inverterströme

Bei den Fahrzeugdaten wurde zunächst auf Daten von eigenen Fahrzeugen zurückgegriffen. Zunächst wurden eine mittelgroße Limousine und ein SUV-Elektrofahrzeug gewählt. Erste Ergebnisse der Simulation seitens der TU Berlin zeigten jedoch, dass mit einem anvisierten Elektromotor von 100kW der Elektro-SUV den oben dargestellten Zyklus nicht ganz folgen kann. Bei den etwas stärkeren Beschleunigungen wäre wegen seines höheren Gewichts eine leistungsstärkere E-Maschine notwendig. Daher wurden alternativ auch noch Fahrzeugdaten eines Mittelklassewagens bereitgestellt. Diese Daten sind in Tab. 1 zusammengestellt.

Fahrzeugtyp	Limousine (EV)	SUV (EV)	Mittelklasse (EV)	
v_max elektrisch peak (2min BEV)	[km/h]	180	180	150
v_max elektrisch dauer	[km/h]	180	180	150
0-100 km/h elektrisch	[s]	5	5,1	9,6
eReichweite	[km]	450	450	300
Fahrzeugdaten				
m_Fzg. (leer)	[kg]	1965	2425	1520
r_dyn	[m]	0,329	0,359	0,316
f_r	[‐]	0,014	0,014	0,009
Cx	[‐]	0,23	0,32	0,32
A	[m ²]	2,33	2,56	2,19

BEV = Battery – Electric Vehicle

Tabelle 1: Fahrzeugkennwerte für die Simulation

Bei den Angaben der E-Maschine orientierten sich die Werte an einer bereits vorhandenen E-Maschine. In Abb. 4 ist das Kennfeld dieser E-Maschine bei einer Spannung von 400V zu sehen. Als auslegungsrelevanter Betriebspunkt wurde eine Leistung von 100kW bei

maximalem Drehmoment gewählt, da bei dieser Maschine hier der höchste Ripplestrom zu erwarten ist. Für diesen Betriebspunkt wurden anschließend die Werte für Induktivitäten, Ströme und den magn. Fluss (L_d , L_q , I_d , I_q und Ψ) bereitgestellt.

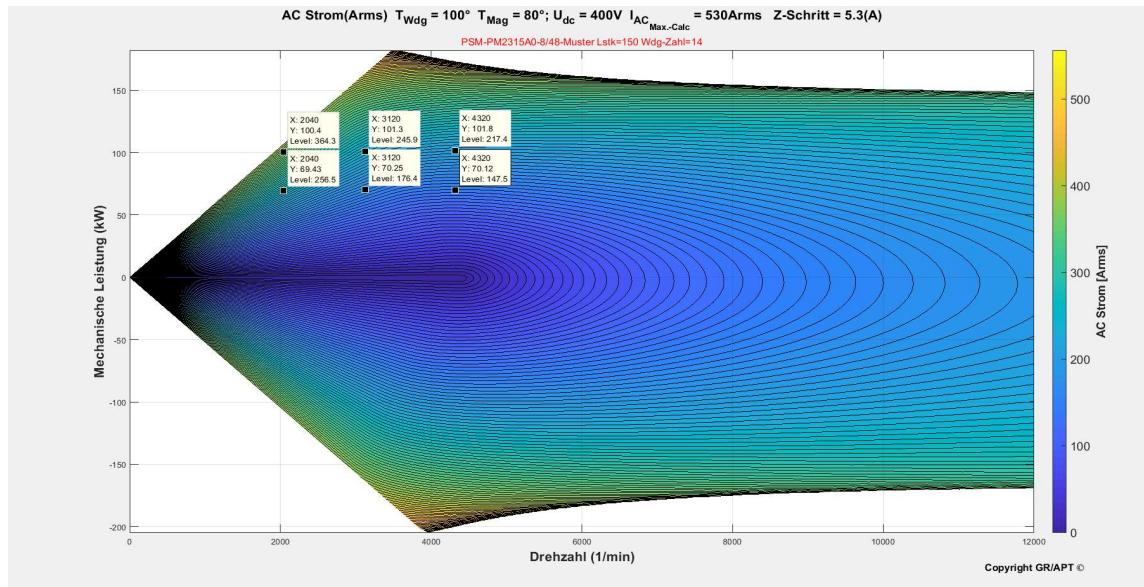


Abbildung 4: Festlegung des Betriebspunktes im Kennfeld der E-Maschine

Festlegung der Lebensdauertests für Batteriezellen

Auf Batterieebene erfolgte die Festlegung der zu untersuchenden Zelle. Bei der letztlich spezifizierten Zelle handelt es sich um eine EV-Zelle, die zu Projektbeginn bereits in Serie eingesetzt wurde. Es wurde eine Pouch-Zelle ausgewählt, so dass die Befundung durch Post-Mortem-Analyse problemlos möglich ist. Mit einer Nennkapazität von 50.8 Ah lassen sich die Testkosten im Rahmen halten.

Zelleneigenschaften:

- 50.8 Ah; Pouch-Zelle (minimale Testkosten und optimale Befundung möglich)
- Spannungslimits: 2.5V; 4.2V
- Max. Ladestrom 25°C: 1C bis 4V; 0.5C bis 4.2V
- Max. Entladestrom 25°C: 190A
- Alterung bei 1C/1C 25°C 100% Zyklen: ca. 1500 Zyklen bis 80% Restkapazität

Der Spannungsbereich solch einer Pouch-Zelle beim Laden und Entladen mit einer Rate von 1C ist in Abb. 5 dargestellt. Für die Tests wurden 100 Pouch-Zellen (siehe Abb. 6) im April 2019 beschafft und an die TU Berlin übergeben. Im Oktober 2021 erfolgte eine Nachlieferung von 10 Zellen für weitere Tests.

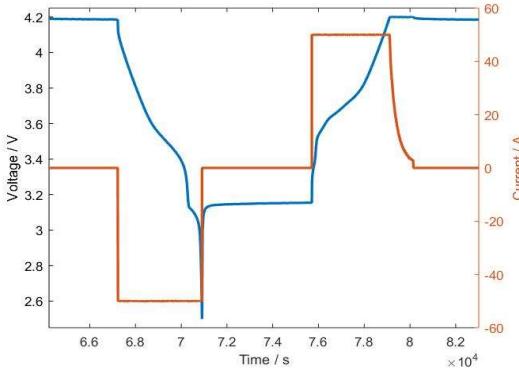


Abbildung 5: Entlade- und Ladespannung bei 1C



Abbildung 6: Gewählte Batteriezelle

Zur Erstellung der Testspezifikation wurden Strom- und Spannungslimits der Zelle an die TU Berlin kommuniziert, sowie die erwartete Alterung unter Standardbedingungen. Damit konnten die Testbedingungen so ausgelegt werden, dass eine schnellstmögliche Alterung der Zelle gewährleistet wird, aber nur die im Fahrzeug auftretenden Alterungsmechanismen angeregt werden. Die Testspezifikation entstand in gemeinsamer Diskussion mit der TU Berlin und Solfas unter Berücksichtigung der erwarteten Leistungsfähigkeit des Testers. Ziel der Testmatrix war es, den kompletten Alterungsverlauf zu erfassen, ohne dabei den Rippeleinfluss stark durch andere Einflussfaktoren zu überlagern. Insbesondere wurde Wert darauf gelegt, den Einfluss der kalendarischen Alterung durch moderat gewählte Temperaturen zu minimieren, aber auch unerwünschte zyklische Effekte wie Lithium-Plating in den Basistests zu vermeiden. Es wurden aber gezielt Testbedingungen durch Variation des SOCs eingefügt, bei denen durch die Stromrippel die Grenzen für Strom –und/oder Spannung verletzt wurden. Der Fokus der Testmatrix liegt auf der Variation der Rippelamplitude und der Rippelfrequenz.

Spezifikation des Batterie-Testsystems

Als Grundlage für die Auslegung der Amplituden für die Strom- und Spannungswelligkeiten wurden vorhandene Messdaten aus verschiedenen Hybrid- und Elektrofahrzeugen aufgearbeitet. In Abstimmung mit den am Projekt beteiligten Parteien wurde sich auf eine überlagerte AC-Stromamplitude von bis zu 100% des DC-Nennstroms geeinigt.

Die Erstellung der Spezifikation des Testsystems erfolgte auf Basis der erforderlichen Ströme und Spannungen sowie der 1sec-Widerstände der Zelle.

1.2. Projektbeiträge der Mercedes-Benz AG im Arbeitspaket 3 (Alterung im Labor) und 4 (Alterungsmodell)

AP3.c: Post-Mortem Analyse

Die Post-Mortem Analysen wurden im Anschluss an die Alterungstests der TUB in Unterbeauftragung am Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) in Ulm durchgeführt. Ziel der Untersuchungen war es, die Alterungsmechanismen der Zellen und eventuelle Abhängigkeiten mit den gewählten Alterungsparametern zu identifizieren.

Das ZSW wurde beauftragt eine Post-Mortem Analyse an 5 ausgewählten Zellen durchzuführen. Hierbei wurde eine Zelle im ungealterten Zustand im Vergleich mit 4 gealterten Zellen aus verschiedenen Testpunkten des DOE Testplans analysiert. Die Zellen wurden unter Schutzgas geöffnet, zerlegt und die Elektroden anschließend gewaschen. Zur chemischen und strukturellen Analysen der Elektrodenmaterialien wurden folgende Methoden angewandt:

- Dicken- und Gewichtsmessung
→ Charakterisierung der Elektrodenbeschichtung
- Rasterelektronen-Mikroskopie (REM/EDX)
→ Charakterisierung der Elektrodenmorphologie und chemische Zusammensetzung der Elektroden und Zersetzungsprodukten
- Röntgendiffraktometrie
→ Kristallstrukturanalyse der Kathodenaktivmaterialien
- Optische Emissionsspektrometrie
→ Zusammensetzung der Elektroden und Zersetzungsprodukte nach chemischen Elementen
- Hg-Porosimetrie
→ Bestimmung der Elektrodenporositäten

Zusätzlich wurden jeweils ausgewählte Lagen der Elektroden entnommen und, unter Schutzgas verpackt, der TUB zugesandt. Sämtliche Berichte und Daten der Analysen wurden der TUB zur Verfügung gestellt.

Die wesentlichen Schritte der Analysen sind in den folgenden Abbildungen dokumentiert.



Abbildung 7: Gealterte Pouch Zelle



Abbildung 8: Exemplarische Anodenlagen verschiedener gealterter Zellen



Abbildung 9: Präparation der Elektroden und verwendete Drei-Elektrodenzellen

Die Mercedes-Benz AG stellte der TUB Drei-Elektrodenzellen sowie das benötigte Verbrauchsmaterial zur Untersuchung der Elektrodenpotentiale zur Verfügung. Anhand der Messungen konnten weitere Informationen zum Ablauf der Alterung der Zellen generiert werden.

Die wesentlichen Befunde der Post-Mortem Analyse sind:

- Alle untersuchten Zellen weisen Lithium-Plating in den Randbereichen der Elektroden auf.
- Ein Anstieg der Zersetzungsprodukte des Elektrolyten auf der Anode konnte festgestellt werden.
- Es traten nur geringfügige Änderungen der Anoden- und Kathodenporositäten auf.
- Die Aktivmaterialstruktur weist keine signifikanten Veränderungen auf.

1.3. Projektbeiträge der Mercedes-Benz AG im Arbeitspaket 5 (Reale Belastung der Batterie durch den Inverter)

Die Übertragung der Strom- und Spannungswelligkeiten vom SiC-Umrichter auf die Zellen innerhalb der HV-Batterie ist abhängig von der Impedanz des HV-Bordnetzes. Je nach Topologie des Fahrzeugs und der angeschlossenen Nebenaggregate sowie Art und Länge der HV-Kabel werden einzelne Frequenzanteile des Störsignals unterschiedlich gut übertragen. Um Ergebnisse zu erhalten, die möglichst unabhängig von einem konkreten Fahrzeug sind, wird anstatt eines gemessenen bzw. simulierten Bordnetzes eine Bordnetznachbildung verwendet, wie sie in der ISO 21498 definiert wurde.

Simulationsmodell und Parametrierung

Zur Erstellung des Simulationsmodells an der TUB fand ein intensiver Austausch zu den Simulationsdaten für das Hochvoltbordnetz im Fahrzeug und den relevanten Normen statt.

Dabei wurden gemessene Daten zum Bordnetzrippel und die Ergebnisse eigener Simulationen für einen generischen Betriebspunkt (2000rpm, 520Nm, 375V, siehe Abb. 8) für die Validierung der Simulationen an der TUB zur Verfügung gestellt. Diese beruhten auf einem Hybridantrieb, da zu Projektstart noch keine entsprechend validierten Daten für EVs vorlagen. Die Aufzeichnung hochauflösender Messungen im Fahrzeug stellt eine große Herausforderung dar, da neben hohen Sicherheitsanforderungen an die Messtechnik meistens wenig Platz für dessen Verbau zur Verfügung steht.

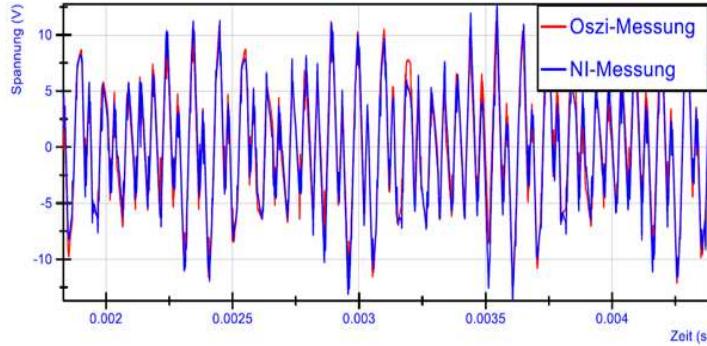


Abbildung 10: Gemessene und berechnete Spannung im HV Bordnetz in einem Hybridfahrzeug

Analyse der Belastungsszenarien der Batterie

Zur Erstellung des Simulationsmodells an der TUB fand ein intensiver Austausch zu den Simulationsdaten für das Hochvoltbordnetz im Fahrzeug und den relevanten Normen statt. Auch wurden die Ergebnisse der Simulationsmodelle der Mercedes-Benz AG mit den Ergebnissen der TUB verglichen und die Unterschiede beider Modelle diskutiert.

Wegen des Trends zu höheren Batteriespannungen bei EVs und des größeren Vorteils von SiC gegenüber Si IGBTs wurde entschieden, die Untersuchungen auf eine Konfiguration mit einem 800V Bordnetz abzustimmen.

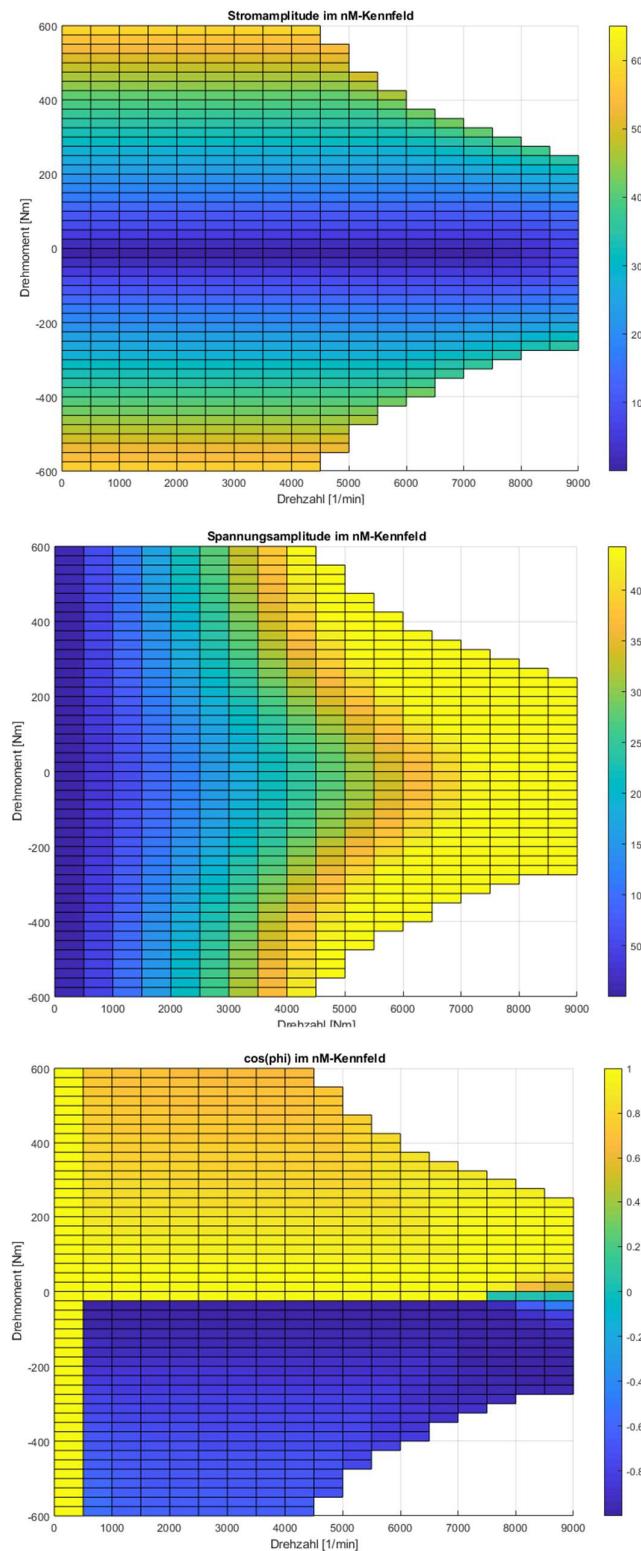


Abbildung 11: Strom, Spannung und $\cos(\phi)$ im $n \cdot M$ Kennfeld

Für die konkreten Anwendungsfälle, Simulationen und späteren Messungen wurde durch MBAG ein 800V E-Motor ausgewählt, der im Projekt SiCnifikant aufgebaut wurde und der auch so in einem Elektrofahrzeug der nächsten Generation verbaut werden könnte. Für die ersten Analysen und Abschätzungen für die Bordnetzauswirkungen wurde ein Datensatz der Maschine an die TUB übergeben. Hierbei handelte es sich um die Flusskennfelder und ein Drehmoment - Drehzahlkennfeld bei dem für jeden Punkt der Strom, die Spannung und der $\cos(\Phi)$ hinterlegt sind (siehe Abb. 11). Diese Werte wurden nach dem MTPA (maximum torque per ampere) berechnet. Mit einem entsprechenden Bordnetzmodell kann damit die Welligkeitsbelastung der Batterie simulatorisch bestimmt werden.

Anhand der Simulationen wurde das Belastungsszenario für die IGBT Referenzmessungen festgelegt und damit der Meilenstein M4 im Juni 2020 erreicht.

Aufbau des SiC Umrichters

Im AP5 wurden zusammen mit der TU Berlin und der Mercedes-Benz AG Belastungsszenarien des Inverters spezifiziert. Hierbei werden verschiedene Punkte aus dem Maschinenkennfeld ausgewählt, die für die weiteren Betrachtungen und für die Rippelspannungen und Ströme auf dem Bordnetz besondere Relevanz haben. Da sich einige dieser relevanten Punkte auf der Grenzkennlinie der Maschine – es handelt sich um eine 800V / 250kW PM Maschine – befinden, war es notwendig einen Inverter aufzubauen, mit dem es möglich ist die jeweiligen, teils sehr hohen, Spannungen und Ströme stellen zu können.

Hierfür wurden der TU Berlin Module auf SiC-Basis der Infineon AG zur Verfügung gestellt, mit denen es möglich ist, die hohen Anforderungen an den Inverter zu erfüllen. Die jeweiligen Module waren nicht kommerziell erhältlich. Deshalb war es notwendig eine trilaterale Geheimhaltungsvereinbarung zwischen der Mercedes-Benz AG, der TU Berlin und der Infineon AG zu schließen. Das SiC-Modul, das passende Gate-Treiber Board und ein Zwischenkreiskondensator wurden von der Mercedes-Benz AG an die TU Berlin übergeben, um den Aufbau eines eigenen Inverters zu unterstützen, siehe Abbildung 12.

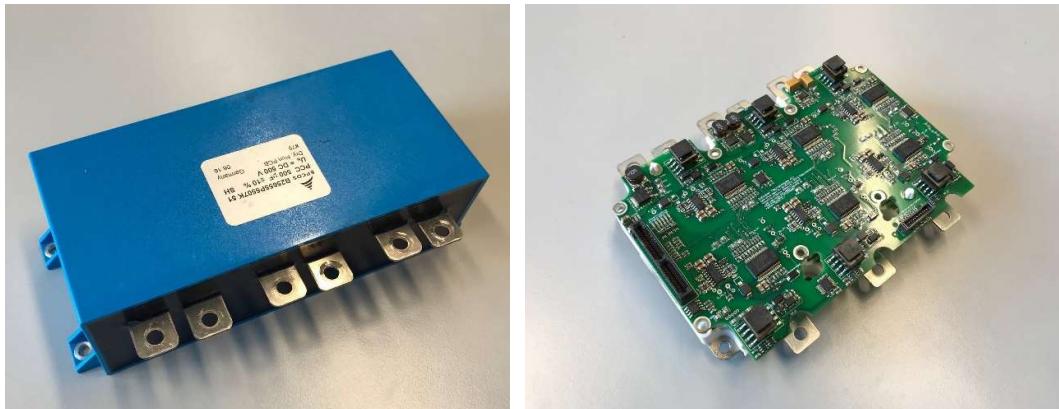


Abbildung 12: Zwischenkreiskondensator und SiC-Modul mit schon montiertem Gate-Treiber Board

Die Leistungsstufe ist ein Prototypen SiC-Modul der Firma Infineon. Die SiC-Halbleiter weisen eine Sperrspannung von 1200V auf, sind also für den 800V Einsatzfall geeignet. Des Weiteren kann das Modul bei entsprechender Kühlung einen Dauerausgangsstrom von 550 Arms

führen, weswegen sehr hohe Leistungen möglich sind und die volle Leistung der Maschine ausgenutzt werden kann.

Zu dem Modul wurde auch von Infineon das passende Gatedrive-Board zur Verfügung gestellt. Dieses besitzt entsprechende Gaterücker, die hohe Schaltfrequenzen und auch Schaltflanken ermöglichen können.

Passende 800V Zwischenkreiskondensatoren wurden ebenfalls bereitgestellt. Die Kondensatoren hatten unterschiedliche Kapazitäten, damit auch der Einfluss der Zwischenkreiskapazität auf das Bordnetz untersucht werden konnte.

Um einen Vergleich zu IGBT Halbleitern zu schaffen, wurde bei MBAG ebenfalls dasselbe Setup mit einem IGBT Leistungsmodul aufgebaut. Somit war es möglich, den Einfluss der Halbleiterschaltvorgänge und die Effizienz direkt miteinander vergleichen zu können.

Vermessung von Si & SiC Umrichter an einer Batterienachbildung

Es wurde beschlossen, einen BEV-Antrieb auf 800V Technologie als Basis für die Versuche zu verwenden. Hierfür sollte der neue Prüfstand der Mercedes-Benz AG verwendet werden, mit dem es möglich ist, die Anforderungen aus Tabelle 1 zu erfüllen. Aufgrund von Verzögerungen im Aufbau, eines Wasserschadens, sowie auftretender EMV-Probleme war jedoch innerhalb des Jahres 2020 keine Inbetriebnahme möglich.

Deswegen wurden vorab bereits Messungen mit Si und SiC an einem Hybrid-Prüfstand in Böblingen (Abb. 13) durchgeführt, um schon erste Ergebnisse zu erhalten. Der Prüfstand und die Maschine sind leistungs- und spannungsbegrenzt und entsprechen nicht den Zielvorgaben. Es konnte nur ein Bereich bis 400V Zwischenkreisspannung und 100kW Leistung abgefahren werden.

Der Aufbau und die Invertersoftware entsprachen dem Zielaufbau mit Bordnetznachbildung. Somit konnten schon erste Ergebnisse zum Vergleich mit den Simulationen erbracht werden. Bei diesen Messungen wurden ausgewählte Punkte im Kennfeld bei verschiedenen Schaltfrequenzen für SiC (10, 20, 30 kHz und für Si 8, 10 kHz) vermessen und dabei auch Stromrippel und Spannungsrippel mit der Bordnetzsimulation erfasst. Dabei waren die Referenzpunkte zur Messung der Bordnetzrippel entsprechend an die vorhandene Hybrid-Maschine angepasst.

Mit diesen Messungen konnte im Oktober 2020 das Belastungsszenario verifiziert werden. Damit wurde Meilenstein 5 (SiC Antriebswechselrichter aufgebaut und getestet, und ein modifiziertes Belastungsszenario erstellt) erreicht.

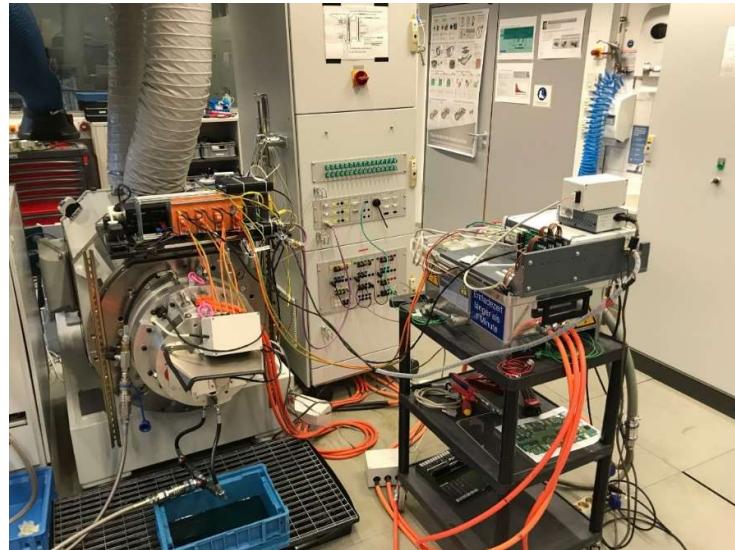


Abbildung 13: Prüfstand für elektrische Maschinen von Hybrid-Fahrzeugen von Mercedes-Benz

Die festgelegten Tests im gesamten Spannungs- und Leistungsbereich wurden erst in 2022 nach Inbetriebnahme des neuen Prüfstandes möglich. Die Messungen erfolgten bei 800V an der Zielmaschine, einer permanentmagnetisch erregten Synchronmaschine mit ca. 250kW Spitzenleistung. Die Versuchsdaten wurden einerseits mit einem hochgenauen Leistungsmessgerät (Yokogawa WT3000), als auch mit einem hochauflösenden Oszilloskop aufgezeichnet. Der Prüfaufbau ist in Abbildung 14 dargestellt.

Die Messungen mit der Bordnetznachbildung wurden in der gleichen Messkampagne wie die Messungen im AP5 durchgeführt, sodass eine direkte Vergleichbarkeit gewährleistet war. Dabei wurde die Bordnetznachbildung nach ISO 21498-2 in das System mit eingebunden, um fahrzeugahe Versuchsdaten generieren zu können und die Auswirkungen auf die Batterie abzuschätzen.



Abb. 14: Prüfstandsaufbau am Maschinenprüfstand bei Mercedes-Benz

Es wurden verschiedene Prüfpunkte ausgewählt, die vorab in Simulationen der TU Berlin bestimmt wurden und am Prüfstand abgefahren. Hierbei wurden verschiedene Schaltfrequenzen von Si und SiC eingestellt und auch Referenzpunkte zum Abgleich von etwaigen Störungen aufgenommen.

Mit dem Leistungsmessgerät WT3000 wurden die RMS Ströme und Spannungen, die DC Leistung und das Drehmoment und die Drehzahl aufgezeichnet. Hieraus konnte dann die Leistung in den jeweiligen Arbeitspunkten berechnet werden. Abbildung 15 zeigt exemplarisch einen Vergleich der Verlustleistung von Si und SiC

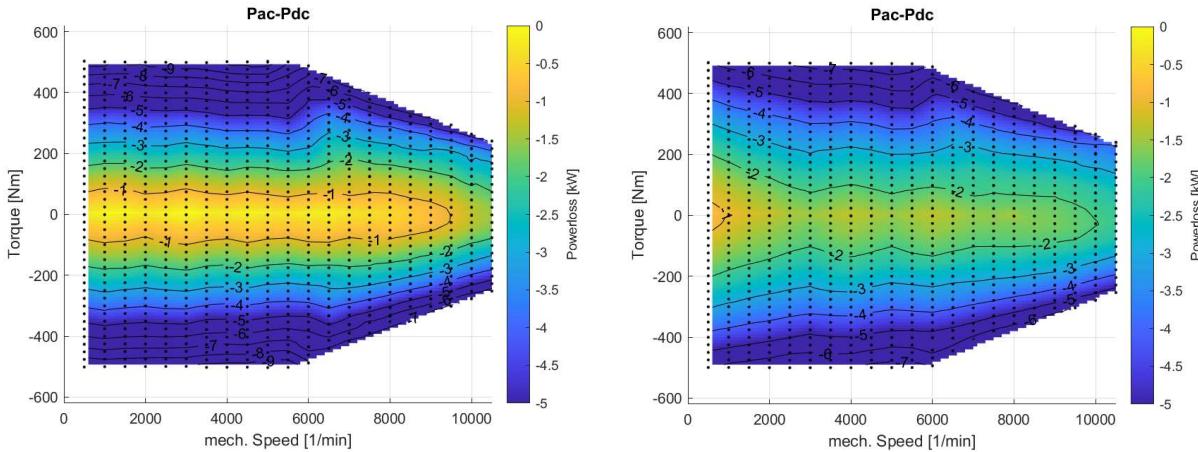


Abb. 15: Verlustleistung SiC (links) gegen Si (rechts)

Für jeden oben genannten Arbeitspunkt wurde das Oszilloskop so getriggert, um Messungen des DC-Stromes und der DC-Spannung sehr hochauflösend aufzuzeichnen. Hiermit konnten dann weitere Auswertungen erfolgen, wie zum Beispiel eine Analyse des Frequenzbereiches der elektrischen Größen. Die Daten wurden nach den Messungen an die TU Berlin zur weiteren Auswertung übergeben.

1.4. Projektbeiträge der Mercedes-Benz AG im Arbeitspaket 6 (Experimentelle Validierung für Batteriepacks)

Um die Auswirkungen auf den Stromrippel eines realen Hochvolt-Fahrzeugbordnetzes zu untersuchen, wurde an der TUB die Nachbildung eine HV Bordnetzes aufgebaut. Zusammen mit der TUB wurde verschiedene Topologien für die Verschaltung der Nebenverbraucher betrachtet und sich auf eine zielführende möglichst realistische Variante geeinigt.

Dafür wurden die Nebenverbraucher (800V Kältemittelverdichter, elektrischer Heizer und On-Board Charger) als reale Komponenten von MBAG beschafft und zur Verfügung gestellt.

1.5. Projektbeiträge der Mercedes-Benz AG im Arbeitspaket 7 (Einfluss von Bordnetzschwingungen auf die Batterie)

Vermessung von Si und SiC Umrichter an einer Bordnetz-Nachbildung

Die Übertragung der Strom- und Spannungswelligkeiten vom SiC-Umrichter auf die Zellen innerhalb der HV-Batterie ist abhängig von der Impedanz des HV-Bordnetzes. Je nach Topologie des Fahrzeugs und der angeschlossenen Nebenaggregate sowie Art und Länge der HV-Kabel werden einzelne Frequenzanteile des Störsignals unterschiedlich gut übertragen. Um Ergebnisse zu erhalten, die möglichst unabhängig von einem konkreten Fahrzeug sind, wurde anstatt eines gemessenen bzw. simulierten Bordnetzes die Bordnetznachbildung verwendet, wie sie in der ISO 21498 definiert wurde (siehe Abb. 16).

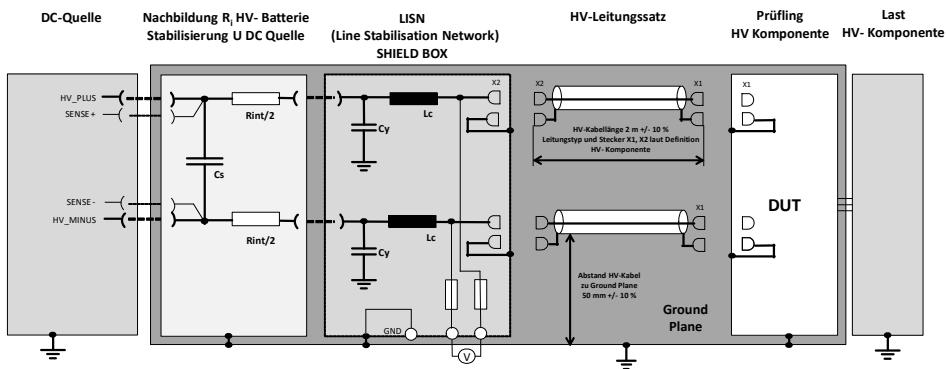


Abbildung 16: Bordnetznachbildung gemäß ISO 21498, gewählt werden hierbei $L_c = 1 \mu\text{H}$, $R_{int} = 100 \text{ mOhm}$, $C_s = 5 \text{ mF}$, $C_y = 1 \mu\text{F}$

Um die Auswirkungen der jeweiligen Halbleitertechnologien auf die Rippel im Bordnetz und der Batterie zu untersuchen, wurde von der Mercedes-Benz AG eine Bordnetznachbildung elektrischer Fahrzeuge aufgebaut, siehe Abbildung 17. Diese wird zwischen Inverter und der Batterie-Simulation des Prüfstandes geschaltet, um die Ströme und Spannungen und die jeweiligen Rippel zu messen. Der innere Aufbau der Bordnetznachbildung ist in Abb. 18 zu sehen.



Abbildung 17: Bordnetznachbildung der Mercedes-Benz AG



Abb 18: Innerer Aufbau der Bordnetznachbildung

Vor der Inbetriebnahme der Bordnetznachbildung am Prüfstand wurde diese zunächst auf ihre Einsatzfähigkeit untersucht. Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit der HV-Bordnetznachbildung wurden zwei prinzipiell verschiedene Versuchsaufbauten realisiert.

Da im realen Fahrzeug der Maschinenumrichter mit Antriebsmaschine hinter der HV-Batterie bzw. am Bordnetz angeschlossen ist, wurde im ersten Versuchsaufbau diese Konfiguration nachgestellt und durch Variation der Taktfrequenz des Umrichters im Zusammenspiel mit der Maschinenleistung das Verhalten hinsichtlich Beständigkeit gegen getaktete Impulse untersucht (Abb. 19). Hierzu wurden verschiedene Schaltvarianten der Umrichter getestet.

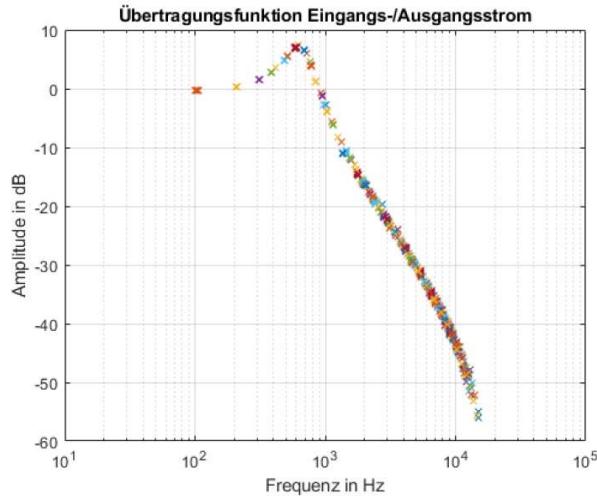


Abb. 19: Übertragungsfunktion der Bordnetz-Nachbildung

In einem weiteren Versuchsaufbau sollte zunächst das Verhalten hinsichtlich Temperaturstabilität betrachtet werden. Dazu wurde die Umrichter-Maschinenkombination gegen eine steuerbare ohmsche Last ausgetauscht. Diese wurde sowohl statisch als auch getaktet betrieben, sodass neben der thermischen Betrachtung auch das Verhalten bei getakteten ohmschen Leistungen möglich wurde (siehe Abb. 20).

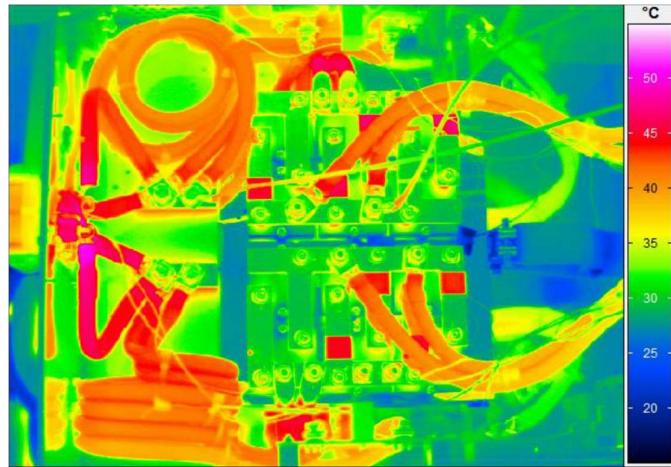


Abb. 20: Thermographische Untersuchung der Bordnetz-Nachbildung im Betrieb

Die Versuche zum thermischen Verhalten ergaben, dass sich die BN bei den durchgeführten Versuchen unkritisch verhalten hat und der Hotspot am HVP 800 Stecker entstand. Hier wurde ein Temperaturfühler zur Überwachung integriert. Je nach Verschaltung des internen Widerstands R_{int} entsteht eine mehr oder weniger große Verlustleistung am Widerstand und eine daraus resultierende Temperaturerhöhung.

Die hochfrequenten Ströme, welche von den Umrichtern verursacht werden, waren im Versuch gegenüber den DC-Strömen so klein, dass kein nennenswerter thermischer Einfluss beobachtet werden konnte.

Die Versuche zum Frequenz-Verhalten der bereits im ersten Projektjahr aufgebauten BN Nachbildung ergaben, dass hochfrequente Ströme (z.B. durch das Schaltverhalten von Umrichtern oder EVS) zuverlässig herausgefiltert werden, sodass eine Unabhängigkeit zwischen Ein- und Ausgang der BN erreicht wird. Die ermittelte Grenzfrequenz liegt bei 1 kHz.

1.6. Projektbeiträge der Mercedes-Benz AG im Arbeitspaket 7 (Einfluss von Bordnetzschwingungen auf die Batterie)

NF Simulation des Bordnetzes

Für die Validierung der Simulationsergebnisse der TU Berlin und den Abgleich mit den Strom- bzw. Spannungsmessungen wurden Impedanzmessungen des verwendeten Moduls durchgeführt. Im Fokus lag besonders der Einfluss der Zuleitung inklusive dessen Schirmanbindung bei Verwendung des Inverterprototypen iCKAN (Abb. 21).

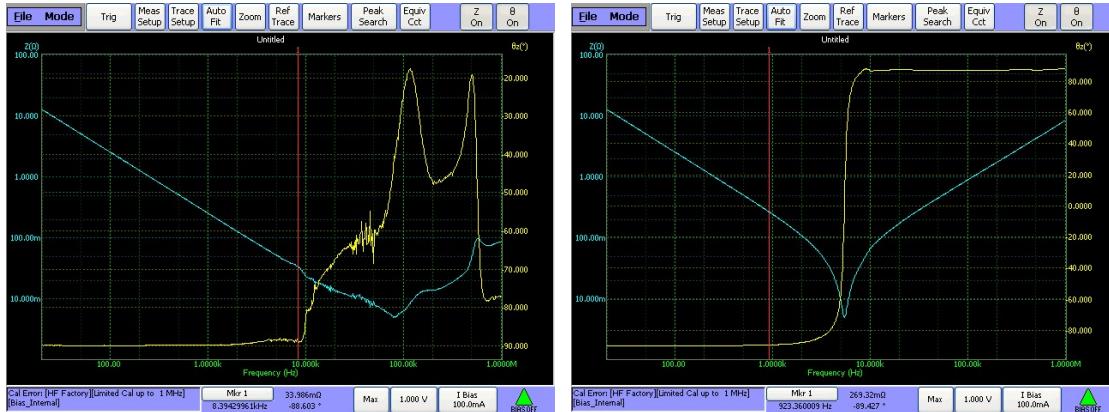


Abb. 21: Impedanz iCKAN ohne und mit Zuleitung

Eine anschließende Modellierung der Zuleitung (Abb. 22) zeigte, dass die richtige Anbindung des Schirms für eine exakte Vermessung essentiell ist. Durch zirkulierende Ströme im Schirm konnten die Stromripple gerade im hier betrachteten Frequenzspektrum >10 kHz massiv beeinflusst werden.

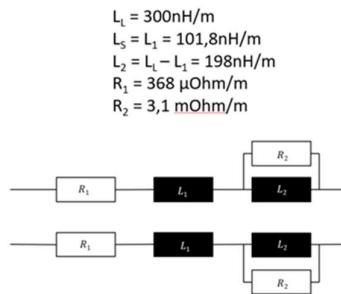


Abb. 22: Modellierung der Zuleitung inkl. Schirm

Die gewonnenen Erkenntnisse aus der Modellierung des Aufbaus konnten zur Erklärung für Abweichungen zwischen Messung und Simulation verwendet werden.

Die Ergebnisse der Si und SiC Umrichter an der BN Nachbildung am E-Maschinen Prüfstand wurden bereits in Kapitel 1.3 beschrieben.

Simulationsgestützte Analyse der Batteriebelastung

Mithilfe der Messungen am Prüfstand konnte gezeigt werden, dass das Simulationsmodell der TUB die im Bordnetz und an der Batterie auftretende Ströme und Spannungen hinreichend genau berechnet. Der TUB wurden die nötigen Kennwerte bereitgestellt, um für ein hypothetisches Fahrzeug mit Standard-Inverteraulegung (SIA) den Stromrippel in einem skalierten WLTP Fahrzyklus zu simulieren. Diese basieren auf den EPA Daten für den Mercedes-Benz EQS /2/. Auf dieser Basis konnte die Batteriealterung simuliert werden und Bewertungen verschiedener Konzepte erfolgen.

Festzulegende Spezifikationen / Benötigte Daten	Verantwortlich
Fahrzeugdaten: eqs -Fahrzeugmasse (2480 + 75 kg) -Stirnfläche (2.51 m ²) -cw-Wert (0.2) -Raddurchmesser (741 / 738 / 745 / 744 mm) -Maximalgeschwindigkeit (210 km/h)	2678 (EPA) 2,51 0,229 741 210
Batterie: -Kapazität (107.8 kWh) -Nominalspannung (800 V) -Anzahl parallel geschalteter Stränge -Anzahl in Reihe geschalteter Zellen	109,5 (ca 40Ah*4*192*3,6V) 650 nominal, Max. 806V bei 4,2V pro Zelle 4 192
Antriebstrang SiCnifikant: -Zwischenkreiskondensator (600/300 µF) -Kabellänge zum Bordnetz (2m) -Innenwiderstand Bordnetznachbildung (25/50 mOhm) -Schaltfrequenz (10 kHz) -Maschine (PM2315)	600 ok 50 10 2315

Tabelle 2: Angenommene Fahrzeugdaten für die Batteriealterung im realen Betrieb

1.7. Projektbeiträge der Mercedes-Benz AG im Arbeitspaket 8 (Optimierung Hardware und Software)

Ausgehend von den Messergebnissen, den berechneten Bordnetzrippeln bei verschiedenen Frequenzen und dem Batterie-Lebensdauermodell konnte schließlich die Bewertung der aktuellen Batterieauslegung und erfolgen sowie verschiedene Optimierungsansätze des Inverters aus Sicht des Einflusses auf die Batterie evaluiert werden.

Die Referenz (Ref) stellt die Alterung unter Vollzyklen ohne Rippelbelastung dar. Als Standardauslegung (SIA) wurde von einem Antriebs-System mit 800V Batteriespannung und einem Bordnetzwiderstand von $50\text{m}\Omega$ ausgegangen, für den Inverter wurde eine Zwischenkreiskapazität von $600\mu\text{F}$ und eine Taktfrequenz von 10kHz festgelegt.

Variation der Batteriegröße

Für die im Projekt untersuchte hypothetische Konfiguration erhält man für den Betrieb im SiCWell Fahrzyklus folgendes Bild (siehe Abb. 23). Bei Verwendung einer SiC-Well Batterie mit 100kWh Energieinhalt ergibt sich eine Degradation auf ca. 90% nach ca. 150.000 km Fahrstrecke, auf 80% nach ca. 450.000km. Im Vergleich ist ein typischer Wert für die Garantie auf Batterielebensdauern rot eingezeichnet, und ein typischer Wert für die Auslegung mechanischer Getriebe in grün.

Aus Batteriesicht wäre auch eine Reduktion der Traktionsbatterie um 50% möglich, dann würde der SoH der Batterie bei gleichem Energiedurchsatz auf ca. 85% zurückgehen. Dadurch würden andererseits jedoch Einschränkungen bei Fahrzeugreichweite und ggf. bei den Fahrleistungen hervorgerufen werden.

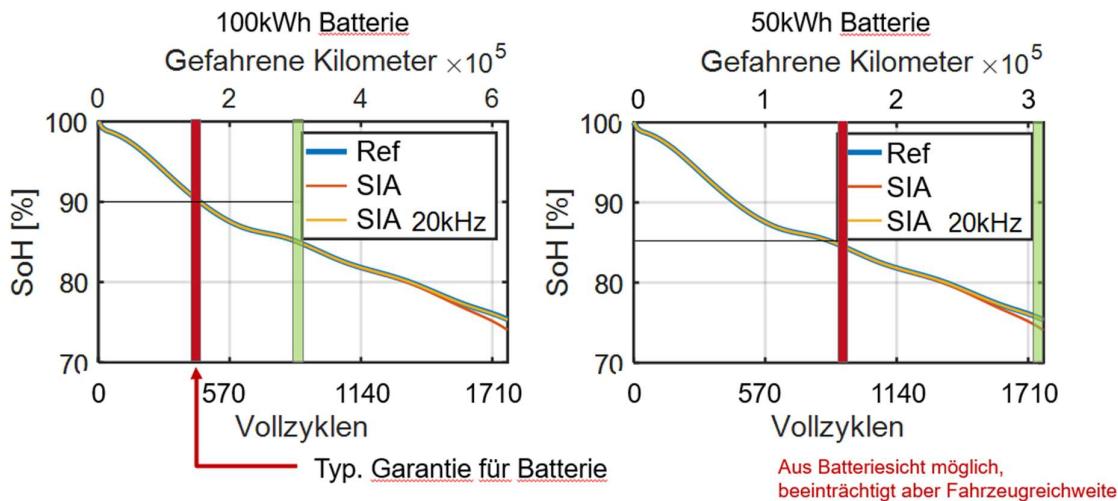


Abb. 23: Batteriealterung bei verschiedenen Batteriegrößen. Alterung im Zyklustest ohne Rippel: blau, Alterung in Standardauslegung bei 10kHz Taktfrequenz: orange, Alterung in Standardauslegung bei 20kHz Taktfrequenz: gelb.

Sensitivitätsanalyse gegenüber verschiedenen Systemparametern

In Abb. 24 ist die erwartete Batteriealterung bei unterschiedlichen Systemparametern aufgetragen. Insgesamt lässt sich erkennen, dass sich der Einfluss des Ripples erst bei langen Gesamtfahrstrecken im Bereich 500.000 bis 600.000km bemerkbar macht.

Eine Reduzierung des Bordnetzwiderstands auf $12,5\text{m}\Omega$ führt zu keiner nennenswerten Entlastung der Batterie. Steigende Batteriealterung folgt aber aus einer Halbierung des Zwischenkreiskondensators (lila), einer Halbierung des Batterie-Spannungsniveaus (gelb), oder der Verwendung diskontinuierlicher Pulsmuster bei der Ansteuerung des Inverters (hellblau). Hier zeigt sich, dass 400V Systeme tendenziell ungünstiger sind und die Wahl eines 800V Bordnetzes insgesamt vorteilhaft ist. Im typischen Gebrauchsbereich von Kfz (bis ca. 300.000km) sind diese Unterschiede aber marginal.

Größere Fahrstrecken werden jedoch im Zusammenhang mit dem hochautomatisieren Fahren erwartet, die in Fahrzeugflotten oder als Robotaxis bewegt werden, aber auch im Gütertransport.

Die Alterung der Batterie ist dagegen im Bereich der Second Life Nutzung wesentlich, z.B. in Batterieparken zur Stützung der Energieversorgung. Unterhalb von 75% SOH zeigen sich deutliche Unterschiede in der weiteren Degradation abhängig von der Vorgeschiede. Die Lebensdauerunterschiede können hier über 20% ausmachen. Die bloße SOH Angabe allein scheint daher nicht für eine Qualitätsbewertung ausreichend zu sein. Hier ist weitere Forschung zum Alterungsverhalten nötig.

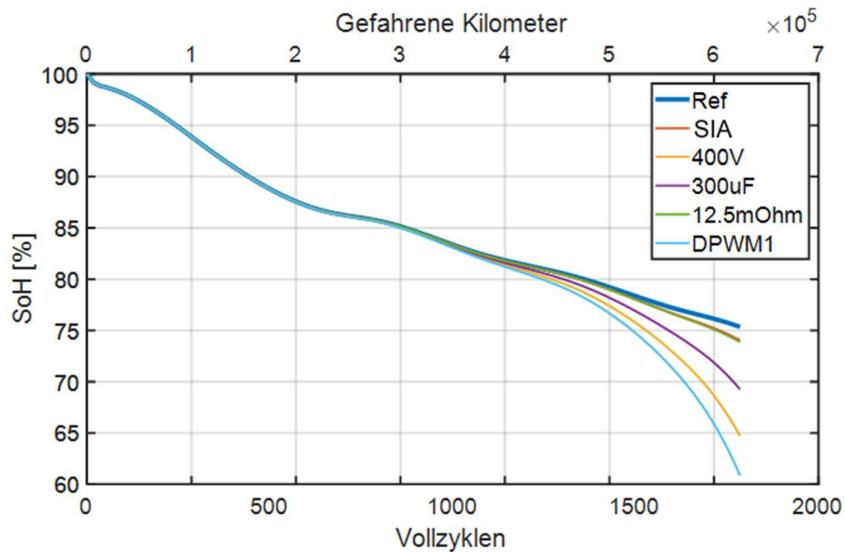


Abb. 24: Batteriealterung bei unterschiedlichen Systemparametern

Taktfrequenz:

Durch den Einsatz von SiC im Inverter wird auch bei höherer Taktfrequenz ein Wirkungsgradvorteil ggü. Si-IGBTs erreicht.

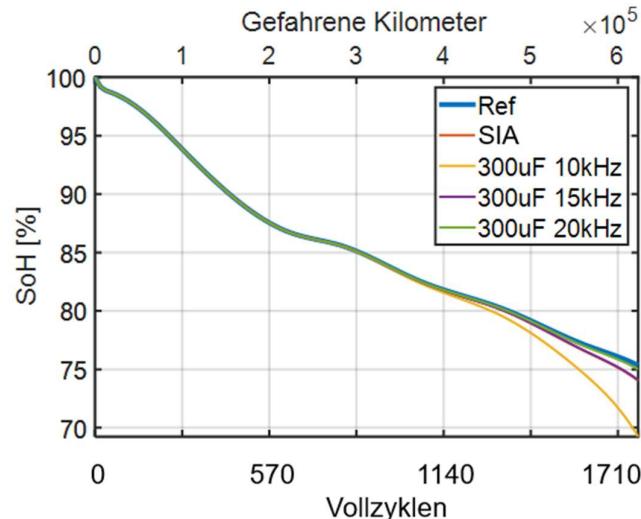


Abb. 25: Batteriealterung bei halbierter Zwischenkreiskapazität und erhöhter Taktfrequenz.

Aus Abb. 25 ist ersichtlich, dass die halbierte Zwischenkreiskapazität bei gleicher Taktfrequenz zwar zu einem höheren Rippel im HV Netz und einer schnelleren Alterung führt, dies kann aber durch eine Erhöhung der Taktfrequenz kompensiert werden. Bereits mit einer Erhöhung auf 15kHz entspricht die Alterung dem Verhalten der Standardauslegung, bei 20kHz wird fast das Alterungsverhalten im DC Fall erreicht.

Dadurch sind im Gesamtsystem Vorteile bezüglich Kosten, Bauraum und Gewicht denkbar. Eine detaillierte Analyse ergibt folgende Bewertung:

Vorteile durch Halbierung der Zwischenkreiskapazität:

- Kosten:
Zur Ermittlung des Kostenvorteils, der sich durch die mögliche Reduzierung des Kondensators ergibt wurde einerseits von einem IGBT Wechselrichter ausgegangen, der heute Standard wäre, und andererseits ausgehend von einem SiC Wechselrichter.

	Si IGBT 10kHz	SiC MOSFET 10kHz	SiC MOSFET 20kHz
Standard-Kondensator	100%	125%	125%
Halbierter Zwischenkreiskondensator	-	-	122%

Tabelle 3: Möglicher Kostenvorteil durch Kondensatorreduktion

Im Vergleich zu einem IGBT Wechselrichter wird der Kostenvorteil beim Kondensator durch höhere Kosten des SiC überkompensiert. Wenn man von einem SiC Wechselrichter ausgeht, ist eine Kostenreduktion um ca 3% möglich.

- **Gewichtsvorteil**
Der Gewichtsvorteil beträgt im untersuchten Beispiel ca 1 kg. Dieser ist schwierig zu bewerten, da es stark auf den Anwendungsfall und die mechanische Auslegung des Antriebs ankommt.
- **Bauraum:** Im angenommenen Beispiel werden ca. 0,5 l Bauraum eingespart. Dies kann besonders bei leistungsstarken und hoch integrierten Antrieben einen entscheidenden Vorteil darstellen, das für Antriebe Faktoren wie Bauraum, Bodenfreiheit, Crashsicherheit, Kühlung, Zuleitungen auslegungsrelevante Anforderungen darstellen.

1.8. Projektbeiträge der Mercedes-Benz AG im Arbeitspaket 9 (Online-Lebensdauerdiagnose im Fahrzeug)

Zur Validierung der Online-Lebensdauerdiagnose in AP9 waren entsprechende Daten zur Batteriebelastung notwendig. Im Projekt EMEGE2 sind reale Daten für kundenrelevante Fahrten in Hybrid- und Batterie-Fahrzeugen erfasst worden. Der TUB wurde ein Beispieldatensatz aus dem Projekt übergeben, um zu testen, ob das verwendete Format verwendbar ist und um ihre Eignung für die Validierung in AP9 zu überprüfen. Leider waren die Daten zu lückenhaft, um hier Verwendung finden zu können.

1.9. Zusammenfassung und offene Fragen:

Anhand der Messungen konnte nachgewiesen werden, dass durch überlagerte Stromwelligkeiten die Alterung von Li Zellen beschleunigt wird. Mit dem abgeleiteten Alterungsmodell lässt sich der Einfluss verschiedener Auslegungen des Inverters bzw. des Bordnetzes quantitativ beschreiben. Für eine Optimierung des HV Systems bleiben aber noch weitere offene Fragen:

- a) Eine höhere Taktfrequenz führt zu höheren kapazitiven Strömen. Wie wirken sich diese aus und wie lassen sich diese quantitativ bewerten?
- b) Eine höhere Taktfrequenz bzw. höhere Spannungsgradienten haben Auswirkungen auf EMV-Störungen. Wie wirken sich diese aus bzw. welche zusätzlichen Maßnahmen sind zur Filterung notwendig?

1.10. Veröffentlichungen

Michael Schlüter¹; Sibylle Dieckerhoff¹; Marius Gentejohann¹; Clemens Gühmann²; Daniel Weber²; Julia Kowal³; Erik Goldammer³; Wolfgang Wondrak⁴; Maximilian Hepp⁴; Madeleine Ecker⁵; Thomas Wersal⁶; Clemens Wache⁷; Thomas Leist⁷

SiCWell - the impact of fast-switching SiC power semiconductors on vehicle battery lifetime, E-MOTIVE 21-23.9.2021 (online)

M. Gentejohann, M. Schlüter, S. Dieckerhoff and M. Hepp
„Driving Cycle Analysis of the DC Bus Current Ripple in Electric Vehicles,“
23rd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'21 ECCE Europe),
pp. P.1-P.10., 2021

E. Goldammer, M. Gentejohann, M. Schlüter, D. Weber, W. Wondrak, S. Dieckerhoff, C. Gühmann und J. Kowal
„The Impact of an Overlaid Ripple Current on Battery Aging: The Development of the SiCWell Dataset,“
MDPI Batteries 2022, 8(2), 11

Michael Schlüter, Marius Gentejohann, Sibylle Dieckerhoff, Erik Goldammer, Julia Kowal,
Maximilian Hepp, Wolfgang Wondrak
The Impact of SiC Traction Converter Switching on EV DC Bus and Battery
Eingereicht zur PCIM2023:

2. Einsatz von Ressourcen

2.1. Vergleich des Vorhabenstandes mit der ursprünglichen Arbeits-, Zeit- und Kostenplanung

Während der Projektlaufzeit traten einige unerwartete Ereignisse ein, die zu Verzögerungen des Projektfortschrittes führten. Zum 01.11.2019 erfolgte eine Umstrukturierung der Daimler AG, so dass der teilnehmende Bereich in die Mercedes Benz AG überging.

Wegen unvorhergesehener technischer Herausforderungen beim Aufbau der Zyklisierungssystems Aufbau des Testsystems verzögerte sich der Start der Belastungsuntersuchungen an den Batteriezellen, der Abbruchmeilenstein M3 konnte jedoch gemäß dem aktualisierten Zeitplan erreicht werden.

Durch die Corona-bedingten Reise- und Anwesenheitseinschränkungen sowie Lieferverzögerungen konnten die Arbeiten bzgl. Prüfstandsaufbauten und Tests in AP5 und AP6 nicht wie vorgesehen vorangetrieben werden. In AP6a konnte daher die Langzeitmessung mit dem Umrichter-basierten Testsystem erst in 2021 gestartet werden. Um die im Projekt vorgesehenen Ziele und Resultate erreichen zu können, beantragten wir daher eine kostenneutrale Laufzeitverlängerung für SiCWell um neun Monate bis zum 31.05.2022.

In dieser ersten Verlängerungsphase konnte nachgewiesen werden, dass der Stromrippel einen Einfluss auf die Alterung der Batteriezellen hat. Es zeigte sich aber auch, dass sich die untersuchten Batteriezellen unter Berücksichtigung eines realen Belastungsprofils als sehr langlebig erwiesen, so dass das definierte Zyklisierungsende bis zum geplanten Projektabschluss im Mai 2022 nicht erreicht werden konnte, so dass ein zweiter Antrag auf Laufzeitverlängerung bis 30.11.2022 gestellt wurde, der vom Projektträger bewilligt wurde.

Aufgrund dieser unerwarteten Verschiebungen wurde eine geänderte Zeitplanung mit dem Projektträger abgestimmt. Die endgültige Zeitplanung für das Projekt ist nachfolgend dargestellt (Abb. 11).

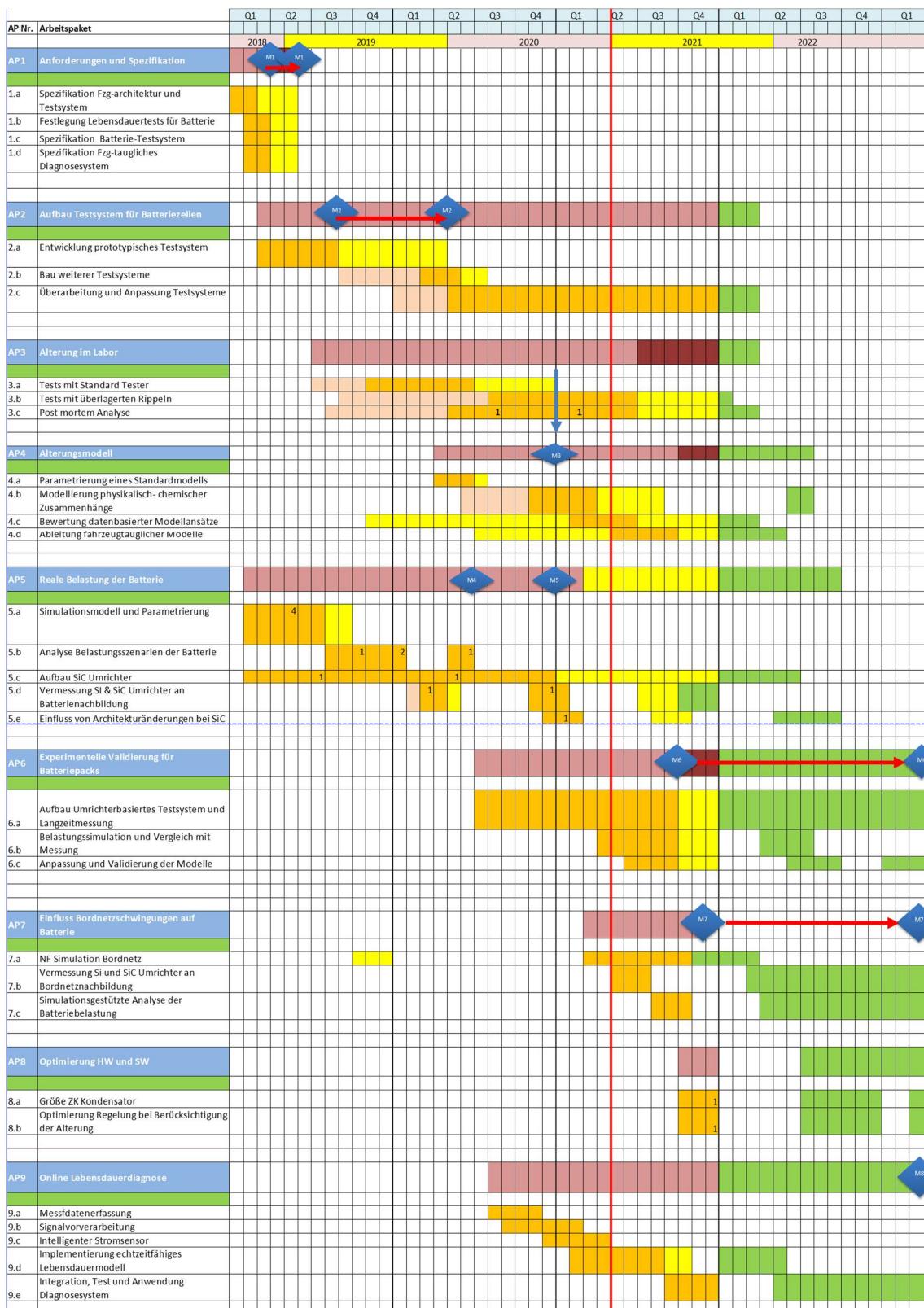


Abb. 11: Arbeits- und Meilensteinplan für das Gesamtprojekt inklusive Verlängerung

Personaleinsatz:

Für die Arbeiten im Projekt wurden bei der MBAG insgesamt 23 PM anstelle von 29 PM eingesetzt. Die wesentlichen Abweichungen betreffen AP1, wo wegen des guten Datenbestands zu laufenden Baureihen sehr schnell die Anforderungen konkretisiert werden konnten, und AP7, wo durch Synergien bei den Messkampagnen eine gleichzeitige Messung für AP5 und AP7 möglich war, so dass weniger Arbeitszeit im Labor benötigt wurde.

Sachkosten:

Bei den Sachmitteln wurden ebenfalls weniger Kosten geltend gemacht. Begründen lässt sich dies durch die Auswahl der Batteriezellen, die aus einem Serienprojekt entnommen werden konnten und durch die Bereitstellung der Materialien für die Umrichter und Bordnetzkomponenten aus einem internen Projekt, so dass hierfür keine Kosten abgerechnet wurden. Die Reisekosten sind durch Corona deutlich unter dem Plan geblieben, da viele Besprechungen online durchgeführt wurden.

Die detaillierten Daten sind dem Verwendungsnachweis zu entnehmen.

3. Zielerreichung

Vergleich der erreichten Ergebnisse mit der ursprünglichen Zielstellung

In dem Projekt sollten die Auswirkungen von schnell schaltenden SiC Leistungshalbleitern auf die Lebensdauer der Fahrzeugbatterie untersucht werden. Zu Beginn des Projektes war nicht bekannt, welche Auswirkungen hohe Schaltfrequenzen auf die Lebensdauer der Traktionsbatterien haben. Die geplanten Arbeiten konnten erfolgreich durchgeführt und die gestellten Fragen konnten allesamt beantwortet werden.

Diese Fragestellungen sollen durch Lebensdauertests an Lithium-Ionen-Zellen im Labor untersucht werden, wobei verschiedene Parameter wie Schaltfrequenz, Amplitude und weitere gezielt variiert werden.

Parallel zu den synthetischen Tests sollen die tatsächlich vorkommenden Rippel an einem SiC Umrichter vermessen werden, um dann im weiteren Verlauf des Projektes reale Tests an einem Umrichter durchzuführen.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Alterungstests soll ein Simulationsmodell entstehen, das diese Einflüsse abbildet

und mit dem es schließlich möglich wird, Handlungs- und Designempfehlungen für Umrichter auf SiC-Basis zu erstellen

beziehungsweise die Alterung der Batterie bei der Auslegung des HV Bordnetzes in Elektrofahrzeugen besser zu berücksichtigen.

Ergebnisse und Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens, die während der Durchführung von dritter Seite bekannt geworden sind

Während der Laufzeit des Projektes wurde eine zunehmende Anzahl von Fahrzeugen mit 800V Antrieben angekündigt, die wegen der Ermöglichung kürzerer Ladezeiten, höherer Fahrleistungen und Gewichtseinsparungen im HV System steigendes Interesse finden. In diesem Zusammenhang wird auch ein wachsender Einsatz von SiC berichtet [3].

Noch in diesem Jahr möchte Mercedes mit der Errichtung eines globalen High-Power Charing Netzwerks beginnen, mit dem Fokus auf Nordamerika, Europa und hina. Bis 20230 sollen über 10.000 Ladepunkte installiert werden [4].

Die Schweizer Firma „Designwerk“ hat eine spezielle Ladestation für LKW vorgestellt, die bereits mit dem neuen Ladestandard MCS (Megawatt Charging System) arbeitet. Sie ist mit einem Pufferspeicher von 1800 MWh ausgestattet, der aus second life Batterien besteht [4].

Für all diese Anwendungen sind die Ergebnisse aus SiCWell relevant.

4. Literaturverzeichnis

- [1] ISO 21498 „Elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge- Elektrische Prüfungen für Komponenten der Spannungsklasse B“ (2018 - 08)
- [2] <https://www.auto-motor-und-sport.de/elektroauto/mercedes-eqs-reichweiten-rekord-elektroautos-edmunds-usa/> (23.03.2023)
- [3] Marcus Zacher
„Volt ihr mehr?“ electro auto mobil 01/2019, S. 61-65
- [4] Elektro Auto Mobil 01 (2023) S. 26