



Finanziert von der  
Europäischen Union  
NextGenerationEU

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Schlussbericht

- öffentlich einsehbar -

**SkalTABS** - Skalierbares Thermomanagement und Antriebsstrang für Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge

**Teilvorhaben:** Kompaktes WBG-Leistungsteil für BZ-Kompressor

Wenn zur Wahrung berechtigter Interessen des Zuwendungsempfängers (ZE) oder Dritter oder aus anderen sachlichen Gesichtspunkten bestimmte Einzelheiten aus dem Bericht vertraulich zu behandeln sind (z. B. Wahrung der Priorität bei Schutzrechtsanmeldungen), so hat der ZE den Zuwendungsgeber (ZG) ausdrücklich darauf hinzuweisen.

Zuwendungsempfänger: Siemens AG, FT RPD ICE ELI-DE Otto-Hahn-Ring 6, 81739 München	Förderkennzeichen: 19I21037B
Kontakt Teilvorhaben: Dr. Kai Kriegel	Tel.: +49 174 1512613 E-Mail: kai.kriegel@siemens.com
Laufzeit des Vorhabens: von: 01.08.2021                      bis: 31.10.2024	
Datum Bericht: 06.03.2025	

## Inhalt

1.	Kurzdarstellung.....	3
1.1.	Aufgabenstellung .....	3
1.2.	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	4
1.3.	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	5
1.4.	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde .....	6
	Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden.....	6
	Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste .....	6
1.5.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	6
2.	Eingehende Darstellung .....	7
2.1.	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele .....	7
2.2.	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	15
2.3.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	16
2.4.	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	16
2.5.	Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	16
2.6.	Erfolgte oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 11 der Nebenbestimmungen.....	16

## 1. Kurzdarstellung

Das Projektvorhaben SkalTABS adressierte skalierbare Powertrain- und Thermomanagement-Architekturen sowie zugehörige Hardware-Komponenten für zukünftige Antriebsstränge von Brennstoffzellen-Nutzfahrzeugen. Durch eine ganzheitliche Betrachtung der Fahrzeug-Energieflüsse und deren Optimierung sollten Systemarchitekturen mit einer hohen Gesamtenergieeffizienz erreicht und damit die Reichweite der Fahrzeuge erhöht werden.

Ein besonderer Fokus wurde hierbei auf eine skalierbare Gestaltung des Brennstoffzellen-Systems gelegt, um mit einem Komponenten-Baukasten ein möglichst breites Spektrum von Fahrzeugen abdecken zu können. Basierend auf dem Dialog mit repräsentativen Fahrzeugherstellern wurden hier relevante Use Cases und Einsatzprofile für Nutz- und Sonderfahrzeuganwendungen als Basis für die Arbeiten herangezogen.

Durch diesen skalierbaren Architekturansatz konnten die Projektergebnisse einen Beitrag leisten, um zukünftige Brennstoffzellen-Antriebsstränge kosteneffizient zu gestalten. Damit werden diese insbesondere auch zugänglich für kleinere Fahrzeughersteller, wie beispielsweise aus dem Bereich kommunaler Sonderfahrzeuge oder der internen Logistik. Es wurden auch Komponenten mit neuartigen GaN-Bauelementen mit angepasster Aufbau- und Verbindungstechnik realisiert und hinsichtlich Zuverlässigkeit untersucht.

### 1.1. Aufgabenstellung

Geänderte gesetzliche Rahmenbedingungen sowie steigendes Umweltbewusstsein erfordern auch für den Nutzfahrzeugbereich innovative, effiziente und umweltschonende Antriebskonzepte. Die aus den Use Cases abgeleiteten technischen Anforderungen an die Fahrzeuge unterscheiden sich grundlegend von klassischen Pkw-Anwendungen. Insbesondere die hohe täglich benötigte Reichweite oder Einsatzdauer, die hohe notwendige Verfügbarkeit, längere Fahrzeug- und damit Komponenten-Lebensdauern sind hier zu nennen. Gleichzeitig sind für eine Marktakzeptanz wettbewerbsfähige Total-Costs-of-Ownership (TCO) erforderlich.

Diese geänderten Randbedingungen führen dazu, dass das Thema der alternativen Antriebssysteme für Nutzfahrzeuge technologieoffener diskutiert und erforscht wird als bei Pkw, bei denen mittelfristig ein klarer Trend zu batterieelektrischen Lösungen absehbar ist. Das Laden führt selbst bei Schnellladekonzepten zu langen unproduktiven Stillstandzeiten des Fahrzeugs und erfordert entsprechende Ladeinfrastrukturen mit sehr hohen Anschlussleistungen, gerade entlang der Autobahnen.

Große Chancen insbesondere für den Langstrecken-Schwerlastverkehr aber auch im Bereich der Sonderfahrzeuge werden Brennstoffzellen-Nutzfahrzeugen eingeräumt. Sie vereinen die Vorteile der hohen Energiedichte des Energieträgers Wasserstoff mit einer lokalen Emissionsfreiheit der Fahrzeuge. Der Tankvorgang kann bei entsprechender Gestaltung der Speichersysteme sowie der Infrastruktur schnell durchgeführt werden. Neben den Forschungsgebieten der Wasserstofferzeugung, des -transports und der -bereitstellung erfordern wasserstoffbetriebene Nutzfahrzeuge grundlegend neue Systemarchitekturen und Komponenten im Vergleich zu dieselbetriebenen Fahrzeugen nach dem Stand der Technik.

Hier setzt das Projekt SkalTABS an, wo skalierbare Powertrain- und Thermomanagement-Architekturen sowie die zugehörigen Hardware-Komponenten für zukünftige Antriebsstränge von Brennstoffzellen-Nutzfahrzeugen erforscht und demonstriert werden. Ziel ist hier eine Erhöhung der

Reichweite und der Effizienz sowie die Senkung der TCOs von Nutzfahrzeugen mit Brennstoffzellenantrieb. Im Bereich des Antriebsstrangs sind hier gesamtenergetisch optimale Systemkonfigurationen zu vergleichen und zu bewerten und die Anforderungen an die skalierbaren Komponenten abzuleiten. Dies beispielsweise für die Brennstoffzelle selbst, den Antriebsstrang bestehend aus Motor und Umrichter, etwaige Stützbatterien sowie für alle Nebenaggregate. Für das Thermomanagement werden ganzheitliche Ansätze methodisch untersucht und bewertet und hieraus Kühlkonzepte und Komponentenspezifikationen abgeleitet. Ein besonderer Fokus wird hierbei auf das Thermomanagement der Brennstoffzelle selbst sowie auf die Nutzbarmachung der erzeugten Abwärme, beispielsweise für die Klimatisierung weiterer Komponenten oder der Fahrerkabine, gelegt.

Ein zentrales Alleinstellungsmerkmal des Projektes ist eine flexible und skalierbare Gestaltung des Brennstoffzellen-Antriebs sowie der zugehörigen Powertrain- und Thermomanagement-Komponenten. Die erarbeiteten Lösungen sollen somit ein möglichst breites Spektrum an Fahrzeugklassen abdecken wie z.B. Sonderfahrzeuge, Fahrzeuge für die innerbetriebliche Logistik oder den Transportverkehr.

Durch diesen skalierbaren Architekturansatz sollen die Projektergebnisse einen Beitrag leisten, um Brennstoffzellen-Antriebsstränge kosteneffizient zu gestalten und diese insbesondere auch zugänglich für kleinere Fahrzeughersteller zu machen. Somit sollen die Projektergebnisse dazu beitragen die Einstiegshürden für umweltschonende Antriebssysteme gerade für kleinere OEMs zu senken, da die initialen Entwicklungskosten für einen spezifischen Antriebsstrang für solche Firmen ansonsten finanziell kaum zu tragen sind.

Das Projekt SkalTABs adressiert unmittelbar die Schwerpunkte der Förderausschreibung „Neue Fahrzeug- und Systemtechnologien“ in der „innovative Ansätze und Strategien zum Antriebs-, Energie- und Thermomanagement“ sowie „Antriebsstränge in ihrer Gesamtheit oder deren Einzelkomponenten für Fahrzeuge des Personen- und Güterverkehrs sowohl auf der Straße als auch auf der Schiene“ direkt angesprochen werden. Die Ergebnisse können einen relevanten Beitrag zur Erarbeitung notwendiger Technologien, deren Verfügbarmachung, gerade für kleinere Fahrzeughersteller, sowie zur Vernetzung von Industriepartnern, inklusive KMU, und Forschung in diesem Zukunftsbereich beitragen.

## **1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Brennstoffzellenbetriebene Nutzfahrzeuge unterscheiden sich in ihren Anforderungen, Komponenten und Architekturen grundlegend von dieselbetriebenen Modellen nach Stand der Technik oder auch von batterieelektrischen Fahrzeugen. Die Erzeugung der elektrischen Energie für den Antriebsstrang des Fahrzeuges erfolgt durch Umwandlung von chemisch gespeicherter Energie aus Wasserstoff mit Sauerstoff in der Brennstoffzelle. Bei diesem Prozess erzeugen die Brennstoffzellen auch große Mengen thermische Energie die quantitativ in einer ähnlichen Größenordnung zur erzeugten elektrischen Energie liegen. Diese Wärme muss aus der Brennstoffzelle durch entsprechende Kühlvorrichtungen abgeführt werden, um eine Überhitzung zu vermeiden. Gleichzeitig wird thermische Energie zur Beheizung der Fahrerkabine oder zum schnellen Erreichen der optimalen Betriebstemperatur der Komponenten bei kalten Umgebungsbedingungen benötigt. Dieses Beispiel verdeutlicht bereits, dass Thermomanagement- und Powertrain-Architektur in einem Brennstoffzellen-Fahrzeug multiple und komplexe wechselseitige Abhängigkeiten aufweisen. Ein Systemoptimum kann nur durch eine ganzheitliche Betrachtung erzielt werden.

Ziel von SkalTABS war deshalb die Erforschung skalierbarer Thermomanagement- und Powertrain-Architekturen sowie der hierfür benötigten Komponenten, die durch ihre Flexibilität eine möglichst große Variantenzahl an Nutzfahrzeugen abdecken können.

Besonderer Fokus lag im Projekt daher auf der Anforderungsphase, bei der Use Cases und Spezifikationen von für Brennstoffzellen relevanten Nutzfahrzeugklassen gesammelt werden. Auf dieser Basis wurde ein Skalierungskonzept erarbeitet mit dem Ziel einer möglichst hohen Abdeckung der fahrzeugklassenübergreifenden Anforderungen. Technisch/wirtschaftliche Limitierungen des Skalierungsansatzes, z.B. aufgrund von unterschiedlichen Profilen oder Leistungsanforderungen, sollten identifiziert und mögliche Lösungsansätze diskutiert werden.

Die finalisierten fahrzeugübergreifenden Anforderungen waren sowohl der Input für die Erarbeitung der ganzheitlichen Powertrain- und Thermomanagement-Architektur als auch für die Erforschung und prototypische Realisierung von zugehörigen und skalierbaren Brennstoffzellen- und Powertrain-Komponenten.

Das Verbundprojekt SkalTABS adressierte die Erforschung der Thermomanagements von Brennstoffzellen-Nutzfahrzeugen und der dazu notwendigen optimierten Komponenten. Im Allgemeinen siedeln sich die heute bekannten Lösungen im Bereich niedriger TRL-Stufen an, typischerweise im Bereich der TRL-Stufe 1-2. Ziel von SkalTABS war eine anwendungsnahe Forschung und damit eine deutliche Erhöhung der TRL-Stufen.

Das Projekt deckte einen großen Teil der Wertschöpfungskette ab: Systemhersteller und Komponentenhersteller. Das industrielle Konsortium wurde durch hochkompetente Forschungseinrichtungen komplettiert.

### 1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Zur Durchführung der Arbeiten war das Projekt SkalTABS in insgesamt fünf Arbeitspakete (AP) untergliedert. In Arbeitspaket 1 wurden zu Projektbeginn Use Cases und Einsatzprofile von repräsentativen Fahrzeugklassen und Fahrzeugherstellern gesammelt, geclustert und übergreifende Spezifikationen abgeleitet.

Auf dieser Basis erfolgten in Arbeitspaket 2 die Erarbeitung und Ausdetaillierung von ganzheitlichen Architekturkonzepten unter Berücksichtigung von definierten Zielsetzungen wie ganzheitliches Effizienzmaximum für repräsentative Mission Profiles, Skalierbarkeit und eine Reduzierung des Komponentenaufwands.

Die Erarbeitung von skalierbaren und optimierten Komponenten für den Nutzfahrzeug-Powertrain fand in den Arbeitspaketen 3 und 4 statt. Arbeitspaket 3 bündelte hierbei die Aktivitäten um das Brennstoffzellensystem selbst unter Einbeziehung der adressierten Nebenaggregate, wie beispielsweise dem Luftverdichter und der Brennstoffzellen-Überwachungselektronik. Arbeitspaket 4 adressierte die weiteren Komponenten des elektrischen Nutzfahrzeug-Antriebsstrangs wie DC/DC-Wandler, Traktionsmotor inkl. Umrichterelektronik sowie das Batteriesystem zum Ausgleich von Lastspitzen. Auch Maßnahmen zur Erreichung der nutzfahrzeugspezifischen Lebensdauern, wie ein verbessertes Komponenten-Thermomanagement und optimierte Elektronik-Subkomponenten, wurden in diesem Arbeitspaket erforscht.

Test und Demonstration der Hardware-Komponenten sowie der Abgleich mit den Auslegungsdaten erfolgten in Arbeitspaket 5. Ziel bei der Demonstration im Rahmen des Projektes war eine

Einzelprüfung der erarbeiteten Prototypen auf Komponentenprüfständen. Im Anschluss erfolgte ein kombinierter Test von mehreren Komponenten auf (System-)Prüfständen, um das Verhalten im Verbund zu charakterisieren.

Für die Durchführung des Projektes wurde in einem Kick-Off-Meeting die Arbeitsweise im Projekt festgelegt. Wegen der Corona-Pandemie konnten über einen langen Zeitraum nur virtuell miteinander gearbeitet werden. Es wurden alle Meilensteine erfüllt. Nach leichten Verzögerungen im Projekt konnte das Projekt nach einer kostenneutralen Laufzeitverlängerung um drei Monate erfolgreich beendet werden.

#### **1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

Zusammenfassend grenzen sich die in SkalTABS durchgeführten Arbeiten wie folgt zum Stand der Technik ab und bieten einen klaren technischen Neuheitsgrad zu anderen Forschungsvorhaben:

- Skalierbares Brennstoffzellen- und Antriebssystem optimiert für ein breites Spektrum an Nutzfahrzeugen, Fokus hierbei von kommunalen Sonderfahrzeugen bis hin zum Transportverkehr
- Sammlung von Use Cases und Einsatzprofile von repräsentativen Brennstoffzellen-basierten Nutzfahrzeugklassen. Clusterung und Ableitung übergreifender Spezifikationen als Basis für das Skalierungskonzept
- Ganzheitlich systemische Architekturoptimierung des elektrischen Bordnetzes und des Thermomanagementkonzepts für Brennstoffzellen-basierte Nutzfahrzeuge. Ziel war hier höchste Energieeffizienz und Komponentenaufwand
- Ableitung praxisrelevanter Komponenten-Spezifikationen für den zukünftigen Anwendungsfall Brennstoffzellen-Nutzfahrzeug
- Erforschung und prototypische Realisierung von Nutzfahrzeug-spezifischen Komponenten für das Brennstoffzellensystem und den Antriebsstrang
- Experimentelle Charakterisierung und Demonstration des skalierbaren NFZ-Antriebsstrangs am Prüfstand

#### **Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden**

Nicht zutreffend

#### **Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste**

Diverse Fachliteratur

#### **1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Keine

## 2. Eingehende Darstellung

### 2.1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Tabelle 1: Verwendung Teilvorhaben

Geplantes Ergebnis	Erzieltes Ergebnis
Auswahl Bauelemente und Topologie	GaN Bauelemente und 3-Level-Topologie
AVT mit GaN Bare Dies	Planare AVT mit GaN Bare Dies
Aufbau für Umrichter	Aufbau realisiert
Verlustabschätzung	Auslegung entsprechend Verlustabschätzung
Lebensdauerprüfung	Prüfmethoden für GaN-Leistungshalbleiter

#### 1. Niederinduktive planare Aufbau- und Verbindungstechnik von GaN Leistungsschaltern

Der BZ-Kompressor ist eine zentrale Komponente im Brennstoffzellen-System. Die erforderliche Leistung des Kompressors ist direkt abhängig von der Leistung der Brennstoffzelle und damit auch von der Gesamtleistung. Für den BZ-Kompressor muss das Leistungsteil eine spezifizierte Leistung mit gleichzeitig hoher Wechsellast erbringen. Eine besondere Herausforderung ist die hohe Schaltfrequenz, um die hohen Drehzahlen des Kompressors zu ermöglichen. Die Topologie des Leistungsteils wird bestimmt durch die Spannungslage im Gesamtsystem, da die vorgesehenen GAN-Bauelemente hinsichtlich ihrer Nennspannungen begrenzt sind. Es wurde eine 3-Level-NPC-Topologie ausgewählt. Dabei wurden verschiedene Use-Cases betrachtet und die Leistungsanforderungen für den BZ-Kompressor errechnet. Der Aufbau des planaren Leistungsmoduls wurde mit dem Projektpartner Fraunhofer-Institut IISB abgestimmt.

Im Förderprojekt Skaltabs wird ein neuartiges Leistungsmodul in 3-Level-NPC-Topologie aufgebaut. Als Halbleiterchips kommen dabei GaN-Chips zum Einsatz. In der Aufbau- und Verbindungstechnik wird ein planarer Aufbau umgesetzt, bei dem keine Drahtbondverbindung verwendet wird, sondern die Chipkontaktierung über eine galvanisch aufgebaute Kupferschicht erfolgt, die im Gegensatz zur Standardtechnologie eine geringere Induktivität aufweist (Abb .1).

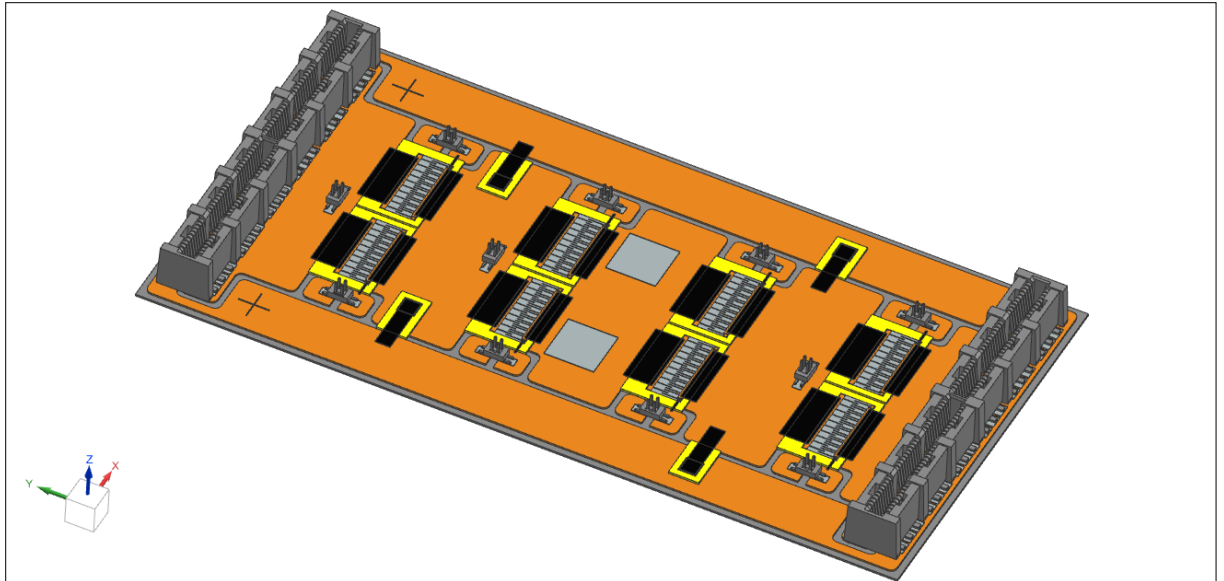
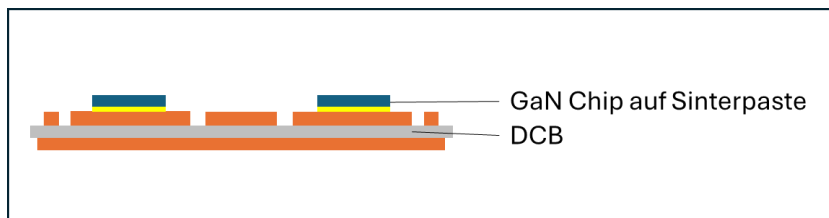


Abb. 1: 3D-Entwurf Leistungsmodul

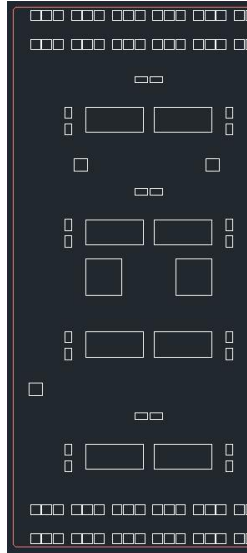
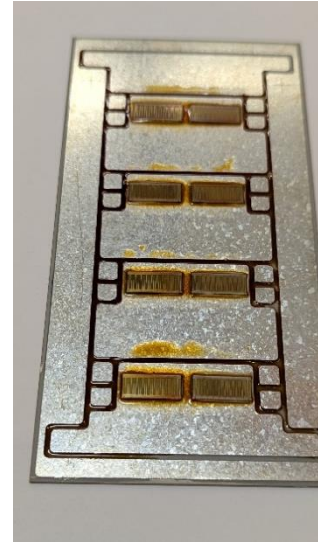
Als Basis für den Aufbau wird eine  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -DCB (versilbert) verwendet, die in einem ersten Aufbauschritt das Aufsintern der GaN-Bauteile ermöglicht. Die Sinterpaste wird mittels Schablonendruck aufgebracht und die Halbleiterelemente über einen Bestückautomat an die vorgesehene Position gebracht. Der eigentliche Sinterprozess führt dann zu einer dauerhaften elektrisch leitfähigen Verbindung zwischen Halbleiter und Substrat (Abb. 2).



1. Aufsintern der Halbleiterbauteile

Abb. 2: Prinzipskizze Aufbau Leistungselektronik (1)

Die folgenden Abbildungen 3a bis 3c zeigen die verwendeten Substrate, das Layout für die Schablone, um die Sinterpaste aufzubringen und das fertig bestückte Substrat.

Abb. 3a: Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> SubstratAbb. 3b: Schablone  
f.  
SinterpastendruckAbb. 3c: Substrat mit  
gesinterten Chips +  
Kantenisolation

Nun folgt die Isolation (Abb. 4). In einem ersten Schritt erfolgt die Kantenisolation der Halbleiterchips mit einem Unterfillmaterial, das handisch um die Chipkanten appliziert wird. Um später die Chipverbindung realisieren zu können, wird ein zweites Isolationsmaterial großflächig aufgebracht und die „Gräben“ im Substrat aufgefüllt.

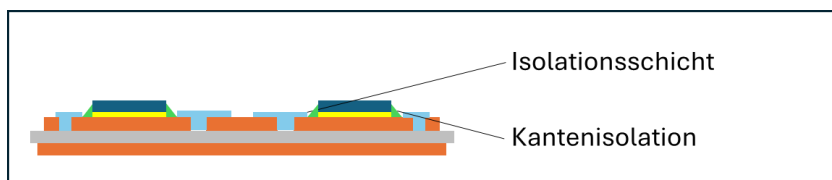
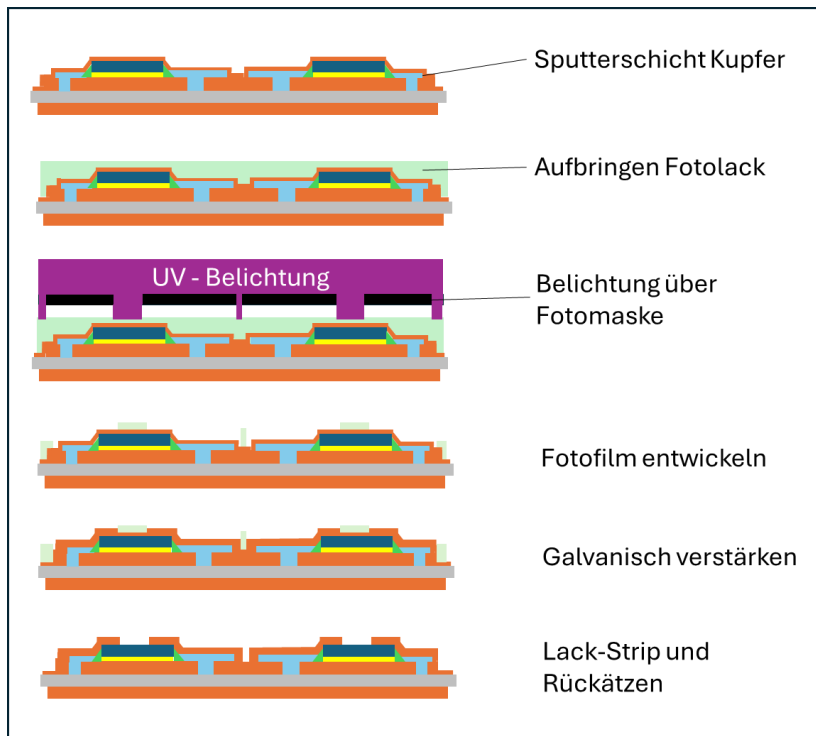


Abb. 4: Prinzipskizze Aufbau Leistungselektronik (2)

**2. Kantenisolation und  
Aufbringen der  
Isolationsschicht**

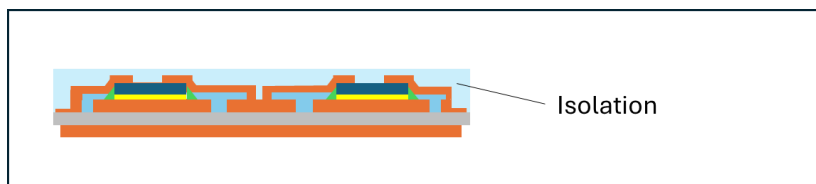
Im nächsten Schritt wird die Verdrahtungsebene aufgebaut (Abb. 5). Mittels PVD-Prozesses wird vollflächig eine sehr dünne Kupferschicht aufgesputtert. Auf diese ein fotoempfindlicher Film aufgebracht, der über eine entsprechende Fotomaske belichtet und entwickelt wird. An den „freientwickelten“ Stellen wird das vorher aufgesputterte Kupfer nun galvanisch aufgedickt, um später im Betrieb die Stromtragfähigkeit des Leistungsmoduls gewährleisten zu können. Durch Rückätzen wird entsprechend überschüssiges Kupfer vom initialen „Seedlayer“ entfernt.



**3. Verdrahtung erzeugen mittels Sputtern, Fotochemie und Galvanik**

Abb. 5: Prinzipskizze Aufbau Leistungselektronik (3)

Im letzten Arbeitsschritt wird über das gesamte Substrat eine Isolationsfolie laminiert (Abb. 6). Um eine weitere Bestückung des Substrates bspw. mit passiven Bauteilen und die Ankontaktierung der Lastanschlüsse gewährleisten zu können, wird diese Isolationsfolie an den entsprechenden Stellen durch einen Laser wieder entfernt.



**4. Auflaminieren und Strukturieren einer Isolationsfolie**

Abb. 6: Prinzipskizze Aufbau Leistungselektronik (3)

Im Rahmen des Projektes konnte ein Leistungsmodul nach o.g. Technologie aufgebaut werden (Abb. 7).

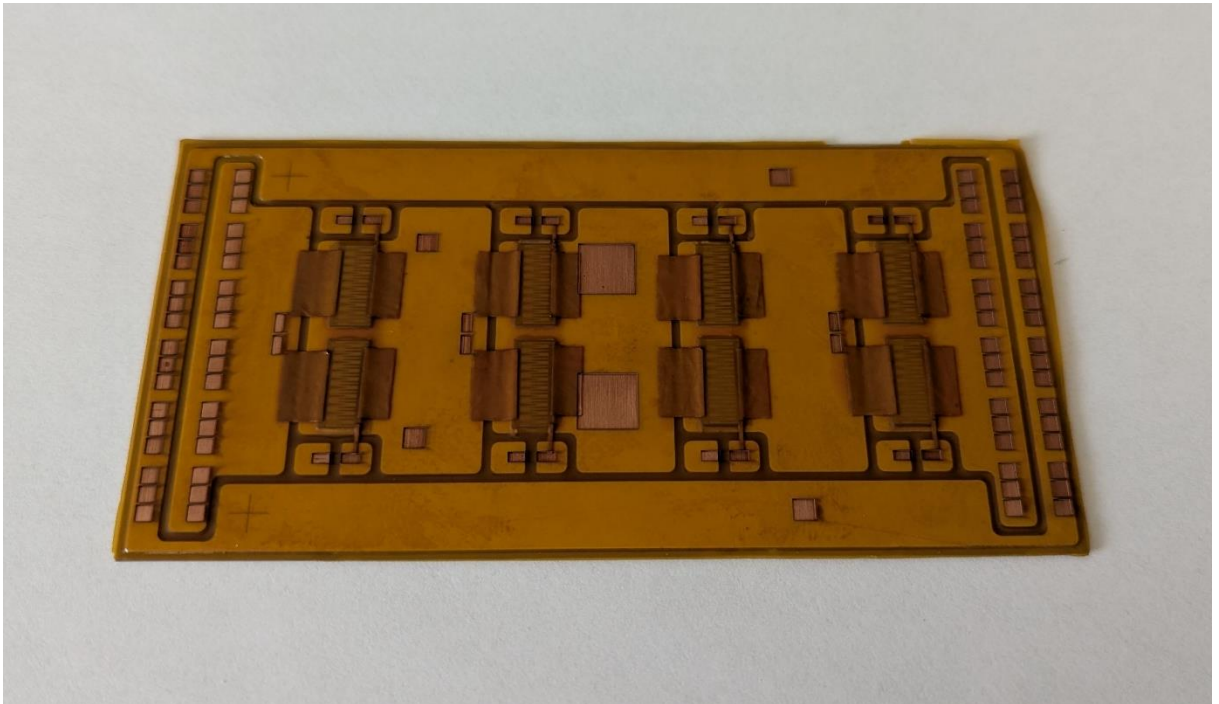


Abb. 7: Aufbau Leistungsmodul

## 2. HTRB und HTGB-Prüfung von GaN-Leistungsbaueteilen

Die Drift elektrischer Kenngrößen von GaN-Bauteilen stellt für den zuverlässigen Betrieb von GaN-Bauteilen ein Problem dar. Erhöhte Schwellspannungen  $V_{th}$  und Leckströme können zu Fehlfunktionen von Leistungselektroniken führen. Zur Überprüfung der diesbezüglichen Zuverlässigkeit wurden daher auf GaN angepasste Tests anlehnt an die AQG324 durchgeführt. Der übliche „High Temperature Reverse Bias“ (HTRB)-Test umfasst eine hohe Sperrspannung, typischerweise 80 % der Nennspannung, und eine hohe Temperatur, typischerweise die maximal zulässige Betriebstemperatur. Beide Faktoren sollen eine potenzielle Degradation beschleunigen und scheinen auch für WBG-Halbleiter gültig zu sein. Aufgrund der Wechselwirkung zwischen Gate-Region und Drift-Region in GaN-HEMTs wurde der modifizierte HTRB jedoch zusätzlich zu  $U_G=0$  V mit negativer Gatespannung durchgeführt. Aufgrund der zusätzlichen Degradation, die durch Schaltvorgänge auftreten könnte, z.B. das Trappen von Ladungsträgern in der Gateregion und insbesondere die Auswirkungen des piezoelektrischen Effekts in GaN-Bauelementen, wurde die Drain-Source-Spannung periodisch geschaltet. Dies bildet den Stress für den Schalter in einer Halbbrücke nach. Um die Dauer der Drain-Source-Spannungsbelastung groß zu halten, wurden nur sehr kurze Perioden ohne Spannung gewählt. Ein Schaltzyklus im Test war daher 9,9 ms mit angelegter Drain-Source-Spannung und 0,1 ms ohne Spannung.

In GaN-Bauelementen ist das Trappen von Ladungsträgern ein Hauptmechanismus der Degradation. Es gibt mehrere Wege, Ladungsträger zu trappen. Einer davon ist mechanischer Stress aufgrund thermomechanischer Effekte (Lastwechsel) oder anderer direkt angewandter Kräfte. Ein weiterer Weg ist das elektrische Feld, das durch den piezoelektrischen Effekt zu mechanischem Stress führt. Hochenergetische Elektronen können Schäden im Kristall verursachen, wo dauerhaft Ladungsträger getrappt werden. Durch die piezoelektrischen Eigenschaften von GaN kommt es insbesondere an den Rändern vom Gate zu hohen mechanischen Wechsellspannungen induziert durch periodische lokale elektrische Spannungsänderungen. Diese Effekte, die die Zuverlässigkeit von GaN-Bauelementen beeinflussen können, wurden mit einem modifizierten HTRB-Test und dem HTGB-Test (High Temperature Gate Bias) untersucht. Die Abb. 8 zeigt den Verlauf der Prüfspannung  $U_{DS}$  im modifizierten HTRB-Test.

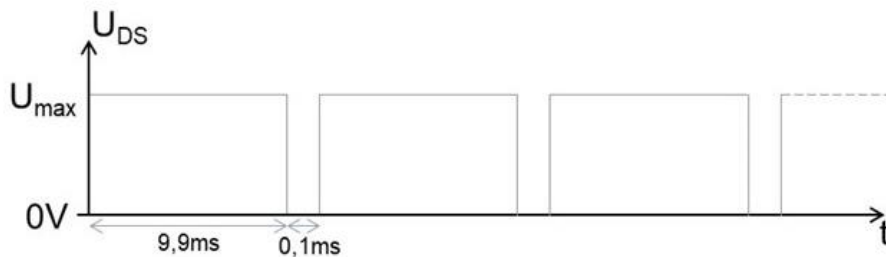


Abb. 8 Schematische Darstellung zum Trappen von Ladungsträgern und piezoelektrischen Stress nahe dem Gate (a). Getaktete Prüfspannung  $U_{DS}$  im modifizierten HTRB-Test (b).

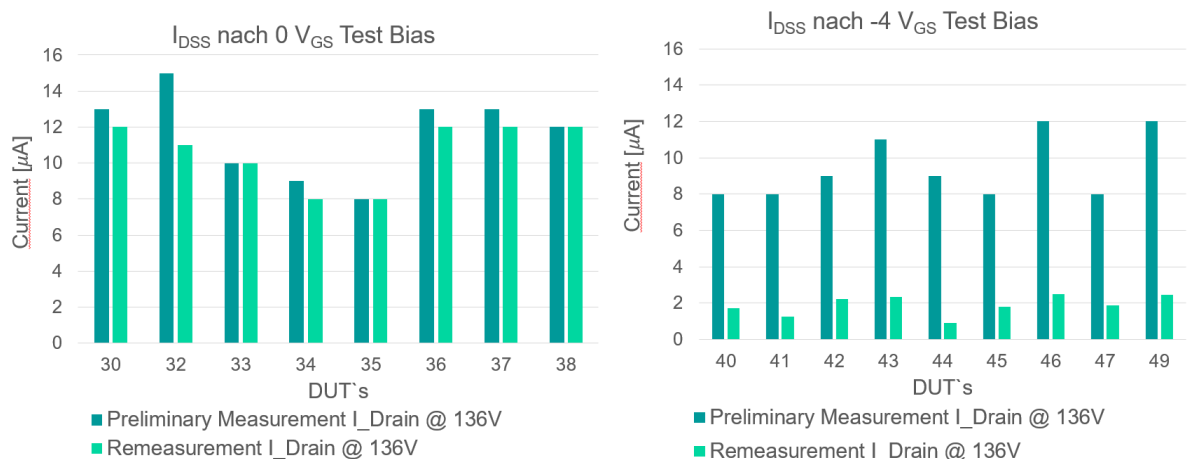


Abb. 9 Drain-Source-Leckstroms vor und nach dem gepulsten HTRB-Test für unterschiedliche Gate-Testspannungen 0V und -4V.

Der modifizierte HTRB-Test wurde 1000h an Bauteilen der Firma EPC durchgeführt. Vor und nach Prüfung wurden relevante elektrische Parameter wie u.a. Drain-Source-Leckströme  $I_{DSS}$ , Schwellspannung  $U_{Th}$ , Drain-Source-Widerstand  $R_{DS(on)}$  gemessen. Die Abb. 9 zeigt den Vergleich des Drain-Source-Leckstroms vor und nach der Prüfung für unterschiedliche Gate-Testspannungen 0V

und -4V. Bei einer Gatespannung von -4V kommt es zu einem signifikanten Trapping von Ladungsträgern nahe dem Gate, welche den Leckstrom deutlich reduzieren.

Die durchgeführten gepulsten HTRB- und HTGB-Tests an EPC-Bauteilen zeigen durchgehend starke Änderungen der elektrischen Bauteilparameter. Es wurden keine Bauteilausfälle registriert die ursächlich auf piezoelektrischen Stress zurückzuführen sind. Die piezoelektrischen Dehnungen durch die lokalen elektrischen Spannungen sind deutlich kleiner als die thermomechanischen Spannungen und räumlich auf kleine Bereiche beschränkt.

### **3. Lastwechselprüfung von GaN-Leistungsbauteilen**

Zur Ermittlung der Zuverlässigkeit wurden Lastwechselprüfungen an GaN Bauteilen durchgeführt.

Der Lastwechselversuch ist ein beschleunigter Lebensdauertest, der die thermomechanische Alterung der Leistungsbauteile im Betrieb nachstellt. Die Alterung, die im Betrieb kontinuierlich über einen Zeitraum von typisch 20 bis 30 Jahre erfolgt, wird dabei durch geänderte elektrische und thermische Lasten auf eine Dauer von wenigen Wochen reduziert.

Es wurde ein Messplatz zur Lastwechselprüfung von GaN-Bauteilen aufgebaut. Dabei wurde die Zth-Messtechnik für GaN-Bauteile mit Hilfe des temperaturabhängigen  $R_{DS(on)}$  realisiert. Hierzu wurde schnelle längsgerichtete Messstromquellen mit Messströmen bis 20 A aufgebaut. Über den temperaturabhängigen  $R_{DS(on)}$  konnte die Bauteiltemperatur im Abkühlvorgang wenige Millisekunden nach Abschalten des Laststromes gemessen werden. Hierzu wurden die Bauteile vor Lastwechselprüfung mit einem externen Thermostaten kalibriert. Die Kalibrierung wurde bis 150°C auf einer Heizplatte durchgeführt, da der Zusammenhang zwischen  $U_{DS}$  und Temperatur bei konstanten Messstrom leicht nichtlinear ist.

Im Vordergrund steht neben der Lebensdauerermittlung die elektrische Drift der GaN-Bauteile unter Last. Wichtige elektrische Parameter wie z.B.  $U_{DS}$  müssen sowohl im warmen als auch im kalten Zustand während des Lastwechselversuchs takt synchron gemessen werden was hohe Anforderungen an das Messequipment stellt. Durch den Einsatz neuer sehr schnell regelnder Laststromquellen konnte die temperaturabhängige Durchlassspannung bereits 3-10ms nach dem Schaltvorgang stabil gemessen werden. Das Bauteil befindet sich dabei hinreichend im kalten Zustand, so dass Temperatureinflüsse weitestgehend auszuschließen sind.

Beim Lastwechselversuch wurden sowohl die Änderungen der thermischen Impedanzen als auch der elektrischen Parameter ( $U_{DS}$ ) erfasst. Als Ausfallkriterium wurde ein Anstieg der Durchlassspannung  $\Delta U_{DS} > 5\%$  als Warm- bzw. Kaltmessung festgelegt.

Um selektiv die chipnahen Aufbau- und Verbindungskomponenten zu ermüden, wurden kurze On- und Off-Zeiten von jeweils 3 Sekunden ausgewählt. Folgende elektrische und thermische Parameter wurden für die Prüfungen gewählt:

Laststrom: 80A bis 100A,  $t_{on} = 3s$ ,  $t_{off} = 3s$

Messstrom: 50mA

Temperaturen:  $T_{jmax}=150^{\circ}C$ , Startbedingung  $\Delta T = 110K$

Thermische Vermessung: Periodische  $Z_{th}$ -Messung alle 2000 Lastzyklen

Lastwechselprüfungen wurden an GaN-Bauteilen von GaN-Systemen GS66516T durchgeführt. Aus den Verläufen der Durchlassspannung und der Änderung der Abkühlkurven lassen sich Rückschlüsse auf die Ausfallursache ziehen.

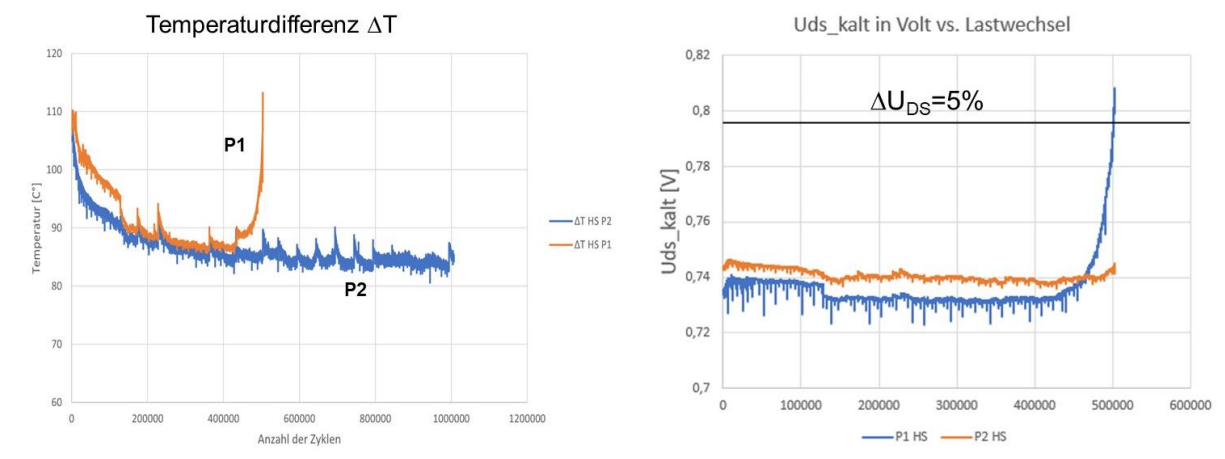


Abb. 10 Verlauf der Durchlassspannung  $U_{DS}$  von GaN-Systemen Bauteilen in der Lastwechselprüfung

Die Abb. 10 zeigt den Verlauf des Temperaturhubes  $\Delta T$  und der Änderung der Durchlassspannung  $U_{DS}$  in Prozent. Das Ausfallkriterium  $\Delta U_{DS} = 5\%$  wird nach 490.000 Zyklen erreicht. Dabei steigen die Durchlassspannung und der Temperaturhub stark an. Die Ausfallursache ist die elektrische Delamination im Strompfad von Drain bzw. Source. Es kommt eine Ermüdung der Drain und Source-Kontakte durch thermo-mechanischen Stress in Betracht. Der beobachtete Temperaturanstieg ist damit nur auf die erhöhten elektrischen Verluste wegen elektrischer Delaminationen zurückzuführen. Die Kalibrierkennlinie wurde während des Lastwechselversuch wiederholt gemessen, um den Einfluss der elektrischen Drift der GaN-Bauteile unter Last auszuschließen. Es zeigt sich für die untersuchten GaN-Systemen Bauteile GS66516T keine Drift der Kalibrierkennlinie. Zusätzlich zu GaN-Systemen wurden Bauteile der Firma EPC (EPC-2305) im Lastwechselversuch getestet. Die Lastwechsellparameter waren analog  $\Delta T=110K$  und  $T_{jmax}=150^{\circ}C$  mit kurzen On-/Off-Zyklen von jeweils 3 Sekunden. Die Bauteile zeigen nach elektrischer Belastung eine ausgeprägte Drift der elektrischen Kenngrößen. Abb. 11 zeigt die Kalibrierkurve nach unterschiedlichen

Lastzyklen. Anders als bei GaN-Systemen ist die Kalibrierkurve der Temperatur nicht dauerhaft identisch was zu einer Verfälschung der gemessenen Temperaturen führt. Die Abb. 12 zeigt den Verlauf der Durchlassspannung  $U_{DS}$  als Kaltmessung. Das Ausfallkriterium  $\Delta U_{DS} = 5\%$  wird bereits nach ca. 25.000 Zyklen erreicht. Ausfallursache ist eine Delamination der Source-Lötung des Bauteils auf der Leiterplatte.

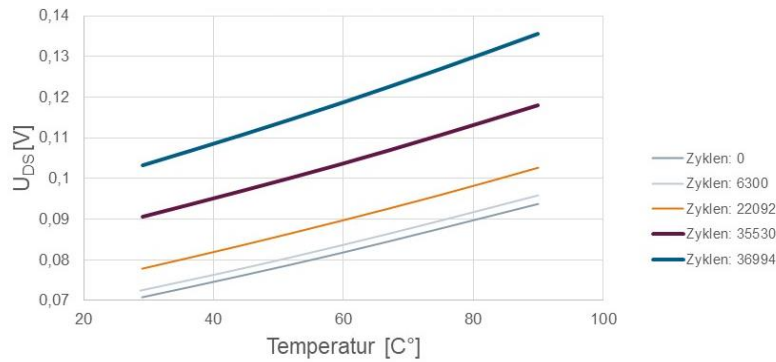


Abb. 11 Abhängigkeit der Kalibrierkennlinie zwischen  $U_{DS}$  und Temperatur von den Lastzyklen

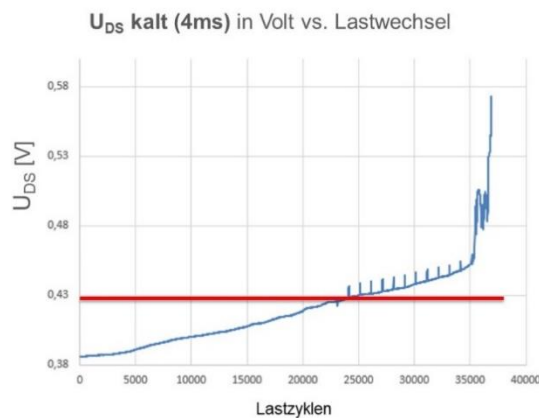


Abb. 12 Verlauf der Durchlassspannung  $U_{DS}$  von EPC2305 in Abhängigkeit der Lastzyklen

## 2.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Entsprechend des von Siemens erstellten zahlenmäßigen Verwendungsnachweises stellen die Personalkosten die größte Kostenposition dar.

Die Personalkosten waren aufgrund von Inflation ~6% höher als ursprünglich kalkuliert.

Die Materialaufwendungen waren weitgehend wie geplant.

Abweichend zur ursprünglichen Planung fielen die Reisekosten rund 70% geringer aus als geplant.

Aufgrund der Corona-Pandemie und der dadurch veränderten Arbeitsweise fand ein großer Teil der Arbeitstreffen hybrid bzw. virtuell statt, was zu reduzierten Reisekosten führte.

### 2.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Es wurde intensiv an der Aufbau- und Verbindungstechnik für die GaN-Bare Dies geforscht. Für den hochdrehenden Kompressor und die vorgesehene Zwischenkreisspannung musste ein Aufbau entworfen für eine hohe Schaltfrequenz realisiert werden. Die Notwendigkeit ergibt sich aus dem hohen wirtschaftlichen Risiko, das mit den Vorhaben verbunden war. Es resultiert insbesondere aus der Komplexität und Neuheit der Forschungsarbeiten zur Schaltungstopologie und den GaN Bare Dies und die angepasste Aufbau- und Verbindungstechnik. Die Arbeiten wurden weitgehend entsprechend der Planung durchgeführt.

### 2.4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Table 2: Verwertung Teilvorhaben

Projektergebnis/ Inhalt	Nutzen/ Verwertung
GaN Schaltungstopologie für hohe ZK-Spannungen	Interne Weiterverwertung bei Siemens
Zuverlässige niederinduktive AVT-Konzepte	Interne Weiterverwertung bei Siemens
Präzision der Aufbau- und Verbindungstechnik für GaN Bare Dies	Interne Weiterverwertung bei Siemens
Angepasste Prüfverfahren für GaN-Leistungsschalter	Interne Weiterverwertung bei Siemens

### 2.5. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es sind keine FE-Ergebnisse Dritter bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant wären.

### 2.6. Erfolgte oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 11 der Nebenbestimmungen

Es sind keine Veröffentlichungen seitens Siemens AG erfolgt.

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN -	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel <b>SkalTABs - Skalierbares Thermomanagement und Antriebsstrang für Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge</b> Teilvorhaben: Kompaktes WBG-Leistungsteil für BZ-Kompressor	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Dr. Kai Kriegel Dr. Gerhard Mitic	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.10.2024 6. Veröffentlichungsdatum 06.03.2025 7. Form der Publikation Schlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Siemens AG FT RPD ICE ELI-DE Otto-Hahn-Ring 6 81739 München	9. Ber. Nr. Durchführende Institution - 10. Förderkennzeichen 19I21037B 11. Seitenzahl 16
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. Literaturangaben - 14. Tabellen 2 15. Abbildungen 12
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Das Projekt SkalTABs entwickelte skalierbare Powertrain- und Thermomanagement-Architekturen sowie Hardware-Komponenten für Brennstoffzellen-Nutzfahrzeuge. Ziel war es, durch Optimierung der Fahrzeug-Energieflüsse eine hohe Gesamtenergieeffizienz und damit eine größere Reichweite zu erreichen. Ein Fokus lag auf der skalierbaren Gestaltung des Brennstoffzellen-Systems, um ein breites Spektrum von Fahrzeugen abzudecken. Relevante Use Cases und Einsatzprofile wurden in Zusammenarbeit mit Fahrzeugherstellern erarbeitet. Die Ergebnisse tragen dazu bei, kosteneffiziente Brennstoffzellen-Antriebsstränge zu entwickeln, die auch für kleinere Hersteller zugänglich sind. Zudem wurden Komponenten mit neuartigen GaN-Bauelementen hinsichtlich Zuverlässigkeit untersucht.	
19. Schlagwörter GaN, Lebensdauer, Zuverlässigkeit, Leistungselektronik, Kompressor	
20. Verlag	21. Preis

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN -	2. type of document (e.g. report, publication) report
3. title SkalTABs - Scalable Thermal Management and Powertrain for Fuel Cell Commercial Vehicles Subproject: Compact WBG Power Module for FC Compressor	
4. author(s) (family name, first name(s)) Dr. Kai Kriegel Dr. Gerhard Mitic	5. end of project 31/10/2024
	6. publication date 06/03/2025
	7. form of publication report
8. performing organization(s) (name, address) Siemens AG FT RPD ICE ELI-DE Otto-Hahn-Ring 6 81739 München	9. originator's report no. -
	10. reference no. 19I21037B
	11. no. of pages 16
12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. no. of references -
	14. no. of tables 2
	15. no. of figures 12
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract The SkalTABs project developed scalable powertrain and thermal management architectures as well as hardware components for fuel cell commercial vehicles. The goal was to achieve high overall energy efficiency and thus greater range by optimizing vehicle energy flows. A focus was placed on the scalable design of the fuel cell system to cover a wide range of vehicles. Relevant use cases and application profiles were developed in collaboration with vehicle manufacturers. The results contribute to the development of cost-efficient fuel cell powertrains, making them accessible to smaller manufacturers as well. Additionally, components with novel GaN devices were developed and examined for reliability.	
19. keywords GaN, lifetime, reliability, power electronics, compressor	
20. publisher	21. price