



Schlussbericht **GreenGridGuard** -

Teilvorhaben: Erforschung Leistungshalbleiter für Schutzfunktion inkl. Erprobung am Demonstrator

Autoren: U. Kellner-Werdehausen, Z. Zhi, S. Sommer, M. Stelte,
D. Markus, E. Neisemeier

Zuwendungsempfänger: Infineon Technologies Bipolar GmbH & Co. KG	Förderkennzeichen: 03EI4061A
Vorhabenbezeichnung: Innovatives Schutzkonzept auf Halbleiterbasis für selbstgeführte IGBT-basierte Stromrichter zur Netzanbindung von regenerativen Energien	
Laufzeit des Vorhabens / Berichtszeitraum: 01.01.2023 bis 31.12.2024	

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Inhalt

1	Kurzdarstellung	2
1.1	Aufgabenstellung	2
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	3
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	4
1.4	Stand der Technik, an den angeknüpft wurde	6
1.5	Zusammenarbeit im Projekt und mit anderen Stellen	9
2	Eingehende Darstellung	10
2.1	Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse	10
2.1.1	Projektziele	10
2.1.2	Projektablauf und Ergebnisse	11
2.1.3	Abgleich mit den Projektzielen	26
2.2	Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	26
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	27
2.4	Verwertbarkeit und Nutzen der Ergebnisse	27
2.5	Fortschritt auf dem Gebiet, während des Vorhabens bei anderen Stellen	28
2.6	Erfolgte Veröffentlichungen der Ergebnisse	29
3	Literaturverzeichnis und Verweise	30
4	Abbildungsverzeichnis	31



1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

In dezentralen Photovoltaik- oder Windkraftanlagen erfordert der Einsatz moderner IGBT-Module mit Siliziumkarbid (SiC) Dioden eine verbesserte Absicherung gegenüber Störfällen. Denn das Verteilnetz kann bei Belastung einen sehr hohen Kurzschlussstrom liefern, der zur Explosion und damit zum Totalausfall des Umrichters führen kann.

Ziel des Vorhabens GreenGridGuard war es daher, das Materialverhalten und die Schutzwirkung neuartiger Halbleiter und deren Integration in ein innovatives Konzept, bestehend aus Leistungsschaltern und Halbleitern zur Erzeugung eines definierten Kurzschlusses im Störfall, sowie der darauffolgenden Abschaltung des Wechselrichters, zu erforschen. Durch gezieltes Aufschmelzen eines Bereichs im Halbleiter soll eine Explosion des Gehäuses und der Austritt von leitfähigem Plasma verhindert werden. In Abbildung 1 ist das Schutzkonzept und deren Einbindung in den Wechselrichter grafisch dargestellt.

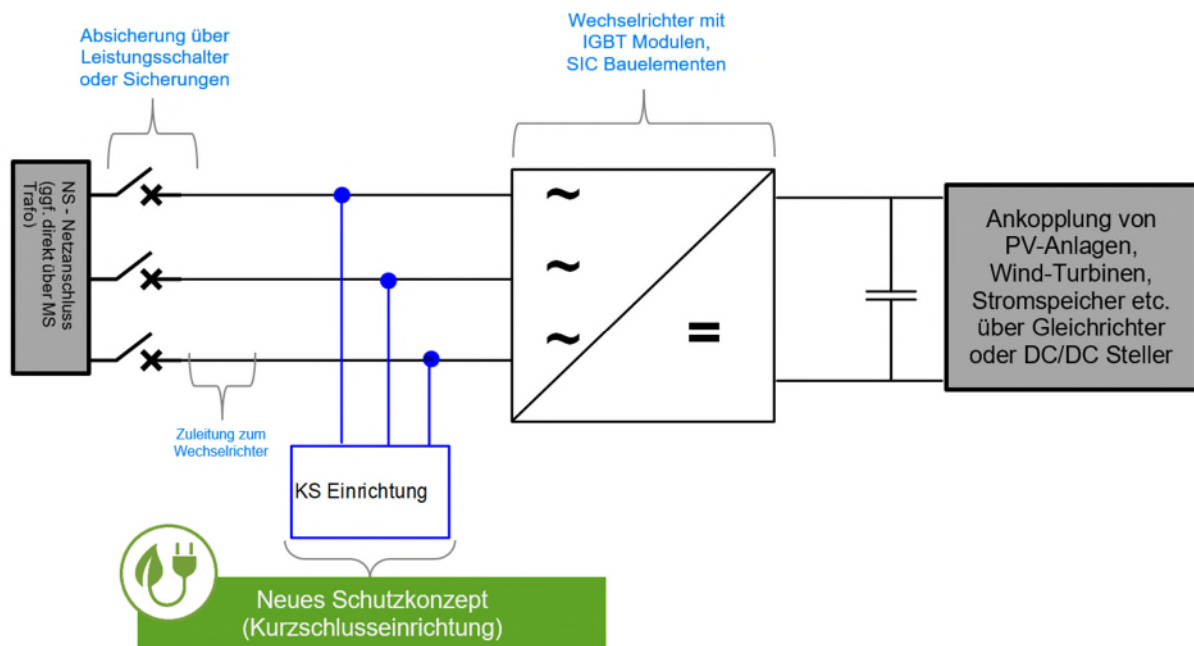


Abbildung 1: Grafische Darstellung des Schutzkonzepts

Die Hauptziele des Vorhabens sind nachfolgend aufgeführt und sollten insbesondere durch gezielte Änderungen am Design und den im Bauteil verwendeten Materialkombinationen erreicht werden:

1. Erforschung von halbleiterbasierten Materialien zur irreversiblen Erzeugung eines Kurzschlusses im 75mm Gehäuse
2. Erzeugung des Kurzschlusses innerhalb von $< 100\mu\text{s}$
3. Sicherstellen der Dauerhaftigkeit des Kurzschlusses während des Fehlerfalls – short-on-fail Garantie



4. Verhindern des Gehäusebruchs bei I^2t -Wert bis zu $225 \cdot 10^6 \text{ A}^2\text{s}$ und einer Maximalstromamplitude von $\leq 80 \text{ kA}$

Zur Lösung der Aufgabenstellung wurden die Einzelkompetenzen der Partner Infineon Bipolar GmbH, Technische Universität Dresden und Fraunhofer IMWS in einem gemeinsamen Konsortium gebündelt. Zur Erreichung der Projektziele sollten in zwei zeitlich aufeinander abfolgenden Iterationsstufen verschiedene Demonstrator-Designvarianten entwickelt, erprobt und bewertet werden. Hierfür waren für den Demonstrator 1 zwei unterschiedliche Chipaufbauten mit vergleichbarer aktiver Fläche für den Einsatz als Schutzbauteil oder auch Safety Device geplant:

1. ein Aufbau mit loser Auflage von kathoden- und anodenseitiger Kontaktscheibe
2. ein Aufbau mit anodenseitig fester Verbindung zwischen einer dicken Trägerscheibe und kathodenseitig lose aufliegender Kontaktscheiben.

Es galt das grundlegende Schutzkonzept in verschiedenen Designvarianten (A bis E) für die jeweiligen Aufbauvarianten mit zwei unterschiedlichen Siliziumdicken in einer ersten Iteration zu untersuchen und zu bewerten, wobei sich diese in der Ausführung der elektrischen und mechanischen Sollbruchstelle unterschieden. Daraus sollte dann in einer zweiten Iteration (Demonstrator 2) auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse eine in Bezug auf den Pelletaufbau und die Siliziumdicke weiter verbesserte Lösung für das Schutzkonzept untersucht werden.

Infineon Bipolar war dabei federführend für die Entwicklung von Design und Aufbau der neuartigen Halbleiter-Schutzkomponenten verantwortlich. Ergänzt wurden die Arbeiten durch die Entwicklung eines mehrkanaligen Treiberkonzepts mit Sicherheitslevel zur Erfüllung einschlägiger Normen für Schutzkonzepte durch Ingenieursdienstleister im Unterauftrag. Die Technische Universität Dresden führte Forschungsarbeiten zur experimentellen Designbewertung der Bauteile durch und das Fraunhofer IMWS ergänzte die Forschungsarbeiten durch materialdiagnostische Analysen der Halbleiter-Bauteile vor und nach elektrischer Belastung.

Auf Basis der Forschungsergebnisse zu den Varianten von Demonstrator 1 war die Auswahl der Zielvariante Demonstrator 2 geplant, um diese hinsichtlich ihrer Kurzschlusswirkung nicht nur zu optimieren, sondern auch im Anschluss in einer anwendungsnahen Schaltungskonfiguration in einem externen Hochstromlabor abschließend zu testen und zu evaluieren.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben wurde in enger Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern, dem Fraunhofer IMWS Halle und der Technischen Universität Dresden, durchgeführt. Infineon Bipolar verantwortete die Entwicklung, Herstellung und Bereitstellung der neuartigen Leistungshalbleiter bzw. Safety Devices, während das Fraunhofer IMWS die Materialdiagnostik und Zuverlässigkeitsanalysen und die TU Dresden die experimentelle Designbewertung übernahmen. Die Projektpartner verfügten über eine umfassende Forschungsinfrastruktur, die es ermöglichte, die notwendigen Experimente und Untersuchungen durchzuführen. Dazu



gehörten unter anderem auch die benötigten Laboratorien, Fertigungskapazitäten, Prüfstände und Analysegeräte.

Alle Verbundpartner brachten umfassendes Fachwissen und Expertise in den Bereichen Halbleitertechnologie, Materialwissenschaft, Elektrotechnik und Energietechnik ein. Dies ermöglichte es, die komplexen Herausforderungen des Projekts zu meistern und innovative Lösungen zu entwickeln.

Durch die anteilige Finanzierung im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms konnten die notwendigen Ressourcen und die Infrastruktur bereitgestellt werden, um das Projekt erfolgreich in der kurzen Zeitschiene durchzuführen. Die Zuwendung unterstützte die Projektpartner außerdem bei der Absicherung der finanziellen Risiken, welche mit der Erforschung und Umsetzung von neuen Technologien verbunden sind, und deckte einen Teil der erheblichen Materialkosten ab, die notwendig waren, um Fortschritte bei der Leistungselektronik zu erforschen und zu validieren.

Das Vorhaben wurde innerhalb eines festgelegten und überwachten Zeitplans durchgeführt. Dies ermöglichte es, die notwendigen Meilensteine einzuhalten und die Projektziele zu erreichen. Durch die enge Zusammenarbeit und den regelmäßigen, ausführlichen Austausch der Projektpartner über wichtige Projekterkenntnisse, insbesondere im Rahmen der Projekttreffen, konnten die notwendigen Meilensteine termingerecht und das Projekt erfolgreich abgeschlossen werden.

Insgesamt wurden die Voraussetzungen für das Vorhaben durch die enge und erfolgreiche Zusammenarbeit der Projektpartner, die umfassende Forschungsinfrastruktur, das Fachwissen und die Expertise der Partner, die Finanzierung durch das 7. Energieforschungsprogramm und den festgelegten Zeitplan geschaffen. Dadurch konnte das Projekt erfolgreich durchgeführt und die angestrebten Projektziele erreicht werden.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben folgte einem gemeinsamen Projektplan mit allen Verbundpartnern, um eine optimale Zusammenarbeit zur Erreichung der Projektziele zu gewährleisten. IFBIP verantwortete im Rahmen dieses Teilvorhabens schwerpunktmäßig die Arbeitspakete 1 Anforderungen und Lösungsraum, 2 Erforschung Leistungshalbleiter für Schutzfunktion, sowie 5 Technische Bewertung und Ausblick und 6 Projektmanagement und Koordination. Der Gesamtprojektplan sowie Meilensteinplan ist nachfolgend dargestellt.



AP	Arbeitspaket	Partner			Terminplan									
		IFBIP	TUD	IMWS	1. Jahr				2. Jahr					
					I	II	III	IV	I	II	III	IV		
1.	Anforderungen und Lösungsraum													
1.1	Anforderungen an den Halbleiter inkl. Normrecherche													
1.2	Ableitung von Anforderungen an experimentelle Designbewertungen													
1.3	Ableitung von notwendigen Diagnostikmethoden und Zuverlässigkeitsuntersuchungen													
2.	Erforschung Leistungshalbleiter für Schutzfunktion													
2.1	Machbarkeitsstudien zur Designevaluierung													
2.2	Erforschung und Entwicklung Thyristor Design für Schutzfunktion													
2.3	Ansteuerung mehrkanaliges Treiberkonzept Sicherheitslevel													
2.4	Erforschung neuartiger Materialkombinationen für Kurzschluss-Funktion													
2.5	Erarbeitung Konzept zur Charakterisierung u. Zuverlässigkeitsbewertung des Halbleiters													
2.6	Prozessentwicklung zur Umsetzung der neuen Designs und Materialkombinationen													
2.7	Umsetzung Design und Prozess inkl. Demonstratorbau													
2.8	Charakterisierung und Zuverlässigkeitsuntersuchung													
2.9	Anpassung Produkt- und Prozessdesign inkl. Demonstratorbau - 2. Lernzyklus													
2.10	Abschließende Evaluierung und Auswahl der optimalen Designvariante													
3.	Experimentelle Designbewertung													
3.1	Anpassung des Pulsstromanlage, inkl. Inbetriebsetzung mit Bestandsthyristoren													
3.2	Stoßstromversuche an Halbleitern - Iteration 1													
3.3	Auswertung der Versuche - Iteration 1													
3.4	Stoßstromversuche an Halbleitern - Iteration 2													
3.5	Auswertung der Versuche - Iteration 2													
3.6	Durchführung von Gehäusebruchstromversuchen in Vorwärtsrichtung													
3.7	Überprüfung der Thesen und Ziele nach Durchführung aller Versuche													
3.8	Simulative Untersuchung der Applikation auf Basis der durchgeführten Versuche													
4.	Materialdiagnostik und Zuverlässigkeitsanalyse der leistungselektronischen Komponenten und Systeme													
4.1	Materialcharakteristika und Alterungsmechanismen													
4.2	Evaluation von Präparations- und Analysemethoden													
4.3	Analytik verschiedener Designs													
4.4	Analytik nach Funktionstest													
4.5	Untersuchung Bruchverhalten Gehäuse													
5.	Technische Bewertung und Ausblick													
5.1	Korrelation der Forschungsergebnisse													
6	Projektmanagement													
6.1	Koordination, Dokumentation und Berichtswesen													
Meilensteine														

MS Nr.	Zeitpunkt [Projektmonat]	Titel	Ergebnis	betreffende Hauptarbeitspakete
MS 1	3	Anforderungen und Entwicklungsplan für alle Partner definiert	Lastenheft und Anforderungsprofile	AP 1
MS 2	9	Konzepte zur Demonstratorumsetzung, Erforschung und Bewertung definiert	Konzepte liegen vor	AP2, AP3 und AP4
MS 3	15	Realisierung des 1. Demonstrators abgeschlossen	Demonstrator liegt vor	AP2
MS 4	21 Verschiebung auf 23	Experimentelle Bewertung der Iterationsstufen abgeschlossen	Versuchs- und Analyseergebnisse	AP2, AP3 und AP4
MS 5	24	Technische Bewertung abgeschlossen	Berichte liegen vor	AP 5



Wesentliche Verzögerungen entstanden durch unerwartete Herausforderungen bei der Entwicklung einer geeigneten, mehrkanaligen Treiberstufe. In der Folge mussten elektrische Untersuchungen wiederholt und ausgeweitet werden und der abschließende Hochstromtest in applikationsnaher Schaltungskonfiguration verschob sich um zwei Monate.

1.4 Stand der Technik, an den angeknüpft wurde

Heutige Energieverteilnetze liefern im Fehlerfall hohe Kurzschlussströme, die große Energien an der Fehlerstelle erzeugen können. Konventionelle Abschaltvorrichtungen werden entweder magnetisch (Leistungsschalter) oder durch einen Schmelzleiter (klassische Sicherung) ausgelöst. Diese Überstromschutzeinrichtungen benötigen allerdings eine Abschaltzeit von bis zu einigen 100ms. Für viele Energieerzeugungsanlagen, z.B. mit klassischen Generatoren, sind lange Abschaltzeiten unproblematisch. Aber besonders im Bereich der regenerativen Energien werden oftmals Halbleiterbasierte Wechselrichter als Schnittstelle zum Netz eingesetzt. Im Leistungsbereich größer 30kW sind dabei IGBT-Module die am häufigsten genutzten Leistungshalbleiter. Die Leistungsdichte von IGBT-Modulen steigt stetig an, wodurch immer kompaktere Stromrichter gebaut werden können. Des Weiteren sind heute auch Halbleiterbauelemente auf Siliziumkarbid (SiC) verfügbar, die einen weiteren Schub im Bereich der Leistungsdichte hervorrufen.

Die steigenden Leistungsdichten führen jedoch dazu, dass sich das Verhältnis zwischen dem Betriebsstrom und den zulässigen kurzzeitigen Fehlerströmen erheblich reduziert. Gerade im Bereich sehr hoher Leistungen gibt es daher Wechselrichter-Konfigurationen, die durch klassische Überstromeinrichtungen nicht mehr ausreichend geschützt werden können. Maßgeblich betroffen von diesem Problem sind die Freilaufdioden von IGBT-Modulen (immer häufiger in SiC-Technologie), da diese im Gegensatz zum IGBT den Stromfluss nicht aktiv stoppen können. Im Fall unzulässiger Kurzschlussströme kann es zu einer Explosion der Halbleitermodule kommen. Das austretende Plasma ist hochgradig leitfähig und verursacht oftmals zusätzliche Kurzschlüsse, wodurch Brände entstehen können, die einen Totalausfall des Gesamtsystems hervorrufen können.

Aufgrund des beschriebenen Problems werden heute häufig Stromrichterkonfigurationen im hohen Leistungsbereich in Ihrem Betriebsstrom begrenzt, um Kurzschlüsse sicher zu beherrschen.

Ein weiteres Problem stellt eine Explosion von Halbleitern in Bezug auf die Sicherungskonzepte dar, da oftmals eine offene Verbindung im Schaltkreis entsteht. In diesem Fall können klassische Schutzeinrichtungen den Fehlerstrom nicht abschalten, da sich der zur Abschaltung benötigte Fehlerstrom gar nicht mehr ausbilden kann und sich im Nennstrom-Bereich befindet.

Es gibt heute schon Lösungen, die einen Kurzschluss zwischen Überstromschutzeinrichtung und Wechselrichter erzeugen können. Eine Möglichkeit ist der Einsatz sogenannter Sprengkapseln, die pyrotechnisch einen Schaltkontakt schließen und so einen dauerhaften Kurzschluss erzeugen. Ein wesentlicher Nachteil dieser Lösung ist der Einsatz von Sprengstoff, der u.a. beim weltweiten Transport von Anlagen strengen Auflagen unterliegt. Hier ist z.B. zu erwähnen, dass diese Schalter nicht im internationalen Luftverkehr transportiert werden dürfen.

Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz von konventionellen Thyristoren. Derartige Thyristoren für höchste Ströme und Spannungen werden in druckkontaktierten Gehäusen, sogenannten Scheibenzellen, verbaut (Abbildung 2). Diese zeichnen sich durch ihre Kupferkontakte auf beiden Seiten, zusätzlich verbunden durch eine



isolierende Keramik, aus. Der Aufbau von solchen Keramikapseln schließt den Halbleiter dabei hermetisch dicht ein.

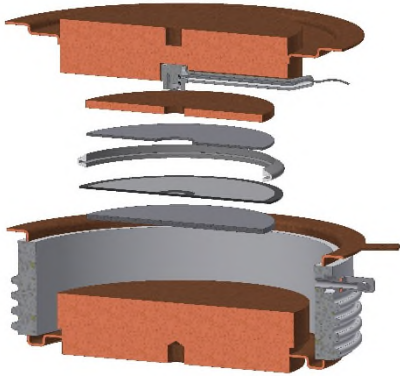


Abbildung 2: Aufbau einer Thyristorscheibenzelle in Keramikausführung

Der elektrische und thermische Kontakt wird in der Anwendung dadurch hergestellt, dass von beiden Seiten eine Kraft auf die Scheibenzelle wirkt, welche durch einen externen Spannverband aufgebracht wird. Diese Kräfte liegen je nach Größe der Bauelemente im Bereich von 10 bis über 100 kN. Durch die hohe Anpresskraft ist der Kontakt sehr robust und kann beispielsweise mechanische Einwirkungen oder thermische Zyklen problemlos überstehen. Aufgrund des druckkontaktierten Aufbaus eignet sich ein derartiges Bauteil grundsätzlich als Ableiter von hohen Kurzschlussströmen in der betrachteten Anwendung. Wird ein Thyristor mit Strömen belastet, die um Größenordnungen über denen des Normalbetriebes liegen, so spricht man von einem Stoßstromereignis. Typischerweise sind solche Ereignisse zeitlich kurz begrenzt und auf eine Störung wie den zuvor diskutierten Netzkurzschluss zurückzuführen.

Ein solches Ereignis kann bei Überschreitung des spezifizierten Stoßstromsichelwertes (I_{TSM}) zum Aufschmelzen des Siliziumbauelementes und somit zu einer Zerstörung führen. Dies ist akzeptabel, wenn damit ein einmaliges Ereignis, wie oben beschrieben, abgesichert werden soll. Kritisch ist jedoch, wenn die Kapsel durch das Stoßstromereignis bricht und leitfähiges Plasma austritt, da dies zu weiteren Kurzschlüssen in der Anlage führen kann. Ob dies geschieht, hängt maßgeblich davon ab, an welcher Position das Siliziumbauelement in der Kapsel zuerst aufschmilzt. Beginnt das Schmelzen, oder um einen alternativen Ausdruck dafür zu verwenden, das Durchlegieren, innerhalb der stromführenden Fläche, so wird ein Lichtbogen durch den hohen Flächendruck unterdrückt und es entsteht eine auf den aktiven stromführenden Bereich des Siliziumbauelementes begrenzte Schmelze. Bei einem Ausfall im Randbereich des Siliziumbauelementes hingegen, der sich nicht mehr im gedruckten Bereich der aktiven Fläche befindet, besteht die Gefahr eines Lichtbogens, dessen heißes Plasma direkt auf die Keramikapsel wirken kann. Dadurch besteht die Gefahr, dass die Kapsel bricht und Plasma austreten kann. Es ist daher schwer möglich, mit konventionell ausgelegten Thyristoren ein, wie im Vorhaben anvisiertes, Kurzschlussstromereignis zu absorbieren, bei dem Kurzschlussströme im Bereich von mehr als 100kA auftreten.

Eine Möglichkeit besteht darin, die Stromdichte durch eine größere stromführende aktive Thyristorfläche in dem Maße zu reduzieren, dass dieser Thyristor diesen Kurzschlussstrom unbeschadet übersteht und ein Gehäusebruch ausgeschlossen



wird bzw. gar nicht erst auftreten kann. Dies bedeutet jedoch, dass in einer typischen Anwendung sehr viel größere oder sogar mehrere Thyristoren parallel eingesetzt werden müssen. Dies bedingt mehr Bauraum, höhere Kosten und im Falle mehrerer Thyristoren auch eine kompliziertere Ansteuerung.

Schutzrechte

Auch wenn die Idee eines Kurzschlussbauelements nicht grundsätzlich neu ist, so existierte zum Zeitpunkt der Antragstellung soweit uns bekannt noch kein Bauteil, das für die in der GVB beschriebenen Anwendung geeignet gewesen wäre. Bisherige Konzepte unterscheiden sich in der Leistungsklasse und der Methode, wie ein Kurzschluss erzeugt wird. Erwähnenswerte Patente in diesem Zusammenhang sind:

- (Europa Patentnr. EP3646376B1, 2018), Bypass thyristor device with gas expansion cavity within a contact plate, Hitachi Energy Switzerland (ehemals ABB Switzerland), 2018
- (Deutschland Patentnr. DE102018102234B4, 2018), Short circuit semiconductor component, Infineon Technologies Bipolar GmbH and Co KG, 2018
- (Deutschland Patentnr. DE102019124695A1, 2019), Kurzschluss-Halbleiterbauelement und Verfahren zu dessen Betrieb, Infineon Technologies Bipolar GmbH and Co KG, 2019

Da aber sowohl Konzept als auch Anwendung sich nach eingehender Prüfung der Grundidee und Umsetzung des Kurzschlussbauelementes gegenüber dem in den Patenten offenbarten Stand der Technik unterscheiden, wurde das Halbleiterkonzept mit Schutzfunktion zum Patent angemeldet (siehe Kapitel 2.6).

Im Rahmen des Projekts wurde eine umfassende Recherche der Fachliteratur und Informationsdienste durchgeführt, um den aktuellen Stand der Technik auf dem Gebiet der halbleiterbasierten Schutzkonzepte zu ermitteln.

Es wurden insbesondere wissenschaftliche Artikel, Patente und Berichte von renommierten Forschungseinrichtungen und Unternehmen ausgewertet. Darüber hinaus wurden auch Online-Datenbanken und Informationsdienste wie Google Scholar, ResearchGate und IEEE Xplore genutzt, um aktuelle Forschungsergebnisse und Entwicklungen auf dem Gebiet zu recherchieren.

Die Recherche umfasste auch die Auswertung von Fachbüchern und -artikeln, die sich mit den Themen Halbleiterbauelemente, Schutzkonzepte und Energietechnik befassen:



- Semiconductor Power Devices – Physics, Characteristics, Reliability, Josef Lutz, Heinrich Schlangenotto, Uwe Scheuermann, Rik de Doncker, 2018
- (Wikström & Oedegard, An 8.5kV Sacrificial Bypass Thyristor, 2019), ABB Switzerland Ltd., Semiconductors, 2019

Es wurden auch Berichte und Studien von internationalen Organisationen wie der Internationalen Energieagentur (IEA) ausgewertet. Die Ergebnisse der Recherche wurden verwendet, um den aktuellen Stand der Technik auf dem Gebiet der halbleiterbasierten Schutzkonzepte zu ermitteln und um die Forschung und Entwicklung im Rahmen des Projekts zu unterstützen.

1.5 Zusammenarbeit im Projekt und mit anderen Stellen

Im Rahmen des Projektes wurden die Einzelkompetenzen der Partner Infineon Bipolar GmbH, Technische Universität Dresden und Fraunhofer IMWS gebündelt. In Abbildung 3 ist die Zusammenarbeit der Partner im Projekt dargestellt. Infineon Bipolar war dabei maßgeblich am Design und Aufbau der Komponenten beteiligt. Die Technische Universität Dresden führte Forschungsarbeiten bei der elektrischen Prüfung und Charakterisierung der Bauteile durch und das Fraunhofer IMWS begleitete diese durch materialdiagnostische Forschungsarbeiten.

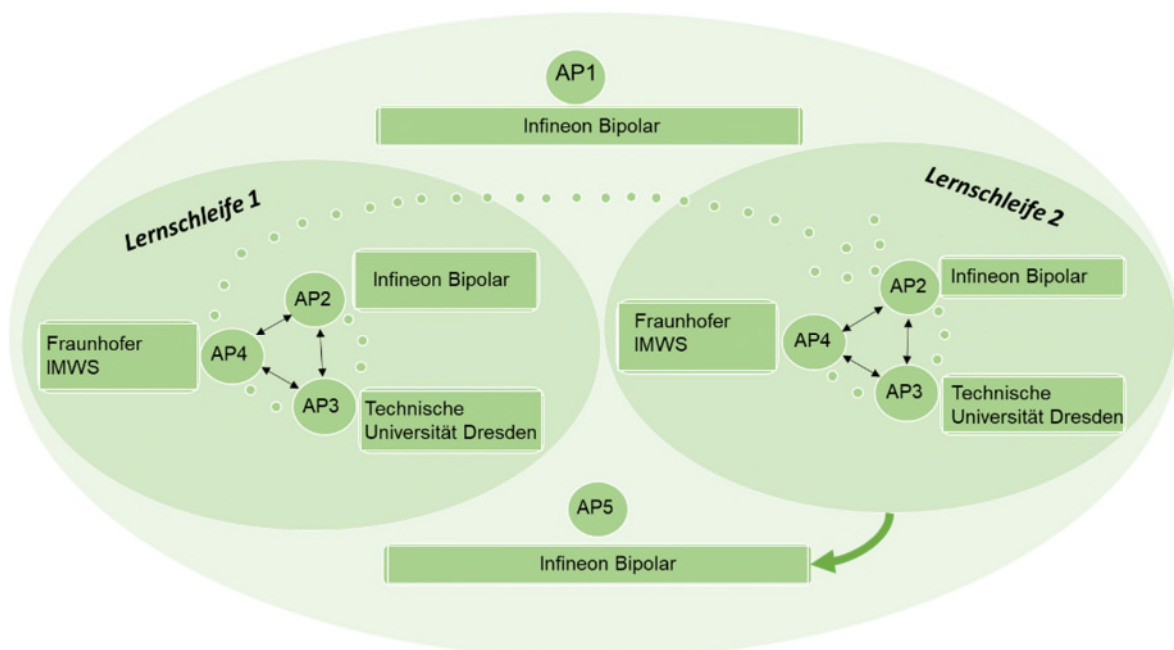


Abbildung 3: Schaubild zur Zusammenarbeit der Partner

Die Anforderungen für ein mehrkanaliges Treiberkonzept wurden zur Absicherung mit entsprechendem Sicherheitslevel betrachtet, damit das Gesamtkonzept die Anforderungen einschlägiger Normen erfüllt. Die Treiberschaltung wurde mit Unterstützung Ingenieurbüro M. Billmann, als Dienstleistung im Unterauftrag der Infineon Technologies Bipolar entwickelt und kam auch bei der Funktionsprüfung an der TU Dresden zum Einsatz.



2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und der erzielten Ergebnisse

2.1.1 Projektziele

Das Teilprojekt „Erforschung Leistungshalbleiter für Schutzfunktion inkl. Erprobung am Demonstrator“ im Projekt GreenGridGuard hatte zum Ziel, das Materialverhalten und die Schutzwirkung neuartiger Halbleiter und deren Integration in ein innovatives Schutz-Konzept zur Erzeugung eines definierten Kurzschlusses im Störfall, sowie der darauffolgenden Abschaltung des Wechselrichters, zu erforschen.

Durch gezieltes Aufschmelzen eines Bereichs im Halbleiter bzw. innerhalb der druckkontaktierten Fläche des gekapselten Bauteiles wird eine Explosion des Gehäuses und der Austritt von leitfähigem Plasma verhindert. In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**4 ist das Schutzkonzept und dessen Einbindung in den Wechselrichter grafisch dargestellt.

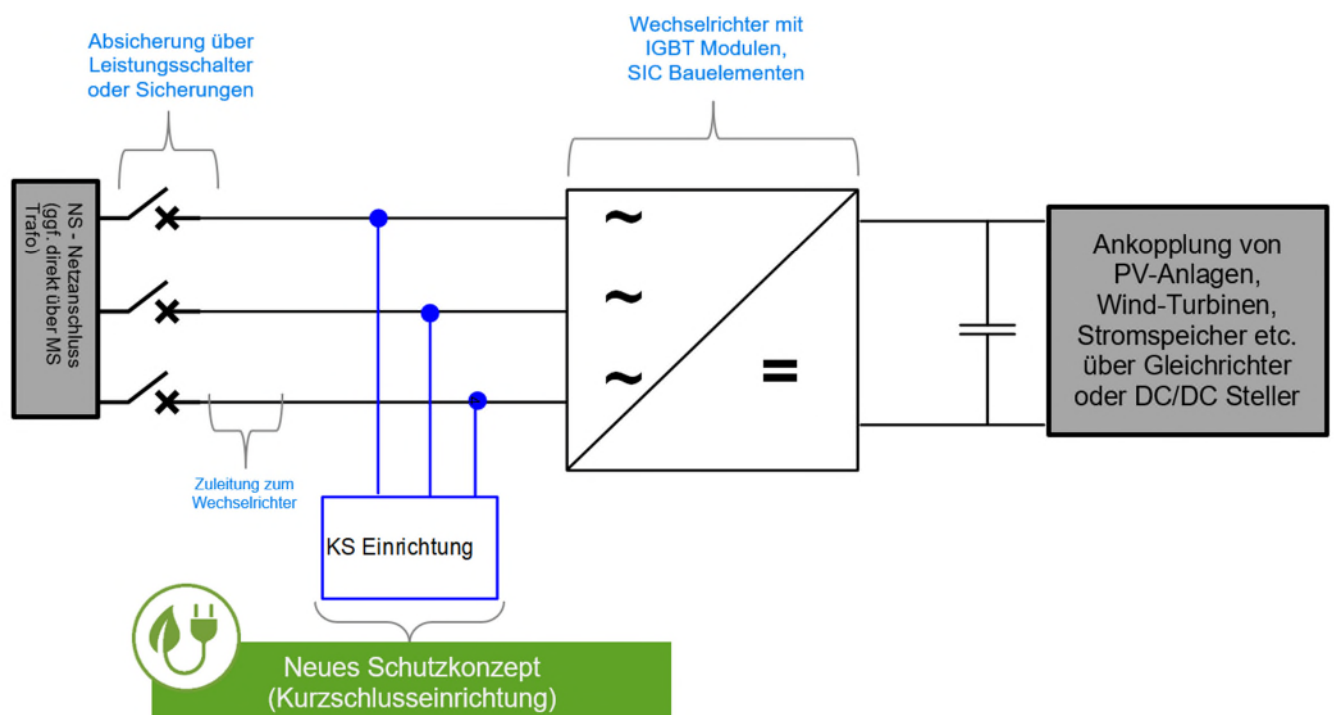


Abbildung 4: Grafische Darstellung des Schutzkonzepts

Hierzu wurden verschiedene Designs und Materialkombinationen erforscht, die sowohl die Kontrolle von hohen Schaltströmen sowie die damit verbundene kontrollierte Zerstörung der Bauteile ohne Gehäuseschädigung oder Plasmaaustritt ermöglichen sollten, mit dem Ziel, die Ausfallzeiten, Instandsetzungskosten und Versorgungssicherheit bei dezentraler Energieerzeugung und bei der Energiespeicherung (im Bereich >3MW) zu verbessern.



Die wichtigsten wissenschaftlichen und technischen Ziele dieses Teilprojekts umfassen die Entwicklung und Erforschung des Halbleiterbauelements. Dazu wurden unterschiedliche Designvarianten am Demonstrator erforscht und nach verschiedenen Aspekten anwendungsorientiert optimiert. Die Teilprojekt-Ziele sind nachfolgend dargestellt.

- Erzeugung des Kurzschlusses innerhalb von $100\mu\text{s}$ oder weniger
- Dauerhafter Kurzschluss nach Auslösen - short-on-fail
- Verhindern eines Plasmaaustritts bei einem I^2t - Wert von bis zu $225 \cdot 10^6 \text{ A}^2\text{s}$ und einer Maximalstromamplitude von $\leq 80\text{kA}$
- bei einer maximalen Gehäusegröße von 75mm (Flanschdurchmesser)

Darüber hinaus stand das generelle Verständnis beim Aufschmelzen bzw. Durchlegieren des Halbleiters bei sehr hohen Stromdichten im Fokus der Forschungsarbeiten. Dazu wurden die verschiedenen Varianten entwickelt, getestet, analysiert und verglichen. Einen weiteren Schwerpunkt bildete die Evaluierung eines geeigneten Mess- und Prüfkonzepts nach Abschluss der Herstellungsprozesse in der Produktion, um fehlerhafte bzw. nicht funktionierende Bauelemente sicher zu finden zu können. Die Herausforderung hierbei besteht darin, dass die eigentliche Hauptfunktion, das Aufschmelzen des Bauteils, in einer Produktionslinie nicht getestet werden kann, da es sich beim eigentlichen Stoßstromtest um einen zerstörenden Test handelt. Das ist auch ein Grund dafür, dass in dieser Studie sehr viele Bauteile mittels eines zerstörenden Stoßstromtests an der TU Dresden zu untersuchen waren. Hierfür mussten sowohl vor als auch nach den Stoßstromtests entsprechende Messungen der Bauteile durchgeführt werden, um sicherzustellen, dass das Bauteil schon zerstört wurde bzw. um auch die Eigenschaften der Bauteile nach dem Stoßstromschuss beurteilen zu können.

Ein weiteres Teilziel mit zentraler Bedeutung beinhaltete auch die Entwicklung einer geeigneten mehrkanaligen Treiberschaltung für die Ansteuerung der Bauteile und um die Nutzung der Halbleiter-Bauelemente in sicherheitskritischen Anwendungen zu ermöglichen und damit auch die Anforderungen des „From Product to System“-Ansatzes erfüllen zu können.

2.1.2 Projektablauf und Ergebnisse

Erste Arbeiten zur Bestimmung der **Anforderungen und des Lösungsraumes (AP1)** fanden im Rahmen des Kick-off Meetings statt. Dabei wurden die Möglichkeiten der Partner vorgestellt und deren Beitrag im Rahmen des Projektes evaluiert. Gemeinsam mit dem Treiberhersteller der Fa. Markus Billmann wurden die Anforderungen an eine Treiberschaltung, die für sicherheitskritische Anwendungen geeignet ist, diskutiert. Die Erkenntnisse wurden weiter vertieft und in ein Lastenheft sowohl für das Bauelement als auch das Treiberkonzept überführt. Auf Basis des Lastenheftes für das Bauelement wurde auch ein Datenblatt erstellt. Da für das Bauelement eine sehr hohe Störsicherheit von Bedeutung ist, wurde beschlossen statt nur Überspannungsereignisse erster Ordnung auch Überspannungsereignisse zweiter Ordnung zu berücksichtigen (IEC 60664-1 / 4.333.1). Dies bedeutet, dass die Sperrspannungsauslegung für den Halbleiter in einem 690V Netz nicht wie üblich auf



2500V (Überspannungskategorie 1) auszulegen war, sondern auf mindestens 4000V (Überspannungskategorie 2). Außerdem wurden die technischen Anforderungen an die Tests diskutiert. Da sich die technischen Anforderungen in einigen wichtigen Punkten von denen eines üblichen Thyristors unterscheiden, wurde eine Liste der relevanten elektrischen Parameter, insbesondere in Abgrenzung zum Thyristor, erstellt. Daraus wurden die Bedingungen für die Serien- und Typenprüfungen sowie Zuverlässigkeitsuntersuchungen abgeleitet.

Die Erforschung des Leistungshalbleiters mit Schutzfunktion (AP 2) startete mit Machbarkeitsstudien zur Design-Evaluierung mehrerer Varianten (AP 2.1) und mündete in der konkreten Entwicklung der Thyristor Designs für die Schutzfunktion (AP 2.2).

Bei den neuen Bauteilen handelt es sich um Thyristorstrukturen, die sich unter anderem in zwei wesentlichen Eigenschaften von denen eines konventionellen Thyristors unterscheiden:

- Modifikation innerhalb der stromführenden Kathode dergestalt, dass im Zentrum dieser aktiven Fläche die Stromtragfähigkeit eines Thyristors gezielt stark verringert wurde. Das Ergebnis ist eine „Sollbruchstelle“, in der das Bauteil bei Erreichen eines jetzt möglichst kleinen Kurzschlussstromwertes zuverlässig ausfällt. Im Fehlerfall wird das Bauteil gezündet und durch die Energie des Kurzschlussstroms so zerstört, dass sich eine lokale Schmelze von Silizium und den Kontaktmetallmaterialien bildet („Durchlegierung“) und zu einem dauerhaften und irreversiblen Kurzschluss führt.
- Das Gate- Design wurde dahingehend angepasst, dass sich das Bauteil, wie ein Thyristor vom Zentrum aus, mit einem externen Zündstrom aus der Treiberschaltung einschalten lässt. Zusätzlich sollte über denselben Signalweg ein nichtzündender Monitorstrom fließen, der wegen der Anforderungen eines neuartigen Sicherheitskonzeptes, die ständige Überwachung von Gate-Treiber und Signalweg garantiert. Durch das Design musste also ein noch zu ermittelndes sinnvolles Verhältnis zwischen Zündstrom und nichtzündendem Monitorstrom eingestellt werden. Daraus ergibt sich, im Vergleich zum herkömmlichen Thyristor, ein beispielsweise um den Faktor 5 - 10 größerer Zündstrom. Ein solches Konzept mit einem im Gate-Stromsignal zusätzlich enthaltenen Monitorstromes gab es bisher bei den üblichen Thyristoransteuer-Systemen in dieser Form nicht.

Es wurden zwei verschiedene Chipaufbauten mit vergleichbarer aktiver Fläche für den Einsatz als Safety Device untersucht, ein Aufbau mit loser Auflage von kathoden- und anodenseitiger Kontaktscheibe a) und ein Aufbau mit anodenseitig fester Verbindung b) zwischen einer dickeren Trägerscheibe und Kathoden seitig lose aufliegender Kontaktscheiben.

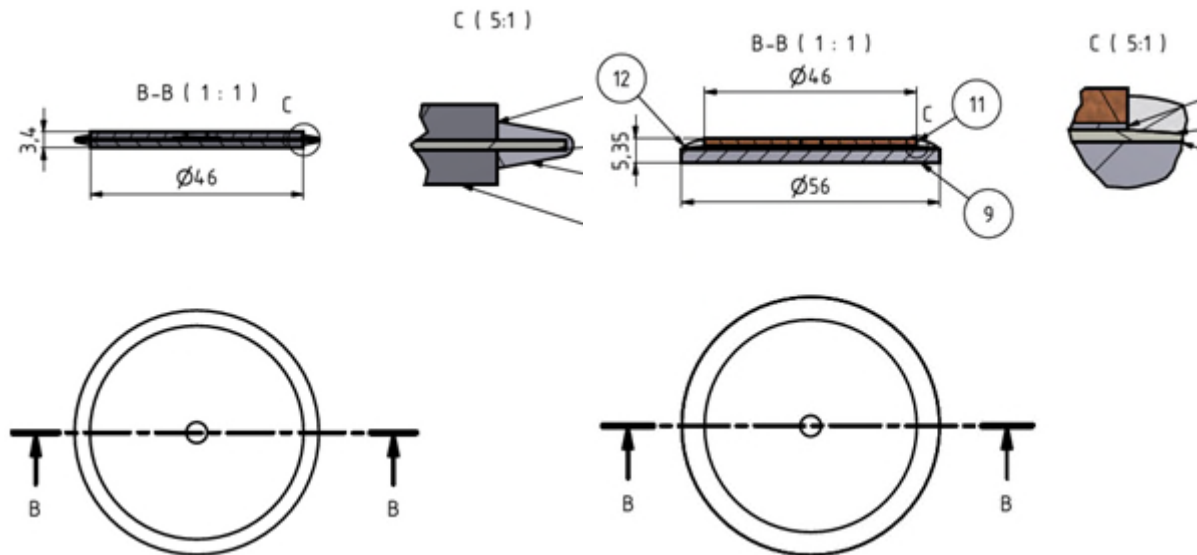


Abbildung 5: a) lose Verbindung

b) feste Verbindung

Das zugrundeliegende Schutzkonzept ist in Patent DE 10 2022 120 612 A1 im Detail offengelegt. Im Rahmen des Projektes wurde das Konzept anhand verschiedener Varianten mit zwei unterschiedlichen Siliziumdicken weiterentwickelt und an konkreten Demonstratoren erprobt.

Daher wurden von der Aufbau-Variante a) 5 verschiedene Maskenvarianten für die Kurzschlussstrom-Bruchstelle realisiert, sowie eine zusätzliche Variante mit nur einer Metallaussparung und ohne einen Kurzschlussringbereich zur Bewertung der Wirkung dieser Aussparung auf das Kurzschlussstromverhalten. Bei Aufbau-Variante b) wurden 4 Variationen realisiert.

Die zuvor beschriebenen Varianten wurden im Rahmen des Arbeitspakets **Erforschung und Entwicklung Thyristor Design für Schutzfunktion (AP 2.2)** in konkrete Konzepte für die Demonstratoren (elektrisch und mechanisch) überführt.

Parallel zu den Arbeiten am Halbleiterdesign für die Treiberschaltung wurden im Arbeitspaket **Ansteuerung mehrkanaliges Treiberkonzept Sicherheitslevel (AP 2.3)** aus der Anwendung verschiedene Anforderungen abgeleitet. So soll die zu entwickelnde Ansteuereinheit ein sicheres Zünden der neuen Halbleiterbauelemente gewährleisten. Da die gesamte Kurzschlusseinrichtung nur im Fehlerfall aktiviert werden soll, muss die Funktionsfähigkeit der gesamten Einrichtung durch eine intelligente Selbstüberwachung sichergestellt werden. Des Weiteren soll die Ansteuereinheit in eine Sicherheitssteuerung eingebunden werden.

Die Ansteuereinheit soll in verschiedenen Schaltungskonfigurationen einsetzbar sein. Dazu gehören die Konfigurationen B6C, W3C, W2C sowie eine Dreieckschaltung aus 3 Bauelementen. Daher muss es möglich sein, einzelne Kanäle zu deaktivieren.

Generell sollten mit der Ansteuereinheit 2 Funktionen ausgeführt werden:

- Überprüfung der Funktionsfähigkeit der gesamten Kurzschlusseinrichtung: Durch einen kurzen Ansteuerimpuls von $1\mu\text{s}$ soll ein Monitorstromimpuls in die Thyristoren fließen. Hierdurch kann festgestellt werden, ob die Gate-



Verbindungen zu den Thyristoren intakt sind und damit sichergestellt wird, dass im Fehlerfall eine Zündung erfolgen kann. Der Ansteuerimpuls soll dabei von der Sicherheits-SPS erfolgen.

Durch ein Rückmeldesignal an die überlagerte Sicherheits-SPS kann so die Funktionsfähigkeit der Einheit gemeldet werden.

- Zündung der Kurzschlusseinrichtung erfolgt durch einen Zündstromimpuls mit einer Länge von $>5\mu\text{s}$. Dieser Vorgang führt zur Auslösung der Kurzschlusseinrichtung. Danach ist bedingt durch den hohen Laststrom die Kurzschlusseinrichtung dauerhaft niederohmig.

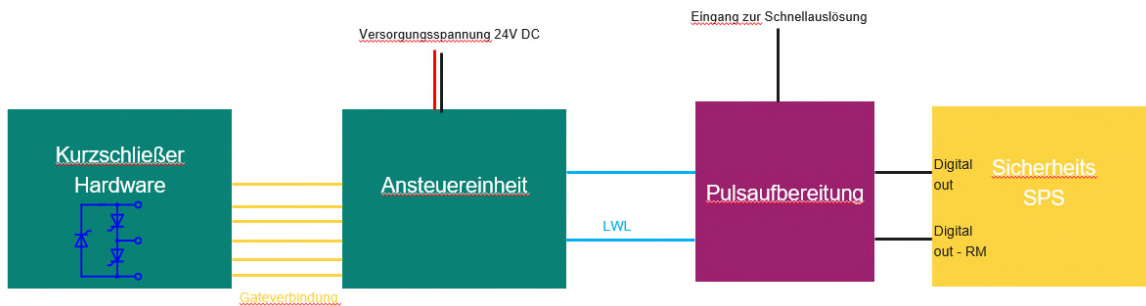


Abbildung 6: Blockdiagramm der Signalketten

Das Treiberkonzept nach dem Sperrwandlerprinzip wurde gemeinsam mit den zuvor beschriebenen Halbleiterbauteil-Varianten an der TU Dresden bei Testbedingungen von 80kA, Raumtemperatur und 20kN Anpresskraft evaluiert.

Das eingangs verfolgte Treiber-Konzept nach dem Sperrwandlerprinzip zeigte unerwartete Fehlerbilder durch hohe Gaterückwirkungen beim Einschalten der Bauteile. Der Gatestrom brach bereits nach wenigen μs Dauer ein, verursachte dadurch eine lückende Impulsserie von 100 μs Dauer, wodurch das Evaluation Board unzulässige Ausfälle im Gatebereich erzeugte. Es bestand die Gefahr der unkontrollierten Zerstörung des Gehäuses durch Plasmaaustritt aus dem Gatebereich. Dieses Fehlerbild konnte auch nach Optimierung des Gatetreibers nach dem Sperrwandlerprinzip und erneuter Erprobung in Kurzschlussstromtests nicht abgestellt werden. Dieses Treiberkonzept ist für den Anwendungsfall nicht geeignet und wurde verworfen.

Für die Versuche wurde vorübergehend auf eine Eigenkonstruktion eines Treibers mit Linear-Betrieb der TU Dresden zurückgegriffen, um die Höhe des benötigten Gatestroms und den zugehörigen Gate-Spannungsabfall zu ermitteln.

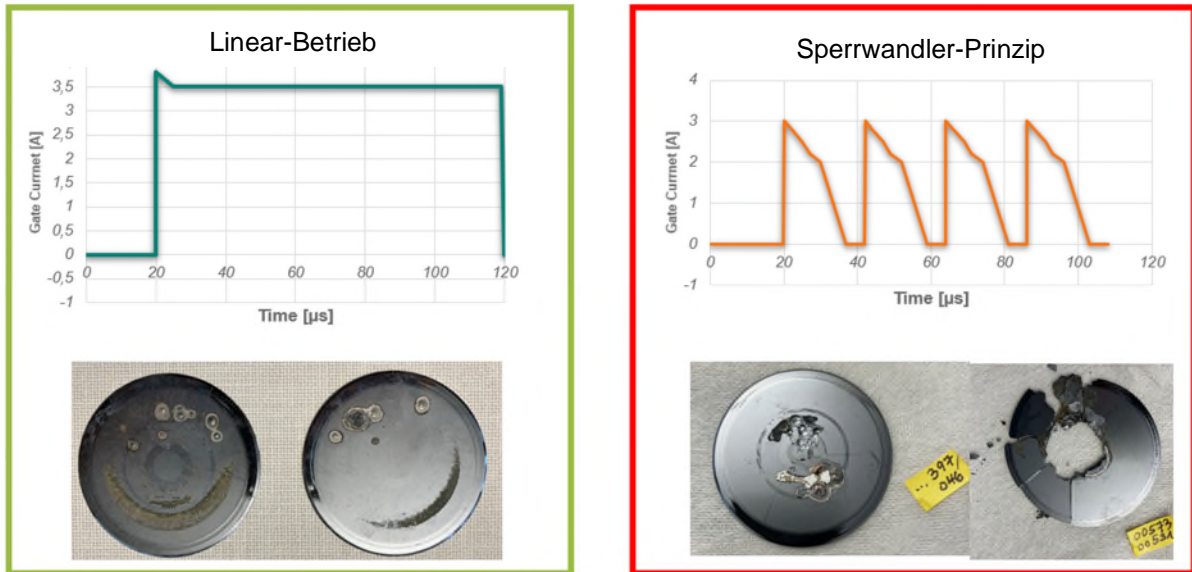


Abbildung 7: Vergleich linearer Gate-Treiber (TU Dresden) vs. Gate-Treiber mit Sperrwandlerprinzip

Um das Vorhaben erfolgreich abschließen zu können wurden zwei alternative Treiberkonzepte evaluiert und in vergleichenden Messungen am Gate-Strom erfolgreich getestet (vgl. nachfolgende Abbildungen):

1. Gate-Treiber auf Basis von Kondensatorentladung zur Kompensation der hohen Gate-Rückwirkungen beim Einschalten der Bauteile (weiße Kennlinien)
2. Gatetreiber nach dem Durchflusswandlerprinzip (rote Kennlinien)



Y: 1A/div X: 100µs/div

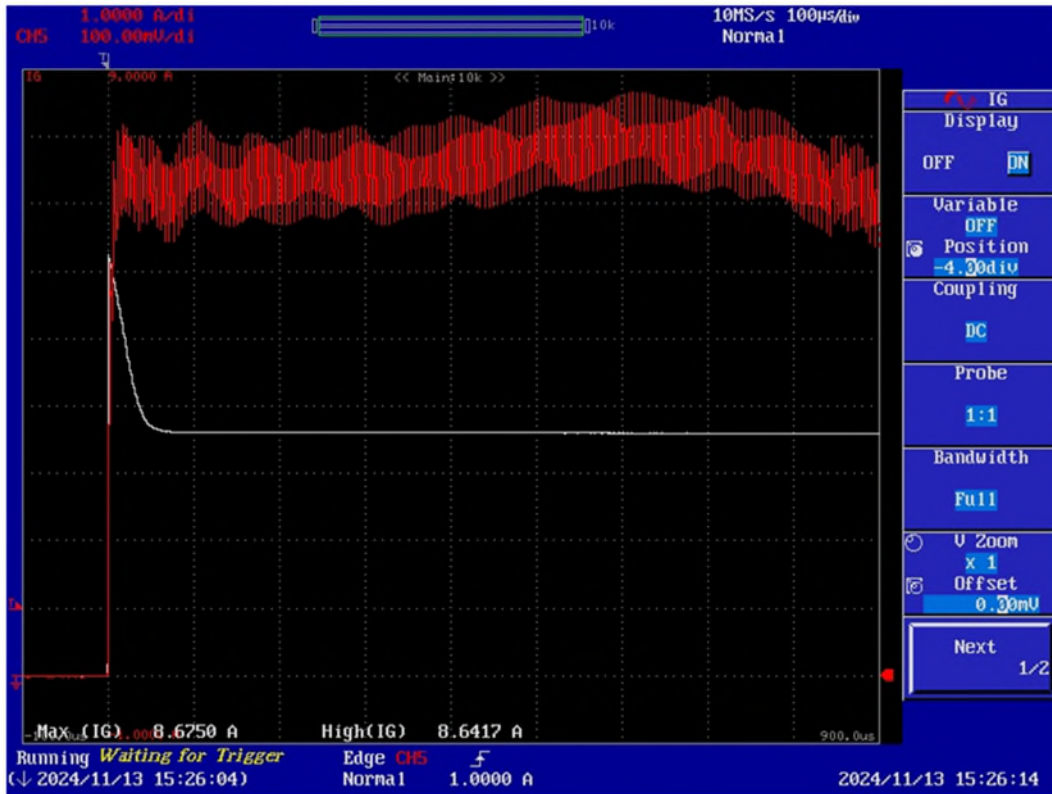


Abbildung 8: Vergleichende Messungen am Gate-Strom im Kurzschluss-Event

Y: 1A/div X: 100µs/div

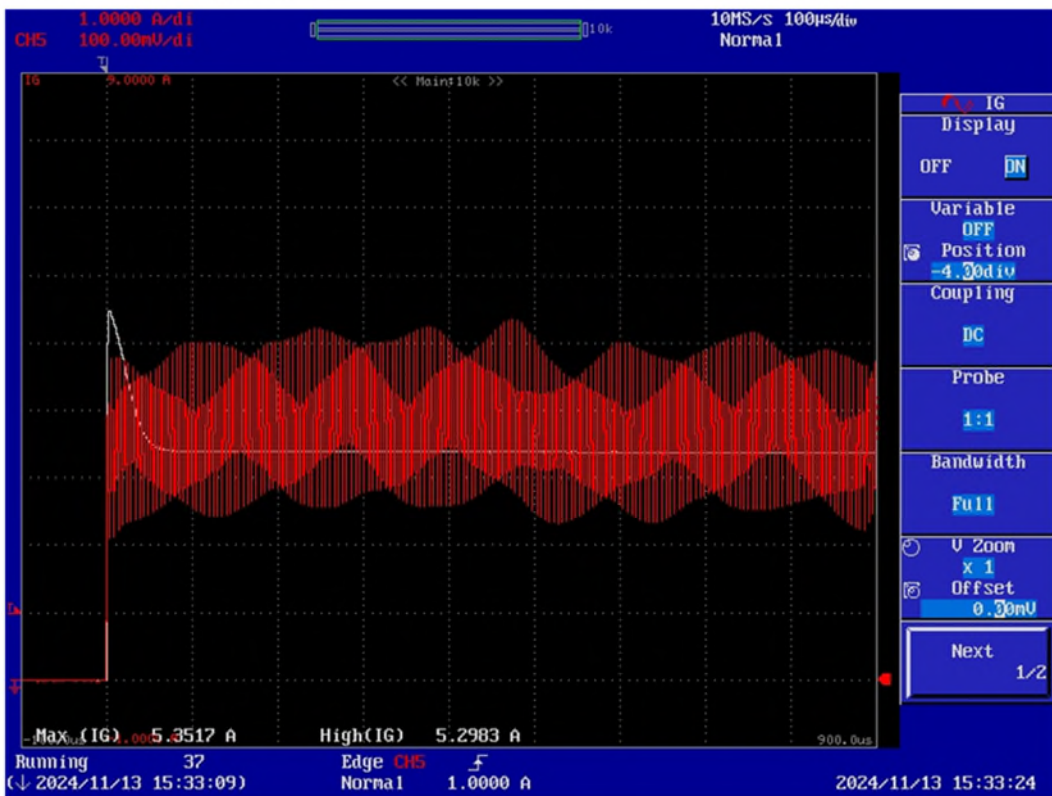


Abbildung 9: Vergleichende Messungen am Gate-Strom mit angeschlossenem Thyristor



Aufgrund im Vergleich geringfügig besserer Versuchsergebnisse wurde das Treiberkonzept nach dem Durchflusswandlerprinzip für die abschließenden Kurzschlussmessungen im externen Hochleistungslabor eingesetzt.

Im Rahmen des Vorhabens wurden **neuartige Materialkombinationen für die Kurzschlussfunktion für ein verbessertes Aufschmelzverhalten** untersucht (AP 2.4). Für die Materialauswahl waren physikalische und chemische Eigenschaften interessant, die einen möglichen Vorteil auf das ‚Durchlegerverhalten‘ des Bauteils haben. Im Fokus der Untersuchungen stand die Frage, ob eine möglichst hohe Schmelzenthalpie bei gleichzeitig möglichst niedrigem Dampfdruck und Schmelzpunkt entscheidende Faktoren für eine zukünftige optimalere Materialauswahl sein können.

Folgende alternative Materialien wurden hergestellt bzw. bis zum Pellet fertiggestellt und untersucht:

- Kontaktscheiben aus Wolfram und Grafit:
niedriger Dampfdruck bei hohem Siedepunkt und Enthalpie,
Hypothese: kontrolliertes Verhalten durch Sublimation oder plasmalöschende Wirkung beim Kurzschlussstromausfall
- Kontaktscheiben aus reinem Aluminium (Schmelztemperatur ca. 660°C)
- Kontaktscheiben aus einer Aluminium-Silizium-Legierung (Schmelztemperatur ca. 570°C)
- Weichlot-Scheiben mit SN im Verhältnis 96,5/3,5% Zinn/Silber und einem niedrigen Schmelzpunkt im Bereich 230°C bei gleichzeitig niedrigem Dampfdruck; die ursprünglich geplanten Scheiben aus Indium waren nicht kompatibel mit den Herstellprozessen aufgrund des niedrigen Schmelzpunktes von ca. 157°C

Im Rahmen von Kurzzeit-Stoßstromtests zur Simulation eines Stoßstromereignisses im Labor bei IFBIP sollten die Strom- und Spannungsverläufe bis zum Ausfallzeitpunkt aufgezeichnet und zwischen den verschiedenen Varianten verglichen werden. Es wurde angestrebt, dass zum Ausfallzeitpunkt, also bei der Entstehung des Plasmas, und danach eine möglichst kleine Spannung am Bauelement abfällt. Es sollte dabei untersucht werden, ob auch die Höhe des Schmelzpunktes der Kontaktscheiben einen Einfluss auf das Durchlegerverhalten und die Spannungsverläufe hat.

Das Arbeitspaket konnte insgesamt nicht vollständig abgeschlossen werden. Zum einen ergaben sich Verzögerungen gegenüber dem ursprünglichen Projektplan, da die Spezifikation und Beschaffung der alternativen Materialien mehr Zeit in Anspruch nahm als ursprünglich geplant.

Zum anderen reichten die elektrischen Testmöglichkeiten am Kurzzeit-Stoßstromtester im Prüflabor bei IFBIP leistungstechnisch nicht aus, um die hergestellten Bauteile ausreichend (zerstörend) zu belasten, um signifikante Erkenntnisse zum Aufschmelzverhalten der unterschiedlichen Material-Varianten zu erhalten.



Damit konnte dieser Handlungsstrang, der wichtige Erkenntnisse zu neuartigen Materialkombinationen hätte liefern sollen, nicht vollständig abgeschlossen werden. Das Gesamtprojektziel wurde hierdurch nicht gefährdet.

Es wird angestrebt, die hierfür erforderlichen elektrischen Kurzschlussstromtests in reduziertem Umfang beim Kooperationspartner TU Dresden nachzuholen und ausgewählte, vielversprechende Bauteile zur detaillierten Materialanalyse an den Kooperationspartner IMWS zu übergeben.

Zur **Realisierung der geplanten Demonstratoren** erfolgte in einem nächsten Schritt die **Erarbeitung eines Konzepts zur Charakterisierung und Zuverlässigkeitsbewertung des Halbleiters (AP 2.5)**.

Hierfür wurde ein Testkonzept in Form eines Prüfplanes für die Datencharakterisierung der neuartigen Bauteile erarbeitet und benötigte Betriebsmittel identifiziert und konstruiert bzw. durch eine Anpassung modifiziert. Eine besondere Herausforderung bestand darin, ein zuverlässiges Testkonzept zu entwickeln, da die eigentliche Funktion der innovativen Schutzkomponenten, die Aufschmelzung, nicht direkt vor dem Einsatz in einer Anwendung ohne Zerstörung des Bauteiles getestet werden kann.

Parallel erfolgte die **Prozessentwicklung zur Umsetzung der neuen Designs und Materialkombinationen (AP 2.6)** für die Halbleiter-Varianten mit losem und fest verbundenem Kontaktaufbau. Hierbei wurde ein für IFBIP neues Justierkonzept bei der Durchführung der Fotostrukturierung der kathoden- und anodenseitigen Aluminiummetallisierung erprobt. Bei diesem Prozess erfolgt die Justierung der verschiedenen Ebenen zueinander, wie die der Phosphorgebiete (Kathode) und die beiden Metallisierungen auf der Kathoden- und Anodenseite, über ein automatisiertes Handlingsystem. Die Variante mit auf der Anode fester Verbindung zwischen der dicken Trägerscheibe und dem metallisierten Siliziumwafer wurde zusätzlich für die Bearbeitung auf automatischen Fertigungsanlagen bei IFBIP optimiert. Hierdurch wurde die Nutzung von vollautomatisierten Ätz- und Passivierprozessen möglich. Für das neue Design wurden dafür auch geeignete Ätzdüsen beschafft und zur Erprobung eingesetzt.

Im Anschluss an die Vorbereitungen erfolgte die **Umsetzung von Design und Prozess inkl. Demonstrator-Bau (AP 2.7)** in zwei Iterationsstufen.

Im Rahmen der ersten Iterationsstufe wurden nachfolgende Hauptvarianten mit loser sowie fester Verbindung von Demonstrator 1 mit folgenden Designs bezogen auf die elektrische und mechanische Sollbruchstelle hergestellt.

Variante	A	B	C	D	E
Elektrische Sollbruchstelle	groß	klein	groß	klein	ohne
Mechanische Sollbruchstelle	ohne	ohne	mit	mit	mit

Abbildung 10: Übersicht Varianten Demonstrator 1

Im Zuge von **Charakterisierung und Zuverlässigkeitsuntersuchungen (AP 2.8)** erfolgten erste Messungen an den Demonstrator-Varianten (am Pellet) im Prüffeld bei IFBIP im Hinblick auf Zündstrom, Durchlassspannung und Sperrfähigkeit. Die



Halbleiterbauteile zeigten sehr stabile Durchlassspannungs- und Zündstromverteilungen. Bezogen auf die Sperrfähigkeit erzielten über 90% der Bauteile die geforderte Nennspannung von >2,2kV und eine Überspannungsfestigkeit von mindestens 4,5kV bei Raumtemperatur.

Die Demonstrator-Varianten wurden am Ende gekapselt (Pellet im Gehäuse), zur experimentellen Designbewertung an die TUD übergeben und dort im Rahmen der Kurzschlussprüfung bei 80kA/Raumtemperatur sowie 80kA/85°C getestet. Die Beurteilung der Ergebnisse erfolgte anhand der nachfolgenden Bewertungskriterien:

1. Gehäuse intakt, kein Lichtbogen, niedriger Durchlasswiderstand
2. Gehäuse intakt, Lichtbogen erkennbar oder hoher Durchlasswiderstand
3. Austretender Lichtbogen erkannt, Gehäusebruch

Die nachfolgende Darstellung zeigt den Vergleich von einem sinusförmigen 80kA-Stromverlauf zwischen Varianten (DUTs) mit unterschiedlichem Sperrspannungsvermögen.

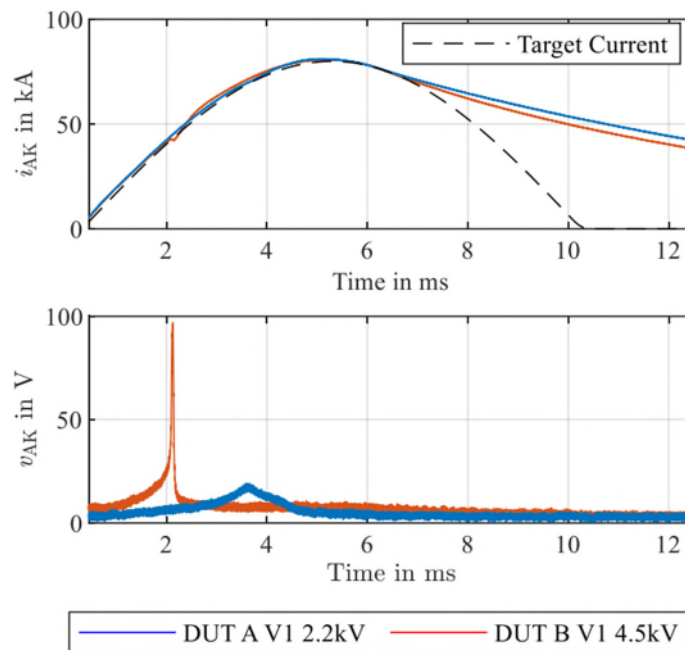


Abbildung 11: Vergleich Kurzschluss-Messung verschiedener DUTs (Variante A und B) © Technische Universität Dresden

Bei einigen Varianten kam es zu unerwünschter Lichtbogenentwicklung und Plasma-Austritt sowie Gehäusebruch im Rahmen der Kurzschlussstromprüfung.



Abbildung 12: DUTs mit Plasma-Austritt im Rahmen der Kurzschlussprüfung © Technische Universität Dresden

Die experimentelle Designbewertung von Demonstrator 1 erbrachte nachfolgendes Ergebnis:

Bewertungsmatrix										
	Gehäuse intakt, kein Lichtbogen, niedriger Durchlasswiderstand									
	Lichtbogen gesehen oder hoher Durchlasswiderstand, Gehäuse aber intakt									
	austretender Lichtbogen in Highspeedkamera erkannt / Gehäusebruch									
	80 kA Raumtemperatur					80 kA 85°C				
Variante	1. Messung	2. Messung	3. Messung	4. Messung	$U_{AK,peak}$ [V]	$I_{AK@Upeak}$ [kA]	1. Messung	2. Messung	$U_{AK,peak}$ [V]	$I_{AK@Upeak}$ [kA]
1_A	1	4	5		25	54	6	7	24	50
1_B	1	2	4	5	32	32	6	7	30	29
1_C	1	3	4		25	53	5	6	24	50
1_D	1	3	4		32	31	5	6	29	28
1_E	1	3	4		23	63	5	6	23	59
2_A	99	106	61		28	49	103	93	22	46
2_B	101	69	63		58	29	67	75	31	27
2_C	1	50	26		28	48	42	18	23	45
2_D	28	46	12		56	28	54	38	32	27
3_A	4	5			128	39	6	7	119	35
3_B	4	5			166	23	6	7	156	21
3_C	4	5			130	39	6	7	119	35
3_D	4	5			171	22	6	7	161	20
3_E	4	5			120	47	6	7	109	43
4_A	99	62			120	33	64	95	115	30
4_B	102	98			146	20	84	100	142	19
4_C	13	15			121	33	25	36	115	30
4_D	52	48			148	20	40	45	142	19

Abbildung 13: Ergebnisse Variantenvergleich nach Kurzschlussprüfung bei bei 80kA/Raumtemperatur sowie 80kA/85°C © Technische Universität Dresden

Im Anschluss daran wurden ausgewählte Bauteile der Varianten an den Projektpartner Fraunhofer IMWS zur vertiefenden Materialdiagnostik übergeben.

Die getesteten Halbleiter wurden geöffnet und im Rahmen zerstörungsfreier Analysen mittels SAM (Ultraschall), sowie anschließenden, vertiefenden



Mikrostruktur-Analysen durch Querschliff (lichtoptische Inspektion, SEM, Analyse mit EDX) untersucht. Die Ergebnisse wurden mit Standard-Bauteilen und der jeweiligen Ausgangssituation vor elektrischer Belastung verglichen.

Die nachfolgende Darstellung von SAM-Analysen an Proben vom Demonstrator 1 mit fester Verbindung ermöglicht ein sehr klares Bild über die Vorteilhaftigkeit der unterschiedlichen Designvarianten in Bezug auf das Aufschmelzverhalten im Belastungsfall.

Varianten A und C haben eine Sollbruchstelle, die von ihrer Lage her eher im Außenbereich der aktiven Fläche liegt, bei den Varianten B und D dagegen liegt die Sollbruchstelle in etwa in der Mitte der aktiven oder auch der gedruckten Fläche der Bauteile.

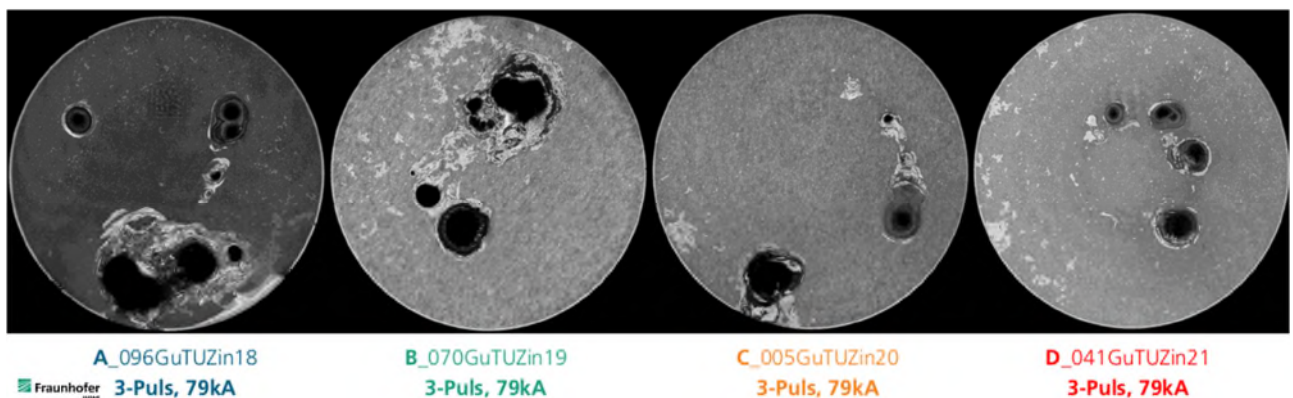


Abbildung 14: Vergleich unterschiedlicher Varianten A-D am Demonstrator mit fester Verbindung mittels SAM-Analyse © Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS

Tiefergehende Mikrostrukturanalysen durch Querschliff gaben weiter Aufschlüsse über das Materialverhalten der Demonstratoren im Schadensbereich nach der Zerstörung durch einen entsprechenden Kurzschlussstrom.

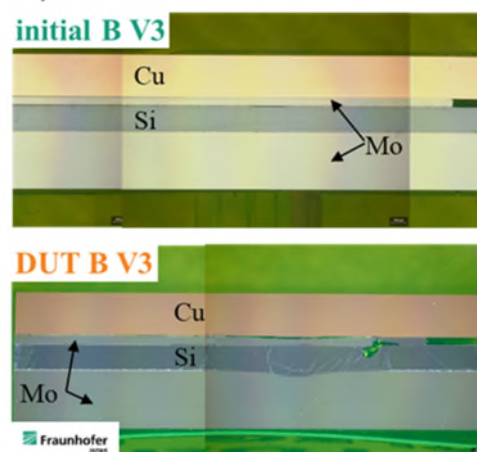


Abbildung 15: Lichtmikroskopische Querschnittsansicht des Schadensbereichs vor und nach elektrischem Test © Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS

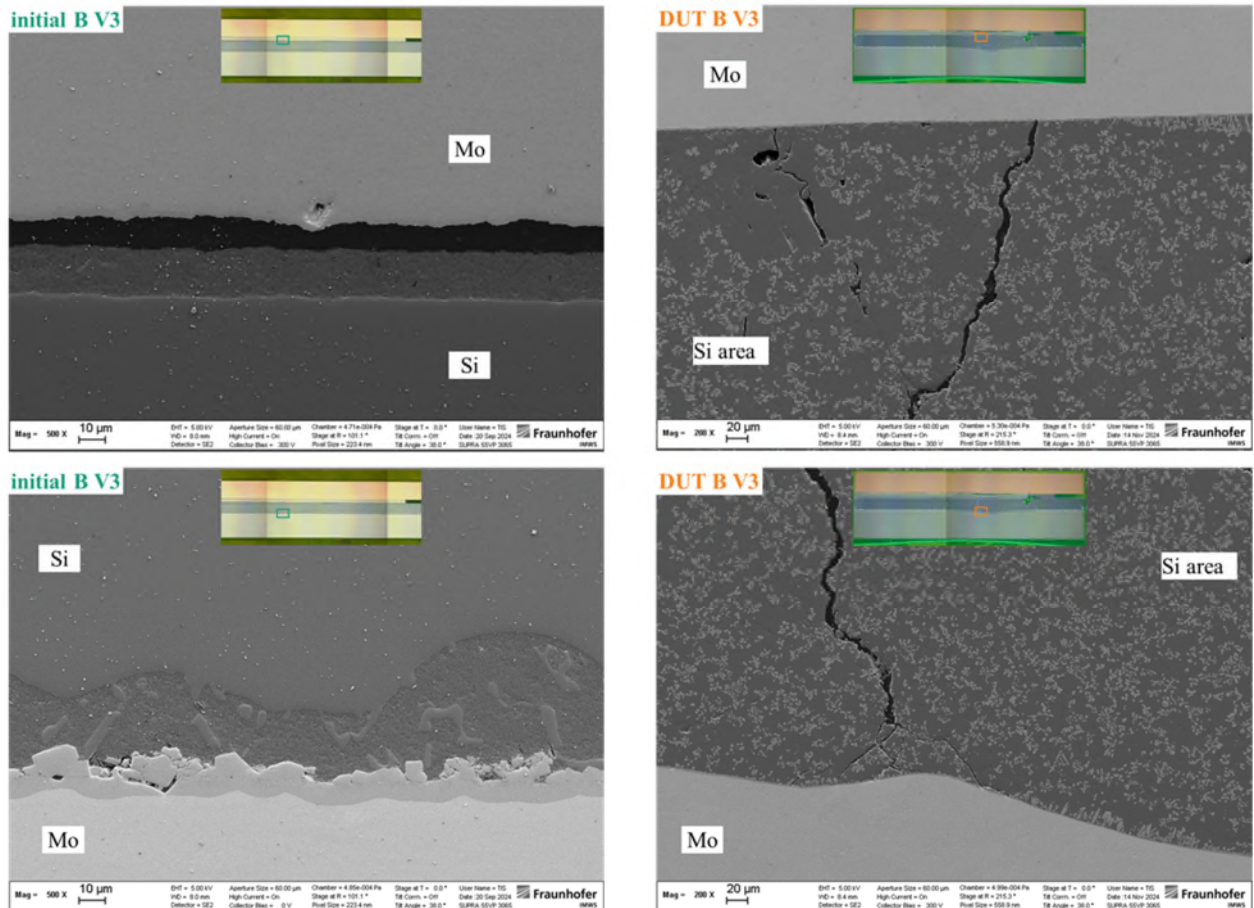


Abbildung 16: Querschnittsansicht der Grenzfläche Molybdän-Silizium und der Grenzfläche Silizium-Molybdän mittels REM-Bildgebung für Bauelemente im Ausgangszustand im Vergleich zum Prüfling

Die Ergebnisse der experimentellen Designbewertung an der TUD und der Materialanalysen durch das Fraunhofer IMWS wurden miteinander korreliert und ermöglichten folgendes Fazit zu den Varianten von Demonstrator 1:

- feste Verbindung zeigt gegenüber loser Verbindung höhere mechanische Stabilität bei Belastung mit zerstörendem Kurzschlussstoßstrom
- Varianten B, D sind als Sollbruchstelle vorteilhaft gegenüber Varianten A, C
- mechanische Sollbruchstelle bietet weitere Vorteile → Var D
- Einfluss der höheren Temperatur 85°C zu 25°C nicht eindeutig
- Größere Siliziumdicke ist nachteilig, aber notwendig wegen der Sperrspannungsanforderung
- Fest verbundene Bauteile von Variante D zeigen kein Gehäusebruch bis 80kA

Die Erkenntnisse bildeten die Basis für die **Auswahl der Zielvariante**. Für den Demonstrator 2 wurde ein Aufbau mit fester Verbindung zwischen Trägerscheibe und Silizium sowie Designvariante D gewählt. Die Projektarbeiten zur **Anpassung von Produkt- und Prozessdesign sowie Aufbau von Demonstrator 2** erfolgten im AP 2.9.

Die realisierten und gekapselten Halbleiterbauteile wurden im Anschluss ebenfalls an die TUD zur experimentellen Designbewertung übergeben, um die gewünschte



Funktion am Demonstrator 2 in Verbindung mit den neuen Gatetreibern zu erproben und abzusichern.

Danach wurden die **elektrische Charakterisierung** und die **Zuverlässigkeitsuntersuchungen** (AP 2.8) am Demonstrator 2 fortgesetzt. Für die abschließenden Kurzschlussmessungen im Hochleistungslabor wurden in applikationsnahen Schaltungskonfigurationen jeweils fünf Stacks mit der Halbleiter-Zielvariante in Dreieckschaltung und W2C-Schaltung aufgebaut.

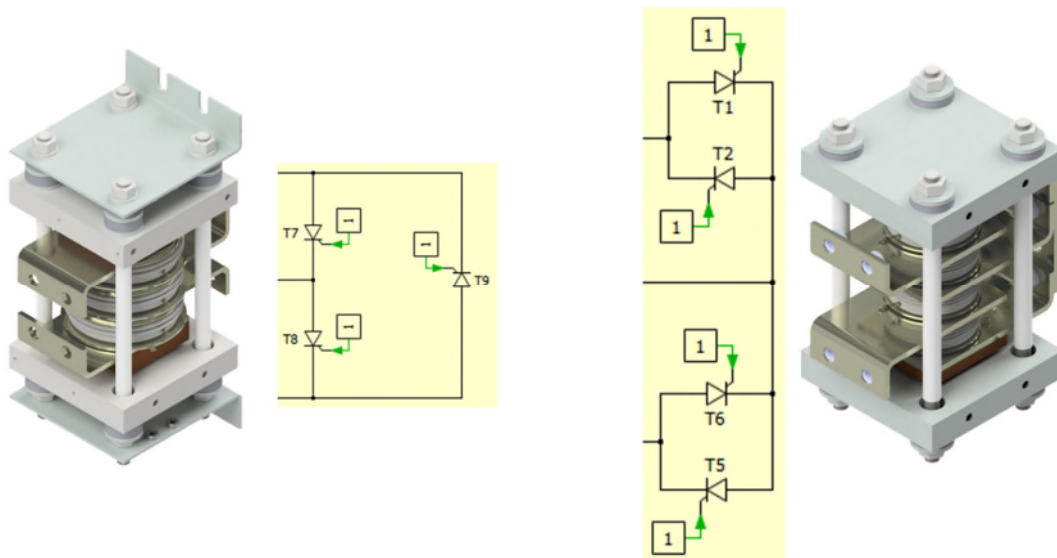


Abbildung 17: Dreieckschaltung vs. W2C-Schaltung

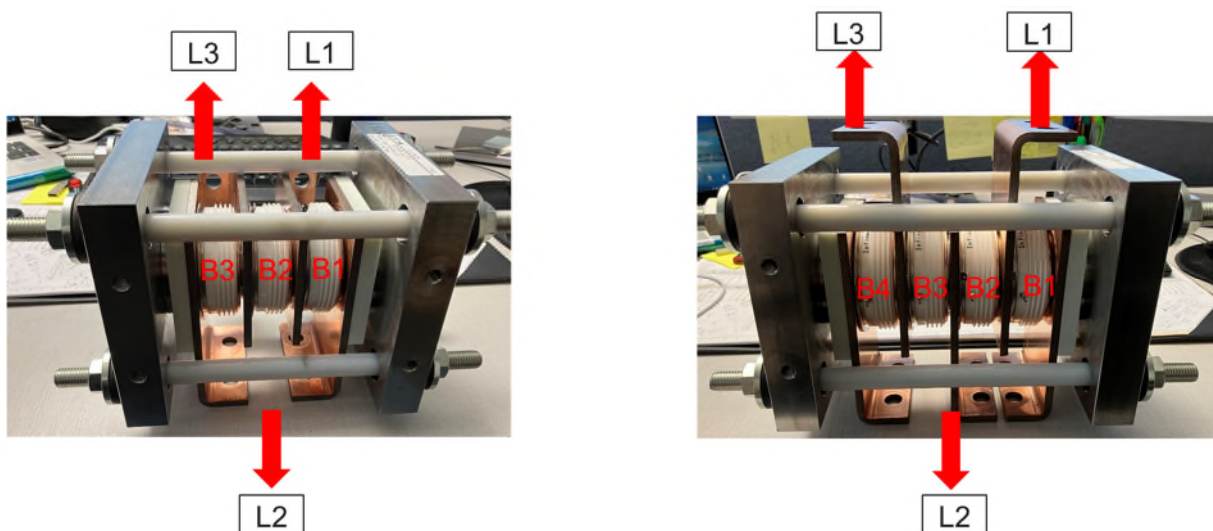


Abbildung 18: Testaufbauten in Dreieckschaltung und W2C-Schaltung

Als Testbedingungen wurden Drei-Phasen-Ströme mit 60 Grad Phasenverschiebung, Peak-Wert 80kA/60kA mit variierender Zündstelle festgelegt. Als Messwerte wurden Phasenstrom/Spannung, der Strom am DUT sowie der Gatestrom aufgezeichnet.

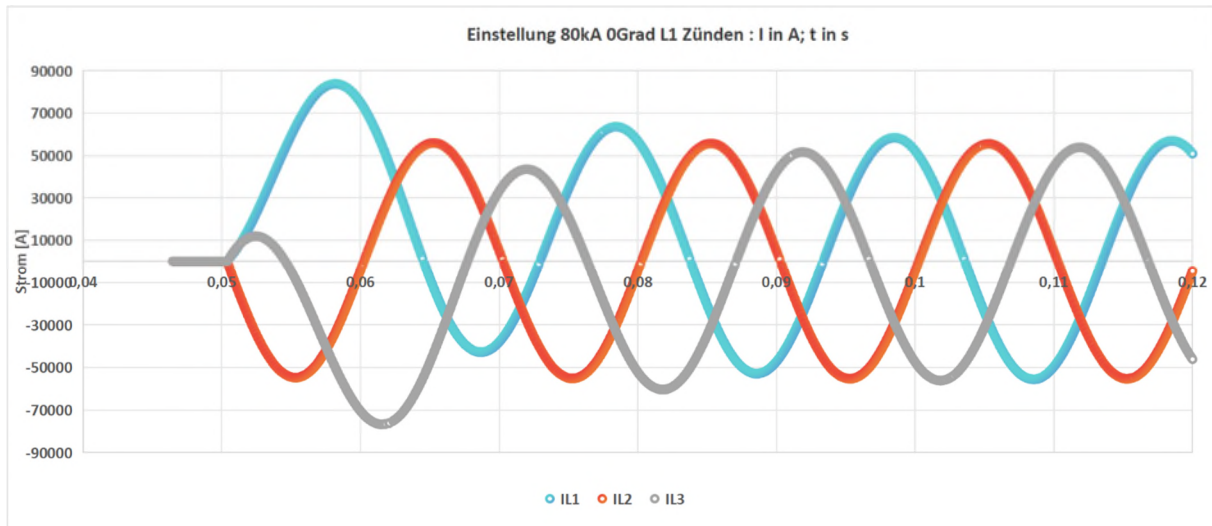


Abbildung 19: 3-Phasen-Strombelastung in der Applikation (Dreiecke Konfiguration)

Die Kurzschlussstromtests im Hochleistungslabor unter applikationsnahen Bedingungen (W2C, Δ und 3-phasigem Stromverlauf) mit einem Peakwert von 80kA haben 9 von 10 Stack-Aufbauten erfolgreich bestanden. Lediglich ein Aufbau zeigte einen Plasma-Austritt. Dieser konnte jedoch auf eine Vorschädigung des betroffenen Bauteils bei der Inbetriebnahme des Testaufbaus zurückgeführt werden.

	STACK	Strom [kA]	Zündphasenverschiebung	Bemerkung
	Serial-No.			
Dreiecke Konfiguration	70018218/4	10/80	0	Plasmaustritt B1
	70018218/5	60	0	kein Plasma
	70018218/2	60	0	kein Plasma
	70018218/1	60	60	kein Plasma
	70018218/3	60	60	kein Plasma
	STACK	Strom [kA]	Zündphasenverschiebung	Bemerkung
	Serial-No.			
W2C Konfiguration	70018219/4	80	60	kein Plasma
	70018219/2	80	60	kein Plasma
	70018219/1	80	60	kein Plasma
	70018219/3	80	0	kein Plasma
	70018219/5	80	0	kein Plasma

Abbildung 20: Überblick Testergebnisse Kurzschlussstromtests

Die zwei unterschiedlichen Schaltungskonfigurationen zeigten dabei keine signifikanten unterschiedlichen Belastungen bezogen auf die Belastung am Halbleiterbauteil.

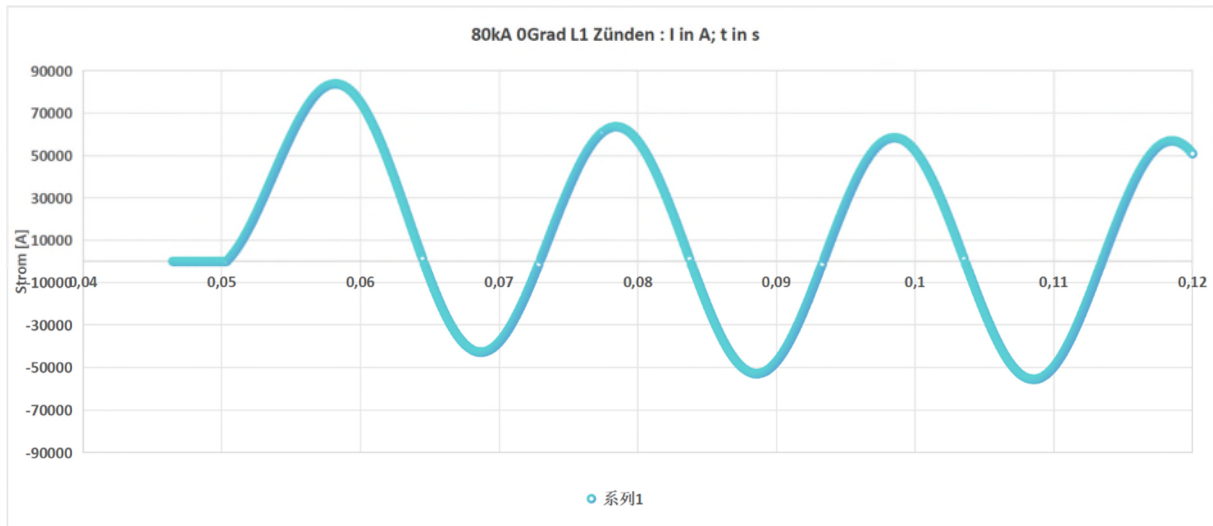


Abbildung 21: Stromverlauf der Dreieck-Konfiguration, 80kA, 0 Grad Zündverschiebung bei IL1 B1

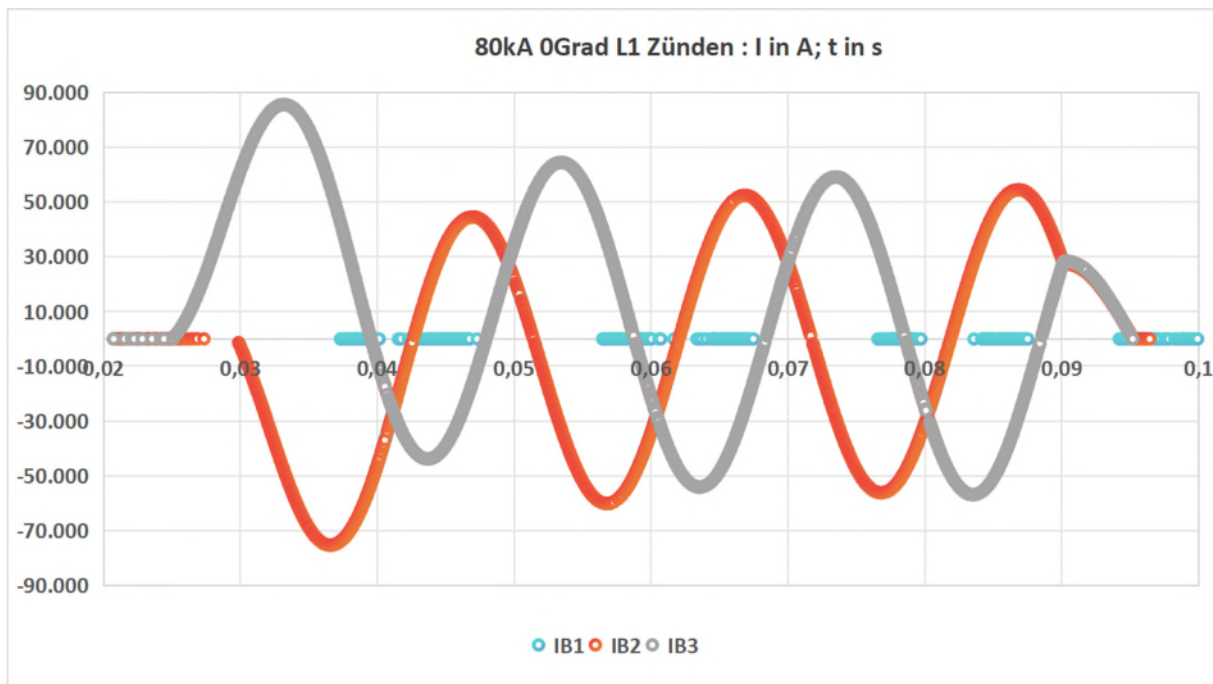


Abbildung 22: Stromverlauf W2C- Konfiguration, 80kA, 0 Grad Zündverschiebung bei IL1, B2, B3

Nach Abschluss aller Forschungsarbeiten erfolgte die **abschließende Evaluierung und Identifizierung der optimalen Designvariante für das Schutzkonzept (AP 2.10)** als Basis für zukünftige Weiterentwicklung und Ableitung von konkreten Produktfamilien.

Im Rahmen der **technischen Bewertung und dem Ausblick (AP 5)** erfolgte die Korrelation der Forschungsergebnisse sowie die Ableitung von Schlussfolgerungen. Die Zielvariante für das Schutzkonzept ist ein Bauteiltyp mit fester Verbindung in der Variante D. Dieser führt bei hoher Kurzschlussstrombelastung im Bereich bis 80kA nicht zu einem Gehäusebruch und erfüllt auch die weiteren Anforderungen an das Schutzkonzept.



Anhand der experimentellen Designbewertung durch den Projektpartner TUD und anschließende zerstörungsfreie Analysen durch das Fraunhofer IMWS konnte gezeigt werden, dass mit Variante D die Schädigung des Bauteils auf die räumlich definierten Bereiche der elektrischen und mechanischen Sollbruchstelle begrenzt werden konnte. Eine weitere Optimierung könnte mit einer Vergrößerung der Sollbruchstellen einhergehen, um die Belastungen auf das mechanische Konzept und Schädigungen zu reduzieren, aber durch die Sollbruchstelle dennoch zu begrenzen. Weitere Forschungsansätze sind außerdem alternative feste Verbindungen und deren Ausfallverhalten nach Kurzschlussstrombelastung.

2.1.3 Abgleich mit den Projektzielen

Das Projekt war bei der Generierung wissenschaftlich- technischer Ergebnisse erfolgreich, die sich zudem noch in wirtschaftlicher Hinsicht vorteilhaft anwenden lassen. Die erforschten Konzepte haben gezeigt, dass ein halbleiterbasiertes Schutzkonzept realisiert werden kann, welches im Störfall die Erzeugung eines definierten Kurzschlusses innerhalb von $< 100\mu\text{s}$ ermöglicht. Die Dauerhaftigkeit des Kurzschlusses während des Fehlerfalls konnte sichergestellt werden und ein kritischer Gehäusebruch bei bis zu $225 \cdot 10^6 \text{ A}^2\text{s}$ und einem Maximalstrom von 80kA verhindert werden. Die Systemkosten können reduziert werden und die Systemverfügbarkeit, Sicherheit und Reduzierung der Instandsetzungsaufwendungen im Fehlerfall verbessert werden.

Darüber hinaus wurde im Rahmen des Projektes ein geeignetes Messkonzept für die neuartigen Bauteile erprobt sowie eine neuartige, mehrkanaligen Treiberschaltung, die für sicherheitskritische Anwendungen vorbereitet ist, entwickelt und auch erfolgreich getestet.

Zusätzlich ergaben sich Nebenergebnisse und gesammelte Erfahrungen:

Es wurden neue Erkenntnisse über das Ausfallverhalten nach Hochstrombelastung in Bezug auf die Defektausbreitung im Halbleiter, sowie über die Schaltungstopologien W2C und Dreieck im Rahmen der Kurzschlussstromuntersuchungen gewonnen. Durch die Forschungsarbeiten konnten Optimierungspotenziale des aktuellen Konzeptes am Demonstrator identifiziert werden. Diese bilden die Ansatzpunkte für die Weiterentwicklung des Schutzkonzeptes und einer konkreten Produktentwicklung.

2.2 Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der Gesamtaufwand von Infineon Bipolar wurde detailliert im Verwendungsnachweis direkt an den PTJ berichtet.

Darin genannte wesentliche Positionen sind:

Personalkosten:	704 TEUR
Material:	160 TEUR
Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten:	141 TEUR

Die Personalkosten für die beteiligten Mitarbeiter waren die wichtigste Position im Teilvorhaben.

Aufgrund unerwarteter Herausforderungen bei der Entwicklung einer geeigneten,



mehrkanaligen Treiberstufe ergaben sich Mehraufwände für die Treiberentwicklung, da das ursprüngliche Konzept verworfen werden musste und im Folgenden zwei alternative Treiberkonzepte parallel realisiert und evaluiert werden mussten, um den erfolgreichen Abschluss des Vorhabens absichern zu können.

Da die elektrischen Tests mit neu entwickelten Treiberstufen wiederholt werden mussten und ein zusätzliches Konzept zu testen war, wurden insgesamt mehr Halbleiterbauelemente für Tests benötigt als ursprünglich geplant.

Aufgrund dieser notwendigen Anpassungen und Arbeiten haben sich die Aufwände gegenüber dem Antrag erhöht.

Wie im Verwendungsnachweis im Detail dargelegt, wurde der Finanzierungsplan bei diesem Vorhaben in Summe daher leicht überschritten.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Für die Erforschung des neuartigen, halbleiterbasierten Schutzkonzepts waren umfangreiche Arbeiten in der Simulation, dem Design, der mechanischen Konstruktion notwendig. In verschiedenen Lernschleifen wurden Zwischenlösungen angepasst und unter Berücksichtigung der Anforderungen der im Projekt betrachteten Anwendung bzw. Leistungsklasse verbessert.

Wie im Detail in den Berichten zu den einzelnen Ergebnissen ausgeführt ist, konnten viele der Arbeiten erst durch die Diskussion mit den Verbundpartnern und den Austausch der Forschungsergebnisse so fokussiert bzw. neu ausgerichtet werden, dass die angestrebten Projektziele erreicht werden konnten.

In Verbindung mit dem Muster-Aufbau und der Durchführung von elektrischen Tests, hier vor allem der sehr aufwändigen Stoßstromtests mit dazugehöriger Vorbereitung von allen, aber auch in anderen Bereichen, erlaubte die Förderung eine Tiefe der wissenschaftlichen Untersuchung, wie sie ohne diese Unterstützung nur schwer realisierbar gewesen wäre. Durch die Unterstützung war es vertretbar, die geplanten Arbeiten trotz technisch-wissenschaftlicher Risiken durchzuführen und sie milderte im Projektverlauf auch die Auswirkungen der unerwarteten Schwierigkeiten und Mehraufwände bei der Identifikation einer geeigneten Treiberlösung für das neue Schutzkonzept ab. Ohne die Zuwendungen hätte das Vorhaben nicht im notwendigen Umfang und der kurzen Zeit durchgeführt werden können. Ebenso erleichterte die Förderung die Abstimmung der Anforderungen vom Halbleiterbauelement bis auf die System-Ebene, wodurch die Lösungen angepasst und optimiert werden konnten. Dafür war eine wichtige Voraussetzung die Zusammenarbeit mit den verschiedenen Projektpartnern und der Austausch von elektrischen Test-Ergebnissen und Erkenntnissen der Materialanalyse untereinander.

IFBIP ist daher überzeugt, dass die geleisteten Arbeiten und die Aufwände im Projekt in einem angemessenen Verhältnis zu den Ergebnissen stehen. Darüber hinaus war auch der hohe Eigenanteil von 60% ein Garant dafür, dass keine Aufwände getätigt wurden, welche den Vorhabenzielen von IFBIP nicht dienlich gewesen wären.

2.4 Verwertbarkeit und Nutzen der Ergebnisse

Das Vorhaben hat erfolgreich Erfindungen und Schutzrechte entwickelt, die eine standortbezogene Verwertung ermöglichen. Die angestrebten Schutzrechte und Lizenzen bieten eine gute Grundlage für die weitere Verwertung der Erfindungen. Im



Rahmen des Projektes wurde eine Schutzrechtsanmeldung zum Halbleiterbauelement mit Schutzfunktion eingereicht und offengelegt. Die Anmeldung wurde ebenfalls international in der EU, CN und den USA eingereicht und ist derzeit in Bearbeitung.

Die Ergebnisse des Projektes haben ein hohes Verwertungspotential, insbesondere im Bereich der Erneuerbaren Energien. IFBIP plant, die erforschten Innovationen in konkrete Prototypen- und Produktentwicklungen (2025-2026) und Serienprodukte sowie Produktfamilien (> 2026) für die applikationsspezifischen Spannungs- und Leistungsbereiche zu überführen und global zu vermarkten. Dabei geht es um relevante Applikationen aus den Bereichen Photovoltaik (PV), Wind onshore und offshore, Niederspannungs-Verteilnetze und Wasserstoff-Elektrolyse.

Während der Projektlaufzeit sowie unmittelbar im Anschluss (+ 1 Jahr) daran wurde und wird das mit den Partnern erarbeitete neue Wissen an die relevanten F&E-Abteilungen weitergegeben, um über ein verbessertes Systemverständnis zukünftige Komponentenentwicklungen positiv zu beeinflussen. Nach der Projektlaufzeit (1-3 Jahre) ist die Nutzung der veröffentlichten Forschungsergebnisse, insbesondere auch durch die Veröffentlichung zur ECCE Europe 2025 getrieben, zur Vermarktung des Schutzkonzepts in Kundengesprächen sowie auf Fachkonferenzen und -messen geplant.

In Bezug auf die elektrischen und mechanischen Limitierungen im Betrieb konnten nicht alle anwendungsrelevanten Fragestellungen umfassend im Projekt beleuchtet werden.

Hieraus ergibt sich weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Zur Weiterentwicklung und Optimierung des Konzepts, ggf. auch im Rahmen einer weiterführenden Forschungsk Kooperation, wird diese Option derzeit mit verschiedenen Applikationspartnern evaluiert.

Das Projekt bietet nicht nur ein hohes wirtschaftliches Verwertungspotential, sondern auch die Chance, Arbeitsplätze in Forschung, Entwicklung und Fertigung in Warstein (Halbleiterwicklung und -Herstellung) sowie in Cegléd/Ungarn zu sichern. Die Volumenfertigung und fertigungsbegleitende Weiterentwicklungen der Schutzkomponenten und Systemlösungen (Power-Stacks) werden überwiegend am Standort Warstein erfolgen.

Die Ergebnisse des Projektes werden in den kommenden Jahren weiter vermarktet und veröffentlicht, um die Verwertung des Schutzkonzepts zu fördern.

2.5 Fortschritt auf dem Gebiet, während des Vorhabens bei anderen Stellen

Während des Projektverlaufs wurde eine neue Aktivität bekannt, die sich mit dem im Projekt verfolgten halbleiterbasierten Schutzkonzept auseinandersetzt.

Im Rahmen eines Whitepapers¹ von Littelfuse (Littelfuse, 2023), Hersteller von Technologien in den Bereichen Stromkreisschutz und Leistungshalbleiter wurde 2023 ein Schutzkonzept vorgestellt, welches den Einsatz von Standard-Thyristoren zur

¹ Vergl. Littelfuse 2023: How to Design Crowbar Protection in High-power Applications



Erzeugung eines definierten Kurzschlusses beschreibt. Darin werden die Halbleiter so ausgelegt, dass sie bei der Belastung zerstört werden, aber kein Gehäusebruch auftritt. Die in der Veröffentlichung beschriebenen Maßnahmen zur Erhöhung der Leistungsdichte fokussieren sich jedoch auf die Optimierung des Halbleitergehäuses, um einen Gehäusebruch in Vorwärtsrichtung zu vermeiden, wohingegen im Projekt GreenGridGuard der Ansatz verfolgt wurde, die angestrebte Schutzfunktion im Halbleiterbauelement selbst zu realisieren.

Daher besitzt das gesamte Vorhaben aus unserer Sicht weiterhin ein Alleinstellungsmerkmal, welches sich aus dem hohen technischen Anspruch und dem einzigartigen Ansatz des Konzepts begründet.

Insgesamt zeigt die Veröffentlichung von Littelfuse, dass die Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der halbleiterbasierten Schutzkonzepte weiter voranschreitet und konkrete Fortschritte erzielt werden. Das Projekt GreenGridGuard liefert somit für die Weiterentwicklung von Schutzkonzepten für Stromnetze einen wichtigen Beitrag.

2.6 Erfolgte Veröffentlichungen der Ergebnisse

Im Rahmen des Projektes wurde folgende Schutzrechtsanmeldung zum Halbleiterbauelement mit nachfolgender Kennung und Beschreibung eingereicht:

DE 10 2022 120 612 A1² (Deutschland Patentnr. DE 10 2022 120 612 A1, 2024): Die Erfindung betrifft ein Halbleiterbauelement, insbesondere ein Halbleiterbauelement zum Schutz eines Umrichters im Falle eines Störfalls.

Die Offenlegung erfolgte am 22.02.2024.

Die Schutzrechtsanmeldung erfolgte ebenfalls international in der EU, CN und den USA und ist derzeit in Bearbeitung.

Eine gemeinsame Veröffentlichung wurde für die ECCE (Energy Conversion Congress & Expo) Europe 2025 in Birmingham mit dem Titel 'Enhancing Inverter Safety with Novel Semiconductor Devices: An Experimental Evaluation' erarbeitet und eingereicht. Die Veröffentlichung wurde angenommen und wird im Rahmen eines Vortrages präsentiert werden.

Wesentlich Ergebnisse zu den Arbeiten in diesem und den übrigen Teilvorhaben zum Verbundvorhaben werden im Jahr 2025 über die Technische Informationsbibliothek, Deutsche Forschungsberichte in Hannover in den Schlussberichten zum Vorhaben veröffentlicht.

² <https://web.ip7.tech/app/detailview/index/DE102022120612>



3 Literaturverzeichnis und Verweise

Wikström, T., Baumann, R., Populoh, S., & Oedegard, B. (2018). *Europa Patentnr. EP3646376B1*.

Kellner-Werdehausen, U., Stelte, M., Droidner, M., Pikorz, D., Weidner, P., Barthelmess, R., . . . Przybilla, J. (2018). *Deutschland Patentnr. DE102018102234B4*.

Schenk, M., Barthelmess, R., Weidner, P., Pikorz, D., Droidner, M., Stelte, M., . . . Przybilla, J. (2019). *Deutschland Patentnr. DE102019124695A1*.

Lutz, J., Schlangenotto, H., Scheuermann, U., & De Doncker, R. (2018). *Semiconductor Power Devices*. Springer.

Wikström, T., & Oedegard, B. (2019). An 8.5kV Sacrificial Bypass Thyristor. *Proceedings of the 31st International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs*.

Kellner-Werdehausen, U., Sommer, S., Drilling, C., Droidner, M., & Stelte, M. (2024). *Deutschland Patentnr. DE 10 2022 120 612 A1*. Von <https://web.ip7.tech/app/detailview/index/DE102022120612> abgerufen

Littelfuse. (2023). *How to design crowbar protection in high-power applications*. Von <https://www.littelfuse.com/assetdocs/how-to-design-crowbar-protection-in-high-power-applications?assetguid=62ede520-1813-40e8-a9d6-5ac1a14bcb43> abgerufen



4 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Grafische Darstellung des Schutzkonzepts	2
Abbildung 2: Aufbau einer Thyristorscheibenzelle	7
Abbildung 3: Schaubild zur Zusammenarbeit der Partner	9
Abbildung 4: Grafische Darstellung des Schutzkonzepts	10
Abbildung 5: a) lose Verbindung b) feste Verbindung	13
Abbildung 6: Blockdiagramm der Signalketten	14
Abbildung 7: Vergleich linearer Gate-Treiber (TU Dresden) vs. Gate-Treiber mit Sperrwandlerprinzip.....	15
Abbildung 8: Vergleichende Messungen am Gate-Strom im Kurzschluss-Event.....	16
Abbildung 9: Vergleichende Messungen am Gate-Strom mit angeschlossenen Thyristor.....	16
Abbildung 10: Übersicht Varianten Demonstrator 1.....	18
Abbildung 11: Vergleich Kurzschluss-Messung verschiedener DUTs (Variante A und B) © Technische Universität Dresden.....	19
Abbildung 12: DUTs mit Plasma-Austritt im Rahmen der Kurzschlussprüfung © Technische Universität Dresden.....	20
Abbildung 13: Ergebnisse Variantenvergleich nach Kurzschlussprüfung bei bei 80kA/Raumtemperatur sowie 80kA/85°C © Technische Universität Dresden	20
Abbildung 14: Vergleich unterschiedlicher Varianten A-D am Demonstrator mit fester Verbindung mittels SAM-Analyse © Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS.....	21
Abbildung 15: Lichtmikroskopische Querschnittsansicht des Schadensbereichs vor und nach elektrischem Test © Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS.....	21
Abbildung 16: Querschnittsansicht der Grenzfläche Molybdän-Silizium und der Grenzfläche Silizium-Molybdän mittels REM-Bildgebung für Bauelemente im Ausgangszustand im Vergleich zum Prüfling.....	22
Abbildung 17: Dreieckschaltung vs. W2C-Schaltung.....	23
Abbildung 18: Testaufbauten in Dreieckschaltung und W2C-Schaltung	23
Abbildung 19: 3-Phasen-Strombelastung in der Applikation.....	24
Abbildung 20: Überblick Testergebnisse Kurzschlussstromtests.....	24
Abbildung 21: Stromverlauf der Dreieck-Konfiguration, 80kA, 0 Grad Zündverschiebung bei IL1 B1	25
Abbildung 22: Stromverlauf W2C- Konfiguration, 80kA, 0 Grad Zündverschiebung bei IL1, B2 ,B3.....	25