

# Schnellste mechanische Schaltgeräte zur selektiven Abschaltung in DC-Netzen (FASS)

## **TU Ilmenau**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Berger  
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Dr. h. c. Peter Schaaf  
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Thomas Hotz  
M. Sc. Maximilian Schima  
Dipl.-Wirtsch.-Ing. Matthias Streck  
Dipl.-Ing. Marcus Hopfeld  
M. Sc. Matthias Glock

## **E-T-A GmbH**

Dr.-Ing. Hendrik Köpf  
Dipl.-Ing. Stefan Holbe  
M. Sc. Julian Kaiser

## **Physikalisch-Technische Bundesanstalt**

Dr.-Ing. Xiaofei Guo  
Dr.-Ing. Florian Schilling

26. Juli 2024

Förderkennzeichen: 03EI6005E

Projektträger: Forschungszentrum Jülich (GmbH)

Intelligente Transport- und Verteilnetze, Stromspeichertechnologien

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Einleitung</b>	<b>4</b>
<b>Arbeitspaket 1</b>	<b>5</b>
1.1 Literatur- und Patentstudium . . . . .	5
<b>Arbeitspaket 2</b>	<b>7</b>
2.1 Analyse von kommerziell erhältlichen DC-Schaltgeräten mit fremd- und eigenerregtem Magnetfeld . . . . .	7
2.2 Aufbau eines DC-Prüffeldes . . . . .	9
2.3 Anpassung des Modellschalters . . . . .	10
2.4 Entwicklung und Planung einer Anlage zur variablen Magnetfelderzeugung . . . . .	11
2.5 Aufbau der Messtechnik für die Prüfanlage . . . . .	13
2.5.1 Definition der technischen Randbedingungen . . . . .	13
2.5.2 Aufbau einer mobilen Stoßstromkalibriereinrichtung . . . . .	14
2.5.3 Aufbau einer mobilen Kalibriereinrichtung für Spannungssprünge . . . . .	16
2.5.4 Referenzspannungsteiler . . . . .	19
2.5.5 Strommesseinrichtung . . . . .	19
2.5.6 Charakterisierung der Messeinrichtungen . . . . .	21
2.5.7 Spannungsmesseinrichtung . . . . .	21
2.5.8 Charakterisierung der Messeinrichtungen . . . . .	22
2.6 Bestimmung der Energie der kombinierten Gleich- und Impulsmesswerte . . . . .	23
2.7 Beschaffung und Inbetriebnahme eines 3D-Profilometers . . . . .	23
<b>Arbeitspaket 3</b>	<b>27</b>
3.1 Versuchsplanung . . . . .	27
3.2 Einfluss des Kontaktwerkstoffes auf die Verharrdauer des Lichtbogens auf den Kontaktoberflächen (neue Kontakte) . . . . .	28
3.3 Einfluss des Kontaktmaterials auf das Lichtbogenlaufverhalten des beblasenen Bogens bei höheren Schaltzahlen (beschaltete Kontaktoberfläche) . . . . .	30
3.4 Referenzuntersuchungen an Bogensäule und Lichtbogenfußpunkten im Modellschalter ohne Magnetfeld (Strom- und Spannungsvariationen) . . . . .	30
3.5 Untersuchung der Lichtbogenfußpunkte in Abhängigkeit vom Magnetfeld . . . . .	32
3.6 Statistische Datenanalyse und Modellidentifikation . . . . .	34
3.7 Optimierung des Magnetfeldes für Ausschaltvorgänge (x, y, z-Komponente, B-Feld)	37
<b>Arbeitspaket 4</b>	<b>38</b>
4.1 Entwicklung eines parametrischen Werkstoffmodells zum DC-Lichtbogenlaufverhalten	38
4.1.1 Werkstoffanalysen verschiedener Werkstoffe für Modellschalterexperimente	38
4.1.2 Übersichtliche Darstellung und Parameterextraktion der geometrischen und topographischen Daten . . . . .	40
4.1.3 Korrelationen von elektrischen und werkstoffbasierten Daten . . . . .	40
4.2 Numerische Simulation der Magnetfeldverteilung des Modellschalters . . . . .	51

4.3	Numerische Simulation der Magnetfeldverteilung des Modellschalters mit Lichtbogen	52
4.4	Numerische Simulation des schaltgerätenahen Prototyps mit Parameterstudien	53
<b>Arbeitspaket 5</b>		<b>55</b>
5.1	Definition der technischen Randbedingungen	55
5.2	Erstellung eines Pflichtenheftes des Schaltgerätes	55
5.3	Inbetriebnahme der experimentellen Versuchsaufbauten	55
5.4	Entwicklung eines Demonstratorschaltgerätes für $U_{\text{nenn}}$ bis 850 V DC durch optimale Magnetfeldbeeinflussung	55
5.5	Entwicklung eines Demonstrators mit integrierter Magnetfelderzeugung	56
<b>Anhang</b>		<b>57</b>
7.6	Literatur	57
7.7	Patente	67

# Einleitung

Das Verbundprojekt „Fast and selective switching“ (FASS) verfolgte das Forschungsvorhaben, die Entwicklung von schnellsten mechanischen Schaltgeräten zur selektiven Abschaltung in DC-Netzen voranzutreiben. Zielstellung war die Überführung des etablierten Schaltkonzeptes von mechanischen Schaltgeräten der AC-Ebene in die DC-Ebene zur Erfüllung der neuen und hohen Anforderungen der zukünftigen DC-Netze im Niederspannungsbereich. Auch in diesen neuen Systemen zur Energieverteilung soll durch die zu entwickelnden Schaltgeräte ein hohes Maß an Verfügbarkeit der Elektroenergie erreicht werden, indem nur fehlerbehaftete Teilbereiche schnellstmöglich abgeschaltet werden. Dadurch wird neben der hohen Versorgungssicherheit auch die notwendige Sicherheit im Betrieb dieser Netze erreicht. Dies sind zwei Schlüsselaspekte, um die DC-Systeme zur Verteilung der Elektroenergie realisieren zu können. Für die industrielle Produktion bieten DC-Systeme im Vergleich zu AC-Systemen eine Reihe von Vorteilen, welche auch die Zielstellungen der Energiepolitik Deutschlands darstellen. So ermöglichen DC-Systeme eine deutliche Steigerung der Energieeffizienz durch eine Reduktion an Wandlungsstufen und eine deutliche Erleichterung von Energierückgewinnung, z. B. aus abzubremsenden Antrieben. Darüber hinaus ist auch die Einbindung von erneuerbaren Energiequellen sowie von Speicherelementen signifikant einfacher und effizienter, da in beiden Fällen die typischen Anlagen bereits originär auf Gleichstrom basieren. In diesem Forschungsprojekt wurden die Kompetenzen der Technischen Universität Ilmenau, der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) und der Firma Elektrotechnische Apparate GmbH (E-T-A) gebündelt, um die Entwicklungsarbeiten an mechanischen DC-Schaltgeräten voranzutreiben. Grundlage an der Technischen Universität Ilmenau bildete das langjährige Kompetenzzentrum Elektrische Kontakte Ilmenau (KEKI). Hierin findet schon seit 2013 die Kombination der Kompetenzen aus den Bereichen Schaltgeräteforschung, Modellschalteruntersuchungen und Materialwissenschaften statt. Hinzu kam für das Verbundprojekt das Kompetenzfeld der mathematischen Statistik sowohl zur optimierten Versuchsplanung, als auch zur statistischen Auswertung der Ergebnisse. Unterstützung für den großen Bereich Messtechnik wurde durch die Physikalisch-Technische Bundesanstalt geleistet. Die so im Verbund auf der Grundlage von Schaltversuchen und Materialanalytik generierten Erkenntnisse flankierten die Entwicklung eines Schaltgerätedemonstrators durch die Firma E-T-A.

# Arbeitspaket 1

## 1.1 Literatur- und Patentstudium

Ziel des Arbeitspaketes war es einen Überblick bzw. eine Basis über die aktuellen internationalen Erkenntnisse zum Projektgegenstand zu ermitteln. Dies erforderte die laufende Aktualisierung sowohl des Standes des Wissens in der Literatur und auf Fachtagungen, als auch eine stetige Beobachtung der Patentsituation. Für eine solche strukturierte Literatur- und Patentrecherche wurden zu Beginn des Projektes, basierend auf dem Stand zu Projektbeginn und unter Bezug auf bekannte Tagungsbeiträge, Zeitschriftenbeiträge und Normen, Schlagworte diskutiert und zusammengestellt. Auf dieser Grundlage erfolgte eine stetige strukturierte Recherche in Literatur und Patentdatenbanken. Die Patentrecherche wurde dabei durch das Landespatentzentrum Thüringen (PATON) an der Technischen Universität Ilmenau durchgeführt. Für die Ablage und die Strukturierung der Ergebnisse aus der Literaturrecherche wurde initial eine Citavi-Datenbank erstellt, die unter der Leitung der Technischen Universität Ilmenau im Projektverlauf gepflegt und erweitert wurde.

Die Struktur der Datenbank wurde durch die Recherche kontinuierlich angepasst. Die Grundstruktur ergab sich jedoch aus den Zielfragestellungen zu den Themen Lichtbogenzündung, -wanderung, -löschung sowie die Beeinflussung durch Magnetfelder. Weitere Aspekte der Recherche waren Fragestellungen in Bezug auf Kontaktmaterialien, wie Kontaktwiderstand und -erosion. Basierend auf diesen Hauptfragestellungen, wurde im Rahmen von Diskussionen, insbesondere bei den Projekttreffen, eine Schärfung der Recherche vorgenommen. Das bedeutete, dass ausgewählte Fragestellungen vertieft wurden. Eine dieser Hauptfragestellungen war es, den Ausschaltvorgang und die damit einhergehende Unterteilung des Schaltvorganges in mehrere Phasen zu untersuchen. Für die jeweiligen Phasen wurden, basierend auf der Recherche, einheitliche Definitionen festgelegt. Diese Definitionen umfassen Details zur Bewegung des Lichtbogens, zum Verhalten der Fußpunkte, zur Beeinflussung durch äußere Einflüsse, wie z. B. ein Magnetfeld sowie typische Zeitbegriffe zur Beschreibung der Phasen, Geschwindigkeit des Lichtbogens und dem Verlauf der Spannung. Namentlich sind dabei folgende Phasen benannt worden: Lichtbogenzündungs- und Expansionsphase, Instabilitätsphase mit teilweiser kontinuierlicher Bewegung, Kommutierungs- und Lichtbogenverlöschungsphase. Es wurden noch weitere kleine Phasenunterteilungen festgehalten, die jedoch nur diskutiert und in diesem Projekt noch nicht weiter analysiert wurden. Dies ist aber bereits in Folgeprojekten und Qualifizierungsarbeiten geplant.

Zusätzlich zur Literaturrecherche, die der Vertiefung der theoretischen Grundlagen diene, wurde auch eine Analyse des aktuellen Standes der Technik durchgeführt. In Zusammenarbeit mit der E-T-A wurden verschiedene DC-Schaltkonzepte recherchiert und diskutiert. Dafür wurden Veröffentlichungen, Patente und kommerziell erhältliche Schaltgeräte genutzt.

Die verschiedenen Schaltkonzepte unterteilen sich nach:

Konzept a - hermetisch gekapselt, gasgefüllt, mit Permanentmagnet

Konzept b - gekapselt, luftgefüllt, mit Permanentmagnet

Konzept c - luftgefüllt, mit Ausblasung und Löschkammer

Konzept d - gekapselt, luftgefüllt, ohne Permanentmagnet

Konzept e - Hybridschalter

Konzept f - elektronischer Schalter.

Neben der initialen Patentrecherche wurden begleitende Patentrecherchen während der gesamten Projektlaufzeit durchgeführt. Zum einen handelte es sich hierbei um Recherchen, die einen Überblick über die aktuellen Entwicklungen während des Projektes geben sollten und zum anderen wurden Recherchen in Auftrag gegeben, um spezielle Schalt- und Löschrinzipien zu finden und deren Umsetzung zu analysieren. Da ein Forschungsschwerpunkt auf der magnetischen Beeinflussung des Lichtbogens lag, wurde eine darauf ausgerichtete Recherche in Auftrag gegeben. Gleiches wurde auch in Bezug auf Kontaktwerkstoffe durchgeführt. Die in Form von Exceltabellen erhaltenen Patentrecherchen wurden nach Relevanz sortiert. Die relevantesten Patente wurden nach der Analyse vorgestellt und in der Datenbank abgelegt. Sowohl die Excellisten als auch die Auswertung wurde den Projektpartnern zur Verfügung gestellt.

Eine Auflistung der Literatur und ein Ausschnitt aus der Patentanalyse ist dem Anhang zu entnehmen.

Als Grundlage der kooperativen Zusammenarbeit im Rahmen dieses Verbundprojektes wurde an der Technischen Universität Ilmenau ein Projekt-Sharepoint eingerichtet und über die gesamte Laufzeit erweitert und gepflegt. Auf diesem Sharepoint haben alle Projektpartner Zugriff. Eine wesentliche Funktion des Sharepoints war neben der gemeinsamen Bearbeitung von Dokumenten vor allem die strukturierte Ablage von Dokumenten. So wurden die Ergebnisse der stetigen Literatur- und Patentrecherche auf diesem Sharepoint abgelegt. Auch nach Ende der Projektlaufzeit stehen die hier abgelegten Dokumente allen Projektpartner weiterhin zur Verfügung.

Für die sehr speicherplatzintensive Ablage von Messdaten wurde an der Technischen Universität Ilmenau eigens ein großvolumiger Netzwerkspeicher aufgebaut und gepflegt. Mit der Unterstützung des Rechenzentrums der Technischen Universität Ilmenau erfolgte zunächst die Erstellung eines Konzeptes für das Datenspeichersystem einschließlich der Backup-Lösung. Anschließend wurden entsprechende Laufwerke beschafft und der Speicher realisiert. Es folgte die Einrichtung als Fileserver und die Einbindung in das Netzwerk der Universität.

# Arbeitspaket 2

## 2.1 Analyse von kommerziell erhältlichen DC-Schaltgeräten mit fremd- und eigenerregtem Magnetfeld

In diesem Arbeitspaket sollte der technische Stand der kommerziell erhältlichen Schaltgeräte erfasst werden. Hierfür wurden wie in Arbeitspaket 1 bereits erwähnt, verschiedene Schaltgeräte ausgewählt und bestellt. In einer ersten Analyse wurden diese Stück für Stück zerlegt, fotografiert, ausgemessen und in Steckbriefen dokumentiert. Neben der Erfassung der Geometrie des Schaltgerätes wurde auch die magnetische Blaseinrichtung mit einer Hall-Sonde in ihrer Stärke und Ausrichtung gemessen. Nicht nur die magnetische Flussdichte direkt am Magnet wurde gemessen, sondern auch die Höhe des magnetischen Feldes an verschiedenen Punkten, wie zwischen den Kontakten oder in den Löschblechen. Aus konstruktiver Sicht gab es auch ein Schaltgerät, welches keinen Permanentmagneten aufwies. Dafür wurde in diesem Schaltgerät das Kontaktsystem direkt vor den Löschblechen geöffnet. Zudem wurde bei den vorhandenen Schützen eine Federkraftmessung der im Kontaktsystem vorhandenen Federn durchgeführt.

Die Hauptanalyse lag in der Beschaltung der Geräte bei verschiedenen Spannungen, Strömen und Lasten, um so deren Leistungsfähigkeit zu ermitteln. Dafür wurde eigens ein DC-Prüffeld aufgebaut. Dies wird in AP. 2.2 beschrieben.

Tabelle 2.1: Schaltmatrix der kommerziellen Schaltgeräte

	Schutzschalter	Lasttrenner	Schütz
<b>Strom in A</b>	16, 32, 64, 128, 256, 500		
<b>Spannung in V (DC)</b>	220		
<b>Zeitkonstante in ms</b>	1 & 0		

Die elektrische Messdatenerfassung umfasste die Geschwindigkeit der Lichtbogenlöschung, Kommutierungsgeschwindigkeit, Schaltarbeit und  $I^2t$  (Auswertung der Daten wie in AP. 3.6). Aus Erfahrungswerten wurde bei einigen Schaltgeräten ein Turboloch erwartet. Davon spricht man, wenn die elektrodynamischen Kräfte im Schaltgerät nicht ausreichen, damit der Lichtbogen in das Löschesystem wandert und dort verlischt. Dies tritt meist bei niedrigen Strömen auf. In der Auswertung konnte ein solches Turboloch jedoch nicht festgestellt werden. Hingegen ergab die Auswertung, dass bei einigen Schaltgeräten bei höheren Strömen Rückkommutierungen vom Löschesystem in das Kontaktsystem auftraten. Basierend auf dieser Auswertung, wird zum Zeitpunkt der Verfassung des vorliegenden Berichts auch ein Journalbeitrag zur Analyse der kommerziellen Schaltgeräte erstellt.

Teile der Kontaktsysteme der kommerziellen Schaltgeräte wurden materialanalytisch, u. a. hinsichtlich der Kontaktwerkstoffe, Kontaktträger, Laufschiene untersucht. Die Kontaktoberflächen wurden mit einem 3D-Hochdurchsatzprofilometer (Marsurf CM Explorer, Fa. Mahr GmbH) analysiert. Es wurden metallographische Querschliffe der einzelnen Kontaktträger angefertigt und lichtmikroskopisch untersucht. Die Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) wurde zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der Kontaktwerkstoffe verwendet. Die qualitative Phasenanalyse erfolgte mittels Röntgendiffraktometrie (XRD). Alle erhaltenen Daten wurden aggregiert und ergeben ein Bild vom Kontaktsystem des Schaltgerätes. Die Analysen wurden auf dem Fileserver

abgelegt und dem Konsortium zur Verfügung gestellt. Durch diese Analysemethoden konnte nicht nur die genaue Materialzusammensetzung analysiert werden, sondern auch die Struktur der Kontaktoberfläche der Kontaktplättchen dargestellt und die Frage geklärt werden, ob bei neuen Schaltgeräten bereits eine Vorkonditionierung stattgefunden hat.

Ein Beispiel einer lichtmikroskopischen Aufnahme eines metallographischen Querschliffs des Kontaktträgers ist in Abbildung 2.1 dargestellt.



Abbildung 2.1: Lichtmikroskopische Aufnahme des Querschliffs eines Kontaktträgers. Beschreibung von oben nach unten: Ag/SnO<sub>2</sub> 88/12-Werkstoff, Ag-Zwischenschicht, Bindenaht (Lot), Cu-Schicht, Fe-Kern, Cu-Träger. (Maßstabsbalken = 100 µm)

Da die Kontaktsysteme einerseits unterschiedliche Geometrien und andererseits verschiedene Kontaktwerkstoffpaarungen aufweisen, wurden diese in der nachfolgenden Tabelle 2.2 zusammengefasst.

Tabelle 2.2: Verwendete Kontaktwerkstoffe in untersuchten kommerziellen Schaltgeräten

Geräte ID	Typ	Kontaktmaterial		
		Symmetrie	Festkontakt	Bewegtkontakt
D01	MCCB	asym	Ag/SnO <sub>2</sub>	Cu
D02	MCCB	asym	Ag/SnO <sub>2</sub>	Cu
D03	MCCB	asym	Ag/SnO <sub>2</sub>	Ag
D04	Trenner	asym	Ag/ZnO	Ag/Ni
D05	Trenner	asym	Ag/SnO <sub>2</sub>	Ag

Die Dokumentation von Schaltgeräten in Steckbriefen wurde auch in weiteren Forschungs- und Dienstleistungsprojekten etabliert und durch Verwendung neuer Analyseverfahren erweitert.

## 2.2 Aufbau eines DC-Prüffeldes

Ziel des Arbeitspaketes war es, ein Prüffeld für die Schaltversuche an der TU Ilmenau aufzubauen (Abb. 2.2). Basierend auf den Erfahrungen des KEKI wurde ein Grundkonzept des in AP. 2.2 zu erstellenden DC-Prüffeldes diskutiert und die notwendigen Maßnahmen zur Umsetzung abgeleitet. Das DC-Prüffeld bildete im Projekt die Grundlage der in AP. 3 auf der Basis des in AP. 2.3 angepassten Modellschalters durchgeführten Versuchsreihen.

Als erste Maßnahme erfolgte die Erstellung einer Anforderungsliste an das System zur automatisierten Ablaufsteuerung. Anschließend wurden ein entsprechendes digitales programmierbares System zur Ablaufsteuerung beschafft. Es folgte das Aufstellen und Implementieren des Konzeptes der zeitlichen Ablaufsteuerung einschließlich notwendiger Sicherheitsaspekte.

Die notwendige Leistungseinspeisung des Prüffeldes bis 850 V DC an der Technischen Universität Ilmenau wurde in zwei Schritten realisiert. Zunächst erfolgte die Umsetzung der Spannungsebene 450 V DC. Die Erweiterung auf die volle Spannung war allerdings bei der Beschaffung der Komponenten bereits im ersten Schritt stets Planungsvorgabe. So lag der Auswahl der beiden DC-Schütze zur Stromstellung die volle Höhe von Spannung und Laststrom zugrunde. Diese wurden schließlich beschafft und in das DC-Prüffeld an der Technischen Universität integriert sowie mit dem System zur Ablaufsteuerung kombiniert. Die ursprüngliche geplante Verwendung von leistungselektronischen Schaltelementen zur Stromstellung wurde verworfen, da die gemeinsam im Verbund abgestimmte Lastkreisinduktivität eine zu hohe Überspannungsbelastung und damit die Zerstörung erwarten ließen.

Für die Aufzeichnungen der vielfältigen hochtransienten elektrischen Messsignale erfolgte an der Technischen Universität Ilmenau die Auswahl und Beschaffung eines speziellen Transientenrekorders mit hoher zeitlicher und vertikaler Bandbreite. Hierzu wurde in Absprache mit der PTB ein modulares und frei konfigurierbares System ausgewählt. Dieses System ist im Vergleich zu endfertigen kommerziellen Lösungen frei programmierbar und erweiterbar. Somit konnte es sehr genau auf die Anforderungen an der Technischen Universität Ilmenau zugeschnitten werden und ist außerdem für zukünftige Aufgaben anpassbar. Ein solches System ist nicht Teil der Grundausrüstung durch die Universität. Der beschaffte Transientenrekorder wurde ausschließlich für das Projekt FASS verwendet.

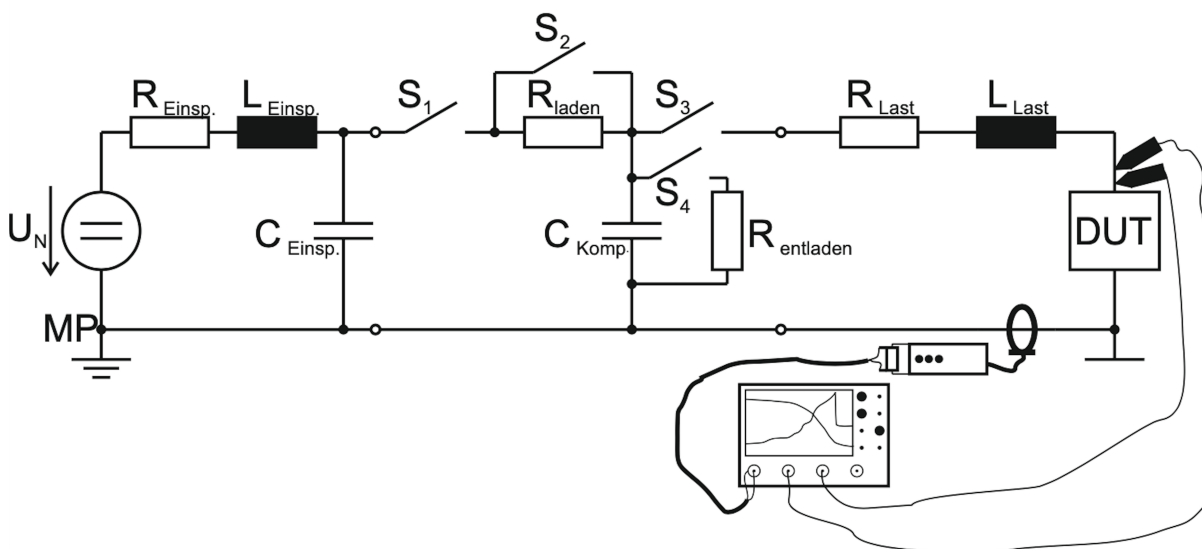


Abbildung 2.2: Aufbau eines DC-Prüffeldes an der TU Ilmenau

## 2.3 Anpassung des Modellschalters

In diesem Arbeitspaket sollte der Modellschalter für die DC-Schalt- und Messaufgaben angepasst werden. Der verwendete Modellschalter stammt aus dem Projekt KEKI (Abb. 2.3). Bisher wurden an diesem Schalter nur AC-Versuche durchgeführt. Daher musste der Modellschalter für das Projekt FASS umgebaut und programmiert werden, damit er auch DC-Ströme schalten kann. Aus Hardwaresicht wurden in diesem Arbeitspaket auch die Helmholtzspulenpaare aus AP. 2.4

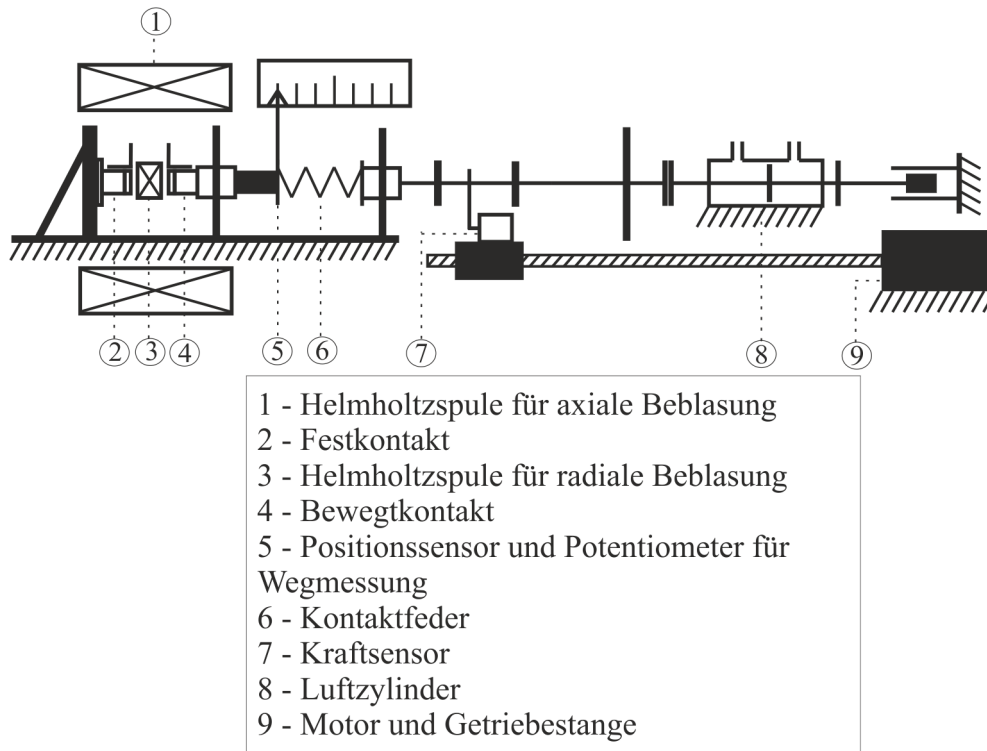


Abbildung 2.3: Prinzip des Modellschalters

für die Untersuchung der magnetischen Beeinflussung des Lichtbogens installiert. Dafür wurden entsprechende Anbringungen für die Befestigung der axialen Spulen am Modellschaltergerüst angefertigt. Die Spulen für die Erzeugung eines radialen Magnetfeldes wurden an der Schaltkammerwand befestigt. Versorgt wurden die Spulen aus einem System, bestehend aus steuer- und stellbarer Konstantstromquelle in Verbindung mit 750-V-Schützen. Eine weitere Besonderheit des Modellschalters, die erst mit dem Umbau integriert wurde, sind die Laufschiene je Kontakt. An den Kontakten wurden je eine Kupferlaufschiene angebracht, die an der Kontaktkante ansetzt. Zwischen Kontakt und Laufschiene wurde ein Glimmerplättchen für die galvanische Trennung angebracht. Durch zusätzliche Stromzuführungen je Laufschiene konnte eine separate Strommessung realisiert werden. Der Strom durch die Zuführungen wurde mit LEM-Wandlern vom Typ IT205-S gemessen. Durch die U-Form der Laufschiene wird eine Beeinflussung des Lichtbogens durch das Eigenmagnetfeld der Stromzuführung ausgeschlossen. Die Messdaten werden von einem NI-System erfasst. Die Messdaten werden über eine BNC-Anschlussbox und die PXIe-Messkarte an das NI-System weitergegeben und verarbeitet. Im Laufe der Versuche sind Kanäle an der BNC-Anschlussbox und der Messkarte ausgefallen. Die Messkarte konnte ersetzt werden, die BNC-Anschlussbox (Typ BNC 2110) und das EPM-Shielded Cable (SHC68-68-EPM-Shielded-Cable) für die Messkarte aufgrund von langen Lieferzeiten nicht. Jedoch reichten die noch nicht defekten Kanäle an der BNC-Anschlussbox und das bereits existierende Kabel aus,

um die Versuche fortzuführen bzw. die neue Messkarte zu betreiben. Wie in Abb. 2.3 zu sehen, wurde der Modellschalter mit einem Positionssensor (hochauflösendes Laserinterferometer) und Potentiometer für die Wegmessung ausgestattet. Zum Verarbeiten der Messdaten vom NI-System ist eine zusätzliche Messkarte vom Typ PXIe-6535 beschafft worden.

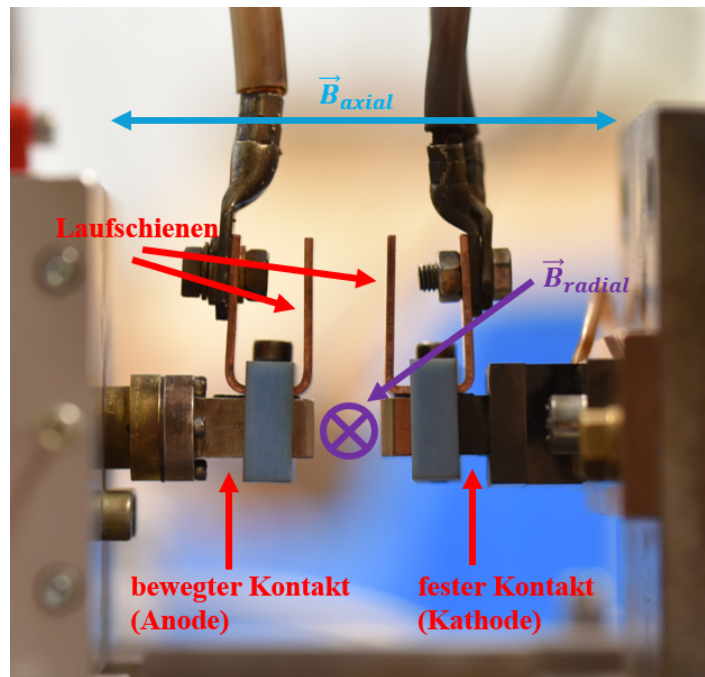


Abbildung 2.4: Kontaktsystem im Modellschalter

Die Programmierung und Ablaufsteuerung musste den Änderungen der Hardware angepasst werden. Die Basis dafür war ein digitales programmierbares System zur Ablaufsteuerung (NI-PXI-System digitales programmierbares System zur Ablaufsteuerung), welches im Rahmen des Aufbaus des DC-Prüffeldes in AP. 2.2 ausgewählt und beschafft wurde. Die Erweiterung des Kontaktsystems, wie z. B. die Messung der Kommutierungsströme, musste in der Programmierung ergänzt werden. Dafür wurde das bisher existierende, aber für AC-Versuche verwendete Lab-View-Programm, angepasst. Die Programmierung wurde so aufgebaut, dass je zu Beginn einer Schaltung eine Widerstandsmessung durchgeführt wurde und dann nach Vollendung einer Schaltserie ebenso eine abschließende Widerstandsmessung durchgeführt wurde. Es wurde auch getestet, ob eine automatisierte Zuschaltung der Helmholtzspulen möglich wäre. Jedoch baute sich das Magnetfeld nicht rechtzeitig bis zur Kontaktöffnung und der damit einhergehenden Zündung des Lichtbogens vollständig auf. Für die Versuche wurde deshalb das Magnetfeld manuell zugeschaltet.

## 2.4 Entwicklung und Planung einer Anlage zur variablen Magnetfelderzeugung

Ziel dieses Arbeitspakets war es, eine Einrichtung zum Erzeugen variabler Magnetfelder zu konstruieren und im Modellschalter zu integrieren. Es sollten sowohl die Ausrichtung als auch die Werte der Flussdichte variabel sein. Für die Beeinflussung des Lichtbogens im Schaltprozess durch ein externes Magnetfeld wurde sich für eine Helmholtzspulenordnung entschieden (Abb. 2.5). Es wurden zwei Helmholtzspulenpaare konstruiert und erstellt. Für die radiale Beblasung des Lichtbogens wurde der maximal für eine Spulenordnung verfügbare Bereich ausgemessen.

Basierend auf diesen Maßen, wurde eine Geometrie für den Spulenkörper entwickelt. Damit die Spule mit einem hohen Strom für die Erzeugung eines großen Magnetfeldes bestromt werden kann, wurde ein Lackdraht verwendet, der einer Temperatur von 200 °C standhält. Der Durchmesser des Drahtes betrug 2 mm. Daraus ergab sich eine maximale Windungszahl. In einem nächsten Schritt wurde die Helmholtzspulenordnung simuliert und die magnetische Flussdichte bei verschiedenen Strömen bis 100 A im Zentrum der Anordnung (optimaler Helmholtzspulenabstand, Mittenabstand = Radius der Spule) ermittelt. Nach der Herstellung des Wickelkörpers und dem Wickeln des Lackdrahtes auf die Spule wurden diese auf ihre Hitzebeständigkeit getestet. Dies war möglich, da zusätzlich zum Spulendraht auch noch ein Thermoelement mit aufgewickelt wurde. Die Spulen wurden, wie im Versuch vorgesehen, in kurzen Zeitabständen bestromt. Realisiert wurde die Bestromung durch die steuer- und stellbare Konstantstromquelle (Labornetzgerät). Dieser Zyklus mit 120 A wiederholte sich so oft bis eine Temperatur von 150 °C erreicht wurde. Mit diesem Ablauf konnte festgestellt werden, ob die Spulen eine so hohe Bestromung für einen Schaltzyklus aushalten. In einem nächsten Schritt sollte die magnetische Flussdichte ermittelt werden. Die Helmholtzspulen wurden entsprechend dem optimalen Abstand einer Helmholtzspulenordnung ausgerichtet und bestromt. Mit Hilfe eines hierfür beschafften 3-dimensionalen Magnetfeldmesssystems (Magnetfeldsonde + Zubehör) konnte die magnetische Flussdichte gemessen werden. Mit den gemessenen Werten wurde die Simulation verifiziert. Für die axiale Spulenordnung erfolgten die gleichen Schritte. Jedoch war für die axiale Spulenordnung mehr Platz verfügbar und diese musste nicht direkt im Schaltraum untergebracht werden.

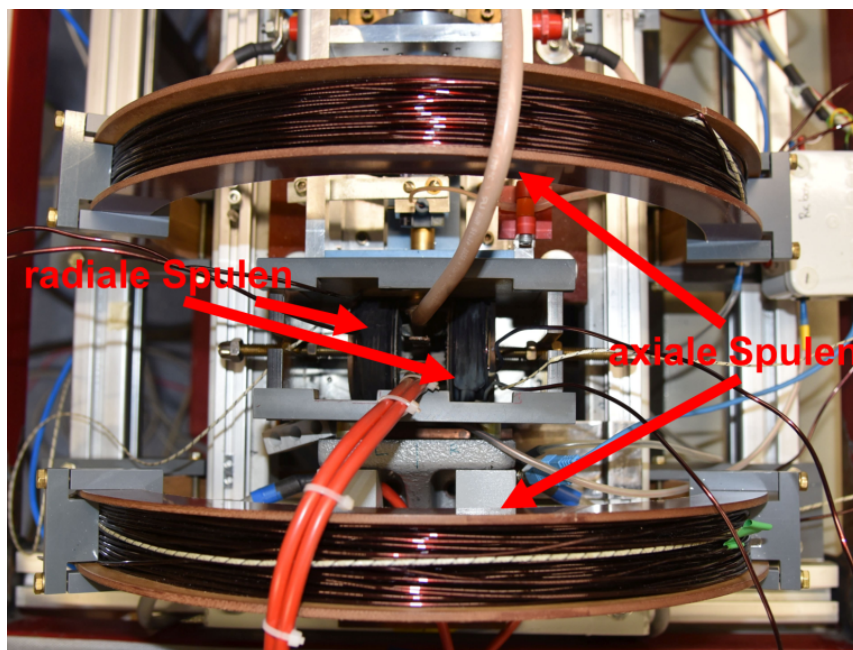


Abbildung 2.5: Helmholtzspulenordnung

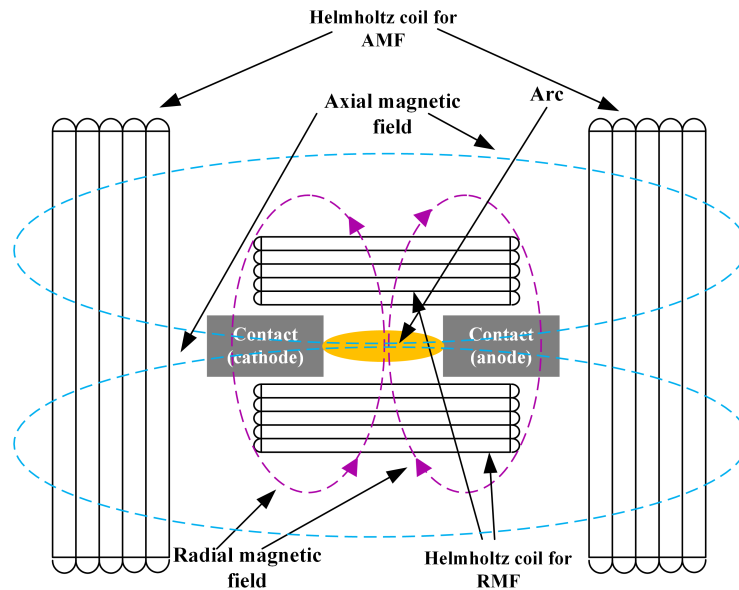


Abbildung 2.6: Ausrichtung der Magnetfelder über dem Kontaktsystem

Eine wie im Antrag vorgesehene Flussdichte bis 100 mT wurde auf Grund von Erkenntnissen aus der Literatur nach unten korrigiert. Die in den Versuchen in Arbeitspaket 3 maximal eingestellte Flussdichte betrug 40 mT. Höhere Werte wurden nur stichprobenartig eingestellt, spiegeln aber nicht die typischen Werte wider, die man in kommerziellen Schaltgeräten findet. Im Versuchsstand wurden die Spulen durch externe Gleichstromquellen betrieben.

## 2.5 Aufbau der Messtechnik für die Prüfanlage

Für die detaillierte Messanalyse und -auswertung war es das Ziel dieses Arbeitspaketes, eine optimal auf die Fragestellungen abgestimmte Messtechnik bereitzustellen.

### 2.5.1 Definition der technischen Randbedingungen

Am 9. April 2020 wurden die Mess- und Prüfeinrichtungen durch die PTB bei den Partnern TU Ilmenau und der E-T-A getestet und deren aktuelle Leistungsfähigkeit festgestellt und dokumentiert. Die dort eingesetzte Messtechnik erfüllte in fast allen Punkten die Anforderung zur Durchführung der geplanten Messaufgaben. Für die vollständige Erreichung der Anforderungen wurden die im Folgenden beschriebenen Schritte durchgeführt.

#### Stromsensoren

Für die Strommessung im DC-Prüffeld der Technischen Universität Ilmenau bis maximal 10 kA wurde durch die PTB eine Kombination aus zwei Nullflusswandler-Systemen für Ströme bis 5 kA konzipiert. Die Zusammenstellung und Auswahl der Teilkomponenten der Systeme erfolgt in Kooperation zwischen PTB und Technische Universität Ilmenau. Letzte führte dann die Beschaffung und Inbetriebnahme der Systeme sowie in AP. 2.2 deren Integration in das DC-Prüffeld der Technischen Universität Ilmenau durch. Im weiteren Projektverlauf wurden darüber hinaus durch die PTB und die Technische Universität Ilmenau 200-A und zwei 1-kA-Nullflusswandler für die Messung von Teilströmen im Modellschalter der Technischen Universität Ilmenau beschafft und in Betrieb genommen.

## Spannungssensoren

Die Spannungsmessung benötigte Spannungssensoren, die eine Spitzenspannung bis zu 5 kV messen können. Die ursprünglich geplante Bandbreite im Projektantrag betrug 100 kHz. Im Verlauf des Projektes wurde nach Austausch mit den Projektpartner festgestellt, dass eine höhere Bandbreite bis zu 1 MHz sinnvoll und notwendig ist.

### 2.5.2 Aufbau einer mobilen Stoßstromkalibriereinrichtung

Eine transportable Kalibriereinrichtung für transiente Hochströme wurde in dem Projekt entwickelt. Diese transportable Kalibriereinrichtung besteht, wie in den Abbildung 2.7, 2.8 und 2.9 dargestellt, aus einem Gleichstromkreis und einem Impulsstromkreis. Als Gleichstromquelle wurde ein bereits vorhandenes Gerät eingesetzt. Dieses kann einen Gleichstrom von 1000 A mit einer Temperaturstabilität von 10 ppm bereitstellen und erfüllt damit die Anforderungen, die in dem Projekt an die Stromquelle gestellt werden. Der DC-Referenzsensor ist ein in der PTB kalibrierter LEM-Stromsensor vom Typ ITZ 2000. Der Pearson Sensor, welcher zur Impulsstrommessung eingesetzt wird, stammt von der Firma Pearson und ist vom Typ 110.

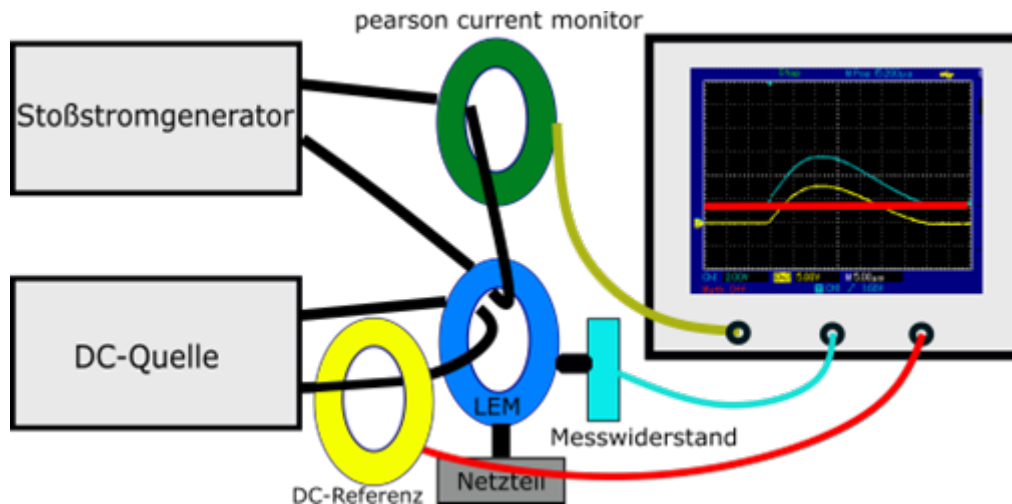


Abbildung 2.7: Blockschaltbild der transportablen Kalibriereinrichtung für transiente Hochströme

Der Stoßstromgenerator mit einstellbarer Stirnzeit von  $1 \mu\text{s}$  bis zu  $10 \mu\text{s}$  und Rückenhalbwertszeiten bis zu  $20 \mu\text{s}$  wurde in der PTB neu entwickelt und aufgebaut. Die Zeitparameter können durch kombiniertes Schalten von 7 Schützen eingestellt werden. Die Impulsauslösung kann mit einem Hochspannungsthyristor bis 2 kV oder mit der internen Funkenstrecke zwischen 500 V und 6 kV durchgeführt werden.

Der aufgebaute Stoßstromgenerator ist in der Abbildung 2.10 dargestellt. Mit der Tastatur wird die Sollspannung eingestellt. Auf dem Bildschirm wird der aktuelle Status des Stoßstromgenerators angezeigt. Die Zeitparameter werden mit dem Drehschalter eingestellt.

Für die Charakterisierung der Strommeseinrichtung wurde ein LabVIEW-Programm in der PTB erstellt. Der Kurvenverlauf der erzeugten Impulsströme wurde dabei mit einem Digitizer aufgenommen und mit der PTB-Software ausgewertet. In der Abbildung 2.11 ist die Benutzeroberfläche dargestellt. Diese ermöglichte dem Benutzer, die Verbindung zu dem Digitizer herzustellen und die Messparameter einzustellen. Dies sind beispielsweise die Messbereiche der beiden Kanäle und die Sample-Rate.

Die aufgenommenen Messkurven und die gemessenen Zeit- und Spannungsparameter werden automatisch auf der Programmoberfläche dargestellt. Sie können bei Bedarf in einer Excel-

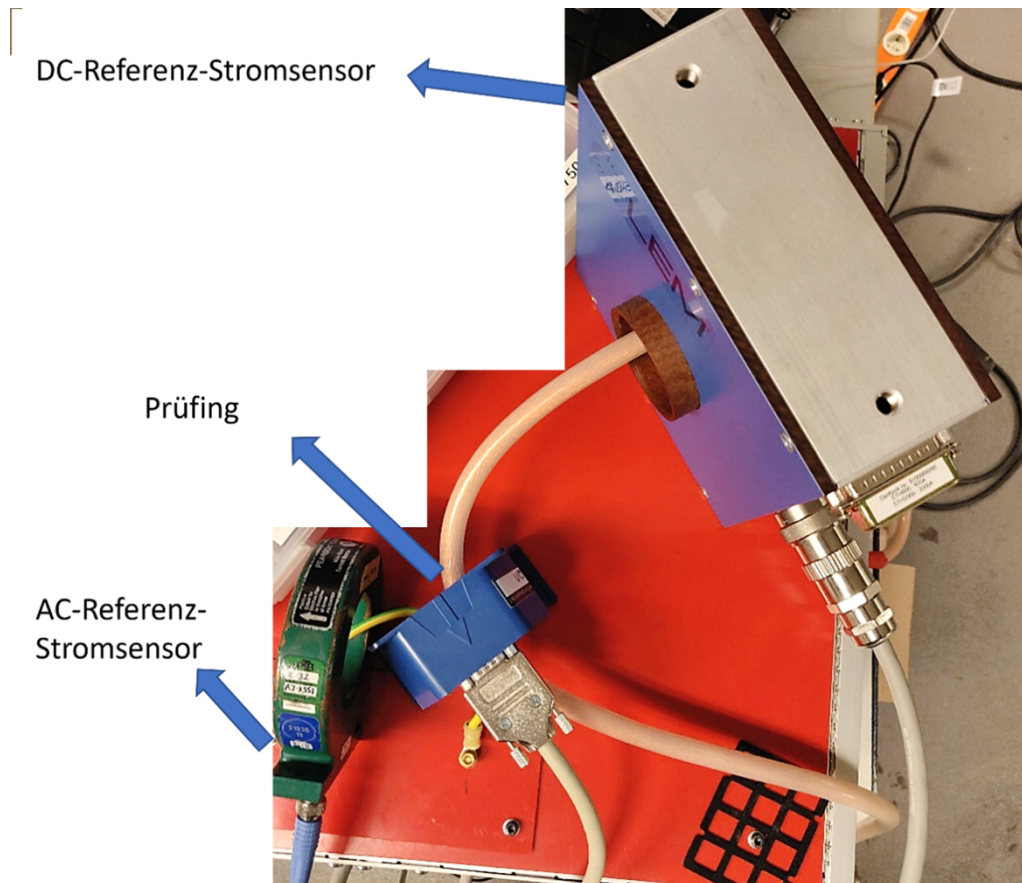


Abbildung 2.8: Transportable Kalibriereinrichtung für transiente Hochströme

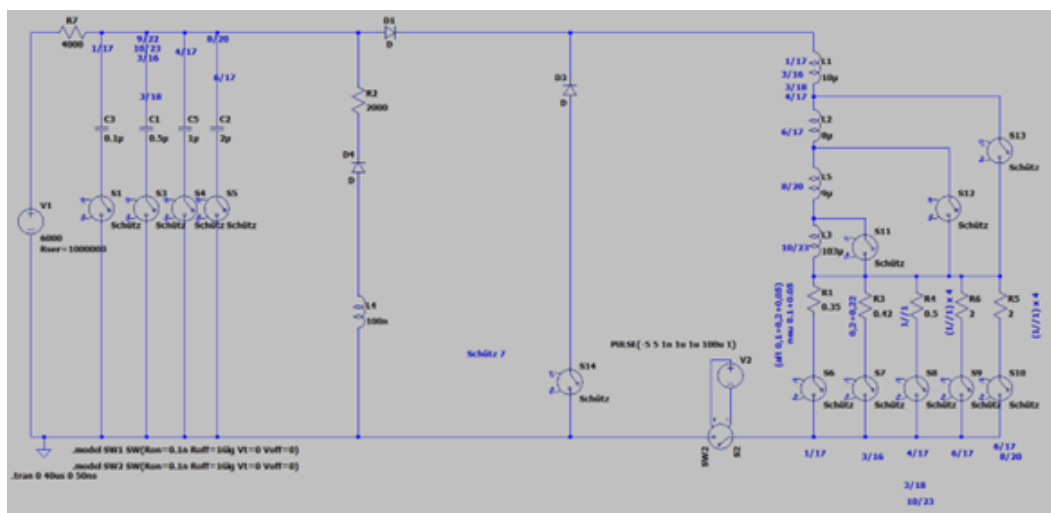


Abbildung 2.9: Blockschaltbild der transportablen Kalibriereinrichtung für transiente Hochströme

Datei gespeichert werden. Weil im Rahmen des Projektes die Stromsensoren mit überlagerten Stromverläufen charakterisiert wurden, wurde der DC-Anteil unter dem Namen Sprungdifferenz gesondert auf der Programmoberfläche ausgewertet und ausgegeben.

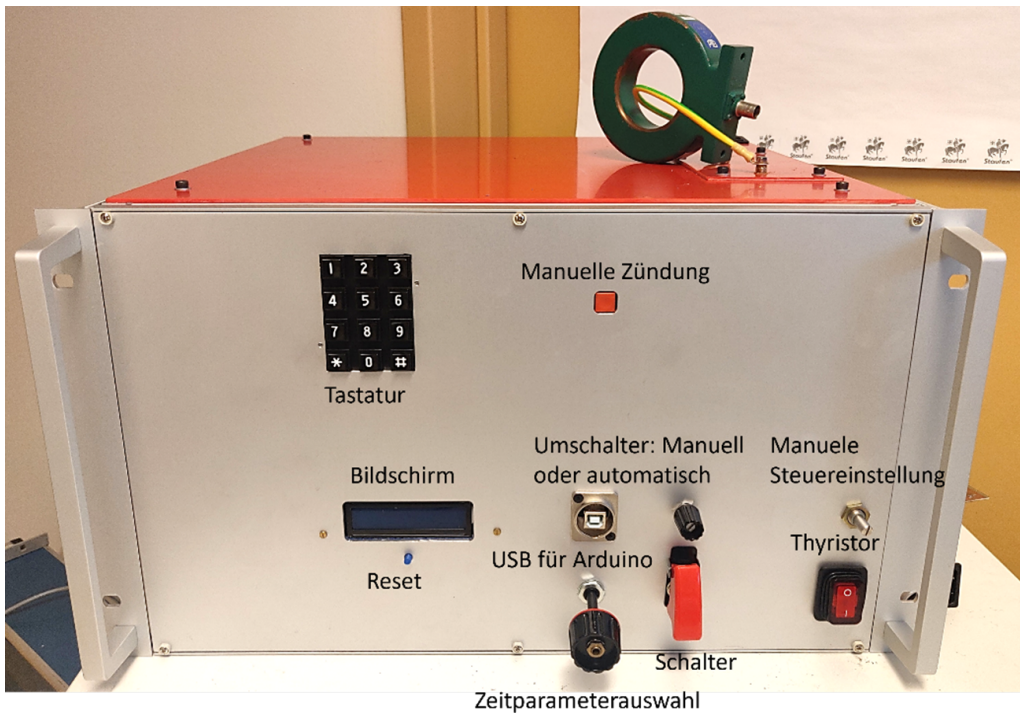


Abbildung 2.10: Foto des Stoßstromgenerators

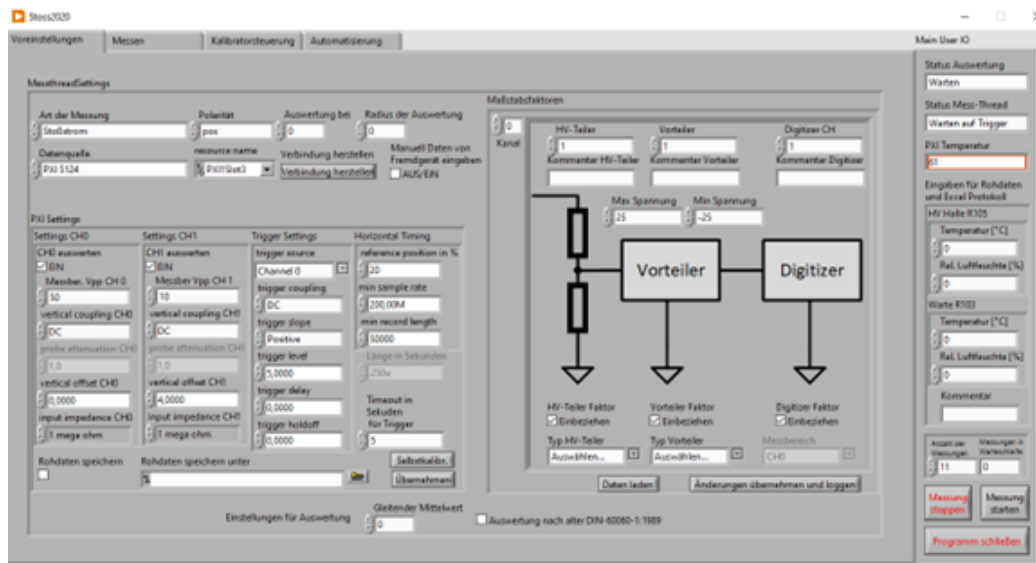


Abbildung 2.11: Voreinstellung der Auswertungssoftware für die Stoßstrommessung

### 2.5.3 Aufbau einer mobilen Kalibriereinrichtung für Spannungssprünge

Eine transportable Kalibriereinrichtung für transiente Überspannungen wurde in dem Projekt entwickelt und aufgebaut. Der Kalibrator für kombinierte Spannungen aus Gleichspannung und Blitzstoßspannung (LI) kann vereinfacht mit dem in der Abbildung 2.13 dargestellten Blockschaltbild beschrieben werden. Die Blitzstoßspannung wird mit dem bereits vorhandenen Gerät Typ 481 von der Firma Haefely erzeugt. Die Gleichspannung wird von einer in der PTB entwickelten DC-Quelle generiert. Die Gleichspannung und die Blitzstoßspannung werden mit

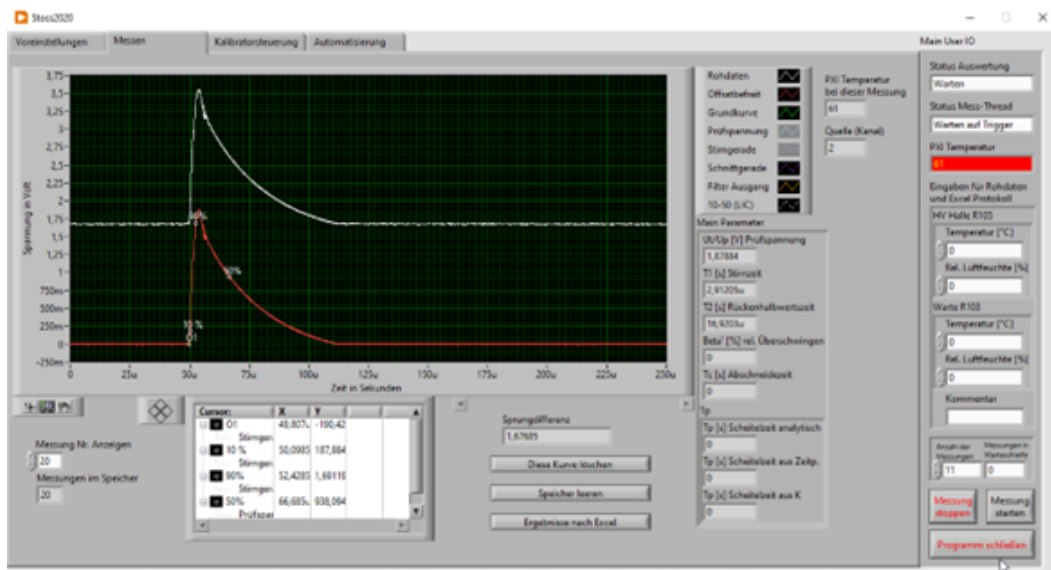


Abbildung 2.12: Darstellung des Messergebnisses. Die weiße Kurve stellt einen von einem Stromsensor aufgenommenem Stromverlauf dar. Die rote Kurve ist der Stromverlauf ohne den überlagerten Gleichstromanteil

Hilfe von Kopplungselementen (Widerstand und Kondensator) überlagert.

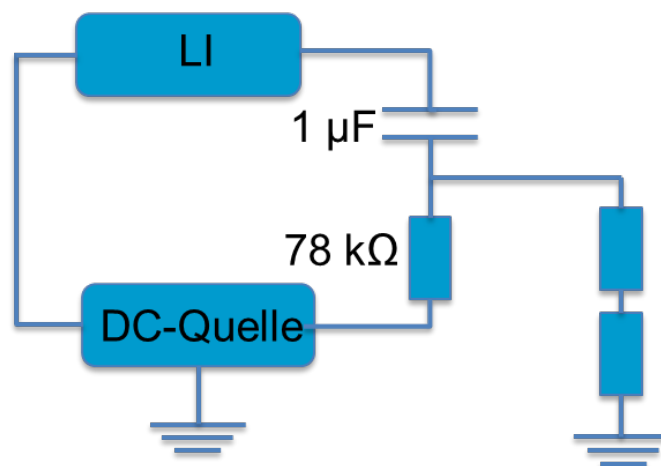


Abbildung 2.13: Blockschaltbild der mobilen Kalibriereinrichtung für Spannungssprünge

In der Abbildung 2.14 ist die mobile Kalibriereinrichtung für Spannungssprünge dargestellt. Mit der Tastatur wird die Amplitude der Gleichspannung eingestellt und auf dem Bildschirm der aktuelle Gerätestatus dargestellt. Mit dem Umschalter kann das Gerät zwischen manueller und automatischer Spannungseinstellung umgeschaltet werden. Die automatische Spannungseinstellung wird von einem Arduino UNO gesteuert. Über die USB-Buchse kann die Software des Arduino aktualisiert oder zusätzliche Informationen ausgegeben werden.

Die notwendigen Kopplungselemente sind in der Gleichspannungsquelle integriert worden. Die Gleichspannungsquelle wird zur Erzeugung von überlagerten Signalformen mit dem Haefely Impulsgenerator Typ 481 verbunden. Mit der Gleichspannungsquelle kann eine DC-Spannung von bis zu 5 kV erzeugt werden und der Impulsgenerator kann Spannungssprünge bis 500 V

erzeugen. Die resultierende überlagerte Amplitude des zusammengesetzten Spannungsverlaufs beträgt dementsprechend maximal 5,5 kV.

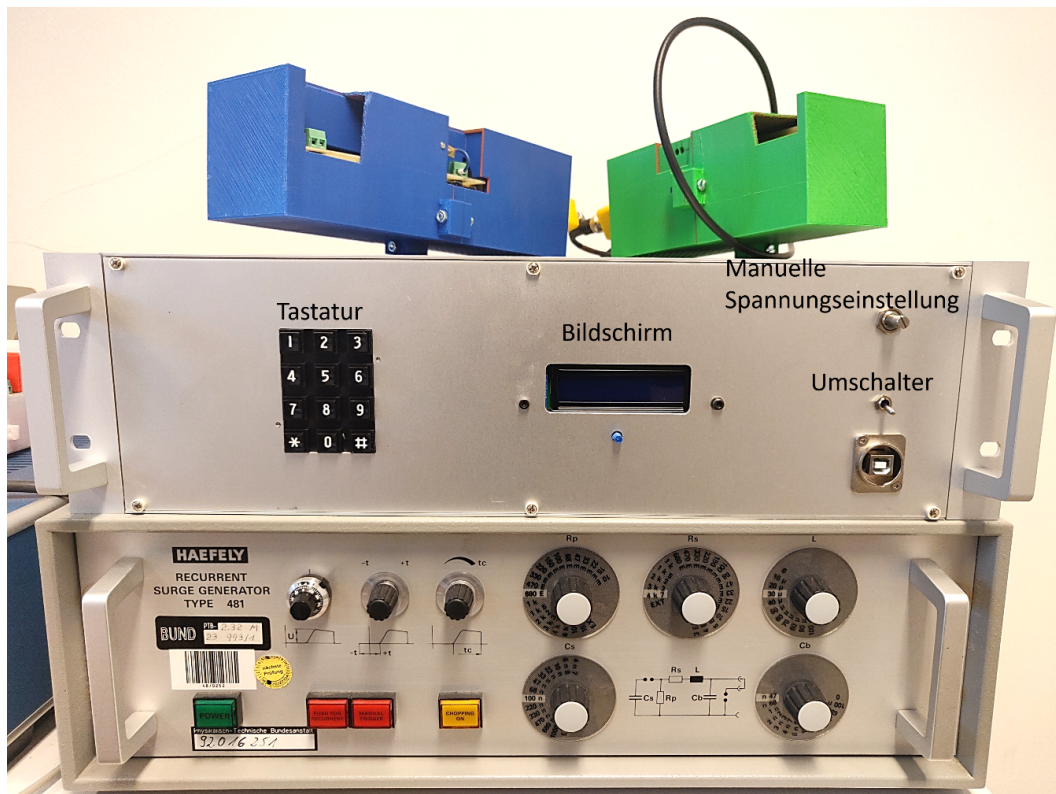


Abbildung 2.14: Mobile Kalibriereinrichtung für Spannungssprünge

Das dynamische Verhalten eines Spannungsteilers kann mit einer Sprungantwort abgeglichen werden. Der Messkreis ist in der Abbildung 2.15 dargestellt. Der Sprunggenerator besteht aus einer DC-Quelle und einem Quecksilber-Relais, welches von einem Funktionsgenerator angesteuert ist. Durch das periodische Kurzschließen des Signalausgangs wird eine nahezu ideal fallende Flanke erzeugt. Die Verwendung von quecksilberbenetzten Kontakten verhindert bei dem Schaltvorgang ein Prellen dieser und sorgt damit für einen sauberen Signalverlauf.

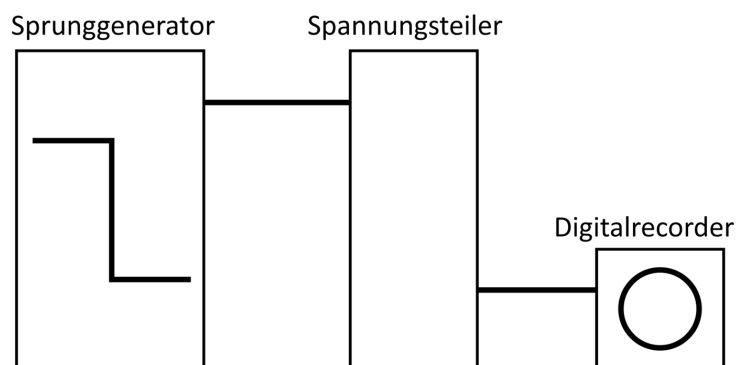


Abbildung 2.15: Messanordnung zur Aufzeichnung der Sprungantwort

## 2.5.4 Referenzspannungsteiler

Für die Kalibriereinrichtung, mit Hilfe von Spannungssprüngen, ist ein Referenzspannungsteiler aufgebaut worden. In der Abbildung 2.16 sind die Parameter des Spannungsteilers dargestellt. Der Spannungsteiler besitzt drei separate Zeitkonstanten (4,7 ns, 200  $\mu$ s und 3,9 ms). Dadurch ist es möglich, die Sprungantwort des Spannungsteilers gut einzustellen. Der theoretische Maßstabsfaktor von dem Referenzspannungsteiler beträgt 101.

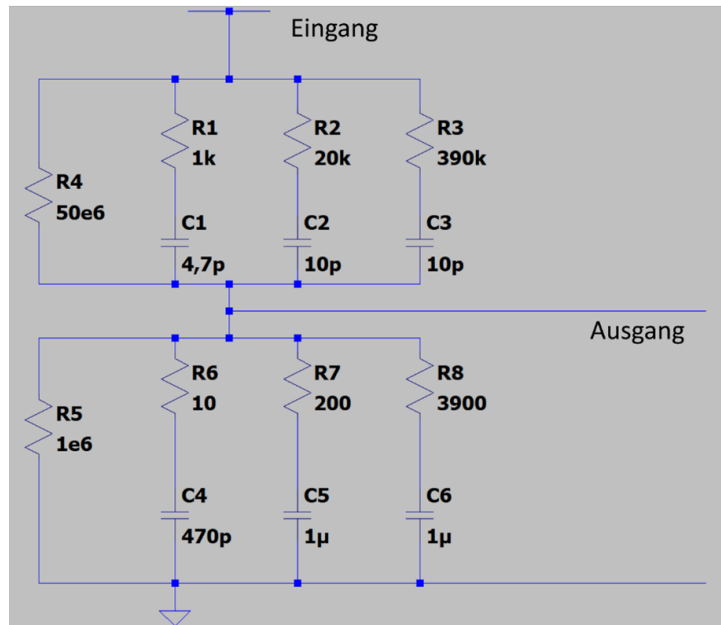


Abbildung 2.16: Schaltbild des Referenzspannungsteilers. Jeder Widerstand bzw. Kondensator in dem Hochspannungsteil besteht aus der Reihenschaltung von 10 gleichen Bauteilen. Die Widerstands- und Kapazitätswerte sind im Niederspannungsteil mit Hilfe von Trimmern einstellbar.

Das Gehäuse des Spannungsteilers wurde im 3D-Druckverfahren hergestellt. Der fertige Spannungsteilerprototype mit Gehäuse ist in der Abbildung 2.17 dargestellt.

## 2.5.5 Strommesseinrichtung

### Beschaffung der Messeinrichtung

Für die E-T-A und die TU Ilmenau wurden jeweils zwei Nullflusswandler für die Strommessung mit folgenden Parametern bereitgestellt.

Tabelle 2.3: Parameter der Nullflusswandler

Typen	Max. Strom in A	Bandbreite in kHz ( $\pm 3$ dB)	Sekundär I in A bei max. Strom
IT 205-s	200	1000	0,2
IN 1000-s	1000	500	1,00

Für die Nullflusswandler IT 205-s wurden als Bürde Metallfolienwiderstände mit 100 Ohm und einem Temperaturkoeffizienten von  $\pm 1$  ppm/ $^{\circ}$ C verwendet. Für die Nullflusswandler IN 1000-s wurden als Bürde Metallfolienwiderstände mit 10 Ohm mit einem Temperaturkoeffizienten von  $\pm 2$  ppm/ $^{\circ}$ C eingesetzt. Um die gewünschte Spannung beim maximalen Strom zu erreichen und die Leistung pro Widerstand für präzise Messungen klein zu halten, wurden mehrere Widerstände

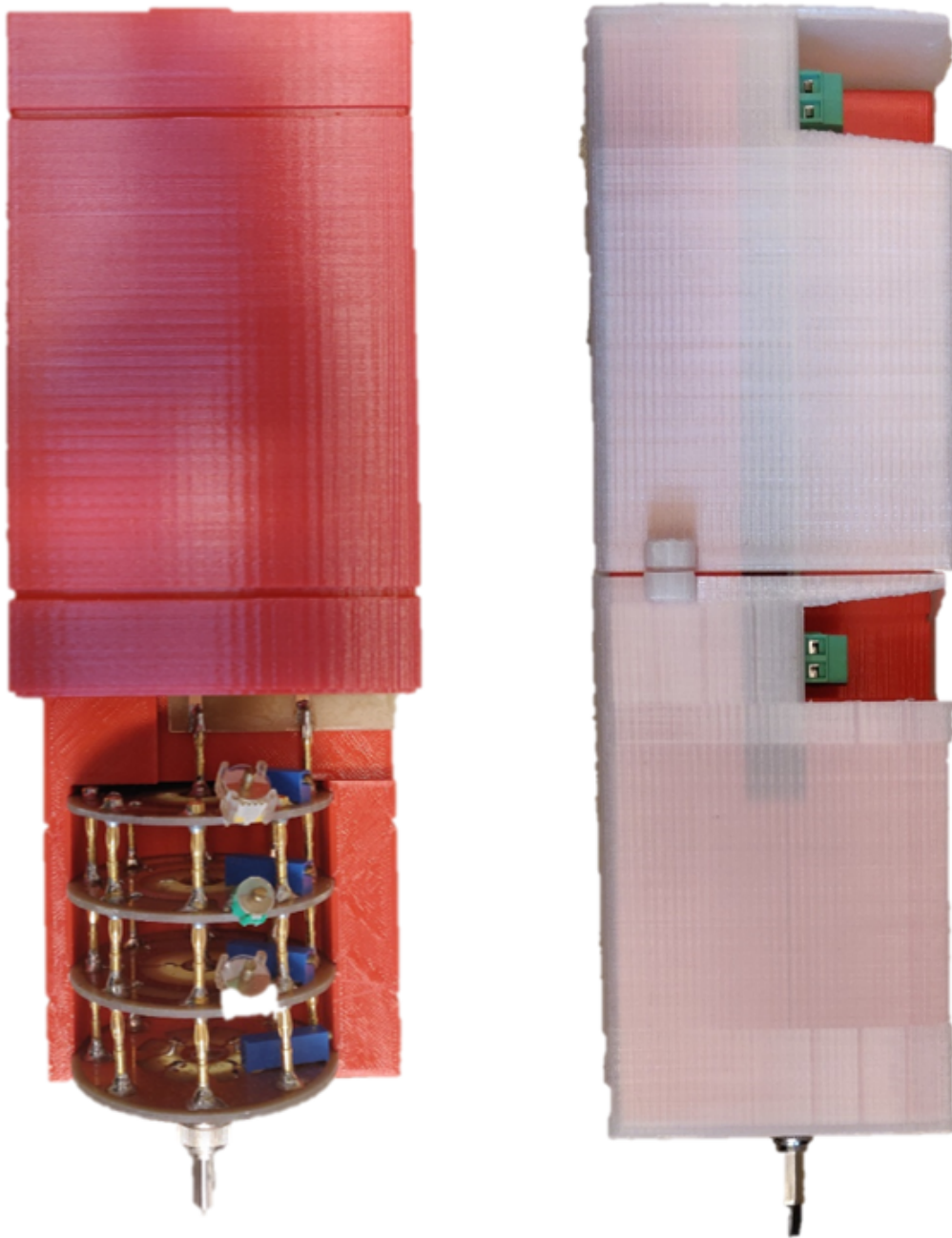


Abbildung 2.17: Referenzspannungsteiler mit Gehäuse

zusammengeschaltet. Dies führt dazu, dass die Erwärmung und damit verbundene Änderung des Widerstandswertes pro Widerstand minimiert wird und auch die Gesamtänderung des Widerstandswertes deutlich kleiner ausfällt.

In der Abbildung 2.18 ist der Aufbau zum Betrieb der Nullflusswandler dargestellt. Der blaue Nullflusswandler IN 1000-s wird von der Spannungsquelle, welche in dem weißen Gehäuse enthalten ist, versorgt. In dem gelben Gehäuse befinden sich die für den Betrieb notwendigen Bürdenwiderstände. Der zu messende Strom wird von dem Nullflusswandler in einen kleinen Messstrom

Tabelle 2.4: Messwiderstände für die Stromsensoren

Sensor	Messwiderstand	Zahl	Ges. Widerstand in $\Omega$	Leistung pro Widerstand in W	Max. Spannung am Messwiderstand in V
IT 205-s	100	6	16,67	0,111	3,33
IN 1000-s	10	4	2,5	0,625	2,5

umgewandelt, welcher an den Bürdenwiderständen einen Spannungsfall verursacht. Diese Spannung wird über die BNC-Buchse ausgegeben und dort mit üblicher Spannungsmesstechnik erfasst und durch A/D-Wandler digitalisiert und weiterverarbeitet.



Abbildung 2.18: Nullflusswandler mit der Spannungsquelle und dem Messwiderstand

## 2.5.6 Charakterisierung der Messeinrichtungen

Die Nullflusswandler wurden mit dem Messaufbau aus der Abbildung 2.7 charakterisiert. Die Maßstabfaktoren sind in der Tabelle 2.5 dargestellt. Für jeden Sensor wurden 5 Stromwerte über den gesamten festgesetzten Messbereich für die Charakterisierung gemessen.

## 2.5.7 Spannungsmesseinrichtung

Für die Spannungsmessung in dem Projekt gibt es keine geeigneten kommerziellen Geräte auf dem Markt. Die Spannungsteiler für die verbundenen Projektpartner wurden von der PTB entwickelt, gebaut und anschließend kalibriert. Am Anfang des Projektes wurde die Grenzfrequenz 100 kHz als Maximum angenommen. Ein Spannungsteiler wurde unter Berücksichtigung dieser Maximalfrequenz entwickelt. Die Schaltung ist in der Abbildung 2.19 gezeigt. Im Verlauf des

Tabelle 2.5: Maßstabfaktor der Strommesseinrichtungen

Sensor	Maßstabfaktor	Messbedingung	
		DC-Strom in A	Stoßstrom in A
IT1000S TU	394,80	100 bis 500	100 bis 500
IT1000S E-T-A	403,40	100 bis 500	100 bis 500
IT205S TU	59,03	20 bis 100	20 bis 100
IT205S E-T-A	59,35	20 bis 100	20 bis 100

Projektes haben sich die Anforderungen an die Messeinrichtung jedoch signifikant erhöht. Es hat sich herausgestellt, dass die zuvor angenommenen technischen Parameter, wie die Bandbreite der Sensoren, für eine Charakterisierung nicht ausreichend waren und diese angepasst werden mussten, um aussagekräftige Messergebnisse zu erhalten. Hierdurch war es notwendig geworden, das Design maßgeblich anzupassen, um den neuen Anforderungen gerecht zu werden.

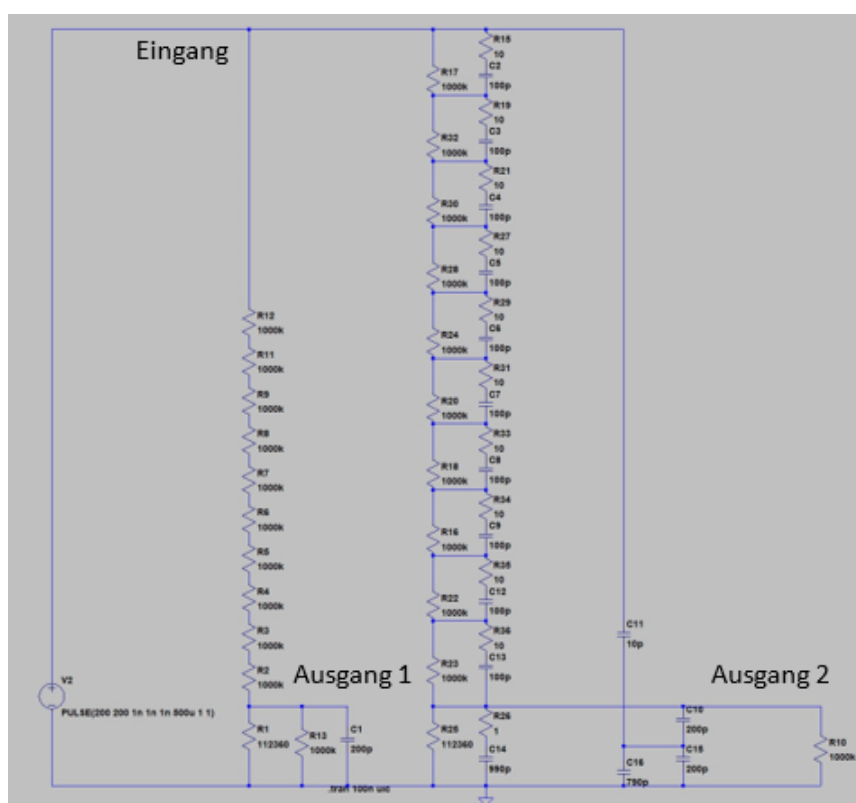


Abbildung 2.19: Erste Version des Spannungsteilers

Weil die Bandbreite des Spannungstastkopfes im beantragten Projekt „AutoHybridS“ (paralleles Projekt an der TU Ilmenau, FKZ 03EI6006C) die Anforderung des Projekts „FASS“ erfüllen konnte, wurde der Entwurf der AutoHybridS-Sensoren für dieses Projekt übernommen. Die Sensorparameter, wie z. B. die Zeitparameter, waren für die Messaufgaben des FASS-Projektes optimiert worden. Einer der vollständig aufgebauten Spannungsteiler mit Gehäuse ist in Abbildung 2.20 dargestellt.

## 2.5.8 Charakterisierung der Messeinrichtungen

Die Spannungsteiler wurden mit dem Messaufbau in den Abbildungen 2.7, 2.14 und 2.15 realisiert. Die Maßstabfaktoren sind in der Tabelle 2.6 dargestellt.

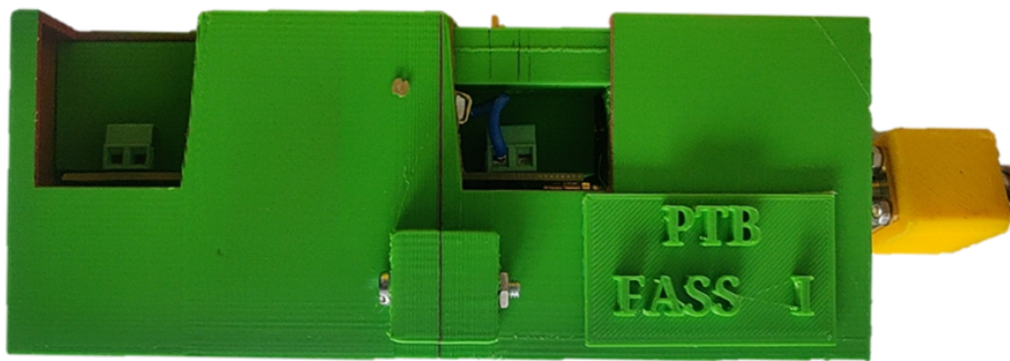


Abbildung 2.20: Hochspannungsteiler mit Gehäuse

Tabelle 2.6: Maßstabfaktoren der Spannungsmesseinrichtungen

Sensor	Maßstabfaktor	Standardabweichung in V	Messbedingung in V	Linearitätsmessung in V
Nr. 1	99,898	1,09E-05	100	3828
Nr. 2	99,879	1,09E-05	100	3788

## 2.6 Bestimmung der Energie der kombinierten Gleich- und Impulsmesswerte

Zur Bestimmung der Energie der kombinierten Gleich- und Impulsmesswerte wurde ein LabVIEW-Programm entwickelt. Der Prozess der Datenverarbeitung ist schematisch in Abbildung 2.21 dargestellt. Um den Startpunkt und Endpunkt der Integration bzw. die Integrationspegel automatisch zu ermitteln, wurde das Signal zunächst durch einen Tiefpass gefiltert. Danach können mithilfe der in LabVIEW vorhandenen Histogramm-Funktion der DC-Anteil der Signale und die Pegel des Startpunkts und Endpunkts für die Integration der Energie ermittelt werden. Die so ermittelten Pegel werden als Trigger auf die ungefilterten Signale angewandt.

## 2.7 Beschaffung und Inbetriebnahme eines 3D-Profilometers

Für eine vollständige Auswertung der Schaltversuche mussten neben den elektrischen Daten auch materialanalytische Daten aufgenommen werden. Ziel dieses Arbeitspaketes war es daher, eine passende Analysemethode zu ermitteln, zu beschaffen und in Betrieb zu nehmen. Basierend auf einer Literaturanalyse, wurden verschiedene Methoden zur Charakterisierung der Geometrie und Topographie mittels Profilometrie identifiziert. Die anschließende Marktanalyse mit Testmessungen von beschalteten elektrischen Kontakten wurde während der Coronapandemie durchgeführt, wodurch hierbei Verzögerungen aufgetreten sind. Basierend auf den Ergebnissen, konnten zwei in Frage kommende Messmethoden identifiziert werden. Sowohl die Weißlicht-Interferometrie als auch die Konfokalmikroskopie wurden mit den erforderlichen Randbedingungen an die laterale und Höhenauflösung als auch die Messgeschwindigkeit (Hochdurchsatz) in einem entsprechenden Lastenheft ausgeschrieben. Die Ausschreibung wurde am 28.08.2020 veröffentlicht und die Angebotseinreichungen waren bis 15.09.2020 zu leisten. Endgültige Absagen wurden bis zum 14.09.2020 erteilt.

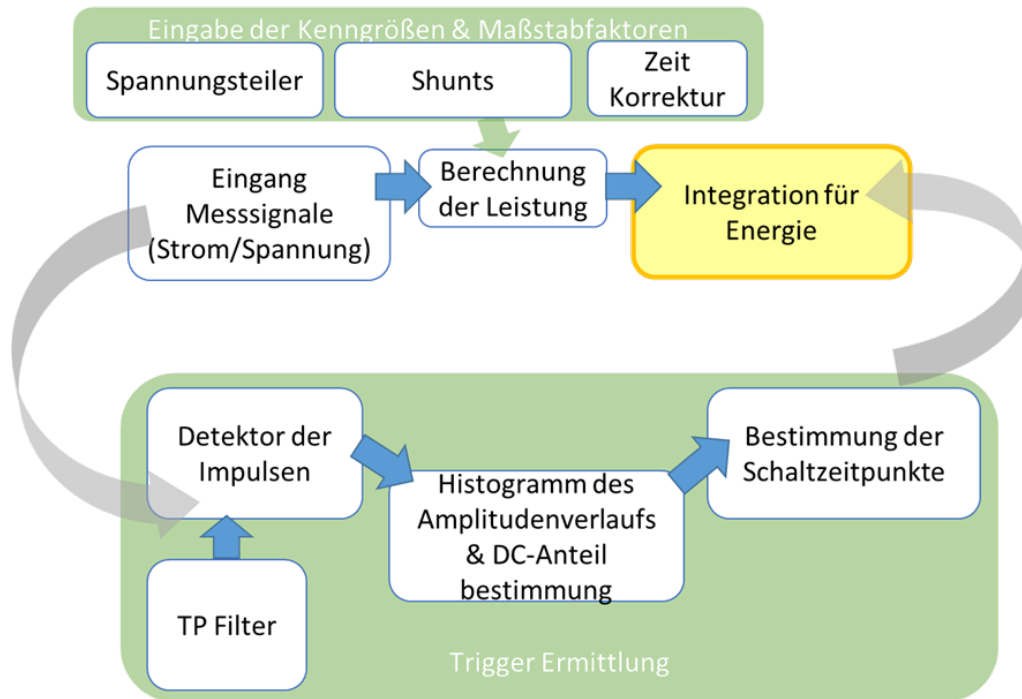


Abbildung 2.21: Prozess der Datenauswertung in LabVIEW

Schließlich konnte im Berichtszeitraum das geplante 3D-Hochdurchsatzprofilometers von der TU Ilmenau ausgewählt, beschafft und in Betrieb genommen werden (siehe 2.22). Es handelt sich um ein Gerät des Typs MarSurf CM explorer (Fa. Mahr GmbH). Auch die Schulung der Anwender des 3D-Hochdurchsatzprofilometers wurde Anfang Dezember 2020 abgeschlossen. Eine Backupstrategie für das System und die Messdaten wurde eingerichtet und getestet.



Abbildung 2.22: Links: Hochdurchsatzprofilometer: Konfokalmikroskop; Rechts: Steuer- und Auswerte-PC

Während der Literatur- und Marktanalyse wurden bereits Strategien für die Methodik der

Datenerfassung und Auswertung der Ergebnisse für die Bewertung der Topographie sowie der Differenzvolumina durch existente Auswertesoftware erarbeitet. Zudem wurde bereits ein Proben-träger konzipiert, um eine möglichst hohe Reproduzierbarkeit der Messergebnisse zu gewährleisten. Dieses Konzept wurde, basierend auf den Maßen der Stage des Gerätes konstruiert. Die Dimensionierung erfolgte hinsichtlich der Automatisierung und der Reproduzierbarkeit von geometrischen sowie topographischen Messungen der Kontaktoberflächen. Mittels Rapid Prototyping wurde das Probenarray aus Kunststoff hergestellt, um Probleme vor der Fertigung ausschließen zu können. Zudem wurden mit diesem Prototyp bereits erste Testmessungen an Kontaktproben durchgeführt, um die Automatisierung der Messungen zu testen sowie deren Reproduzierbarkeit. Die 3D-Konstruktion ist in Abbildung 2.23 dargestellt. Nach Fertigung des Probenhalters wurden diese Messungen wiederholt und auf Reproduzierbarkeit getestet. Für die Bestimmung einzelner Parameter der Geometrie, Topographie der Kontaktoberflächen und Volumen von Lichtbogenerosionskratern wurden Auswerteskripte mit der mitgelieferten Auswertesoftware erstellt. Diese Skripte und die daraus erhaltenen Parameter wurden im Laufe des Projekts für die jeweiligen Anforderungen optimiert und validiert.

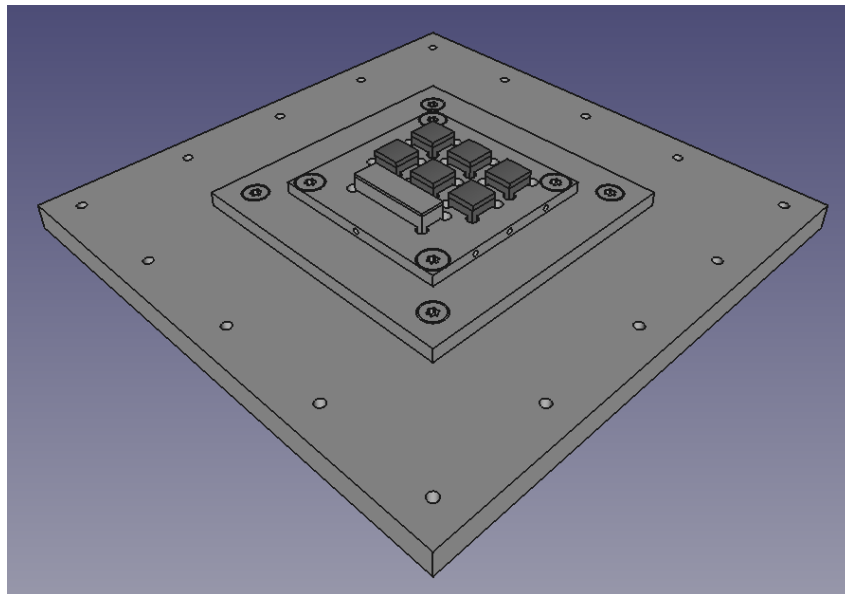


Abbildung 2.23: 3D-Darstellung der Konstruktion des Probenarrays zur definierten Aufnahme und automatisierten Messung der Modellschalterkontakte mit einem Höhennormal

Die für die Durchführung der Schaltexperimente notwendigen Messparameter und Abläufe wurden sowohl für die Initialuntersuchungen als auch für die Untersuchungen nach den Schaltexperimenten in der Automatisierungssoftware identifiziert und implementiert, sodass bereits vor den Schaltexperimenten geometrische und topographische Daten sowie makroskopische Bilder der Kontaktoberflächen vorlagen und nach den Schaltexperimenten zeitnah diese beschalteten Oberflächen vermessen werden konnten.

Der Ablauf der Profilometermessungen wurde anhand von beschalteten Testkontakten definiert und ist in Abbildung 2.24 dargestellt. Die Ziele der Messungen sind die Bestimmung der Geometrie, beschaltete Kontaktfläche, Lokalisation von Kratern, Erosionsvolumina sowie Rauheitsparameter, Laufspuranalyse und Details. Hierzu müssen mit unterschiedlichen Objektiven Messungen der Kontakte durchgeführt werden, da die laterale Auflösung und Höhenauflösung durch die numerische Apertur des Objektivs bestimmt sind. Diese ist beispielsweise beim 50x Objektiv viel höher, sodass genauere Aussagen über Oberflächendetails möglich werden.

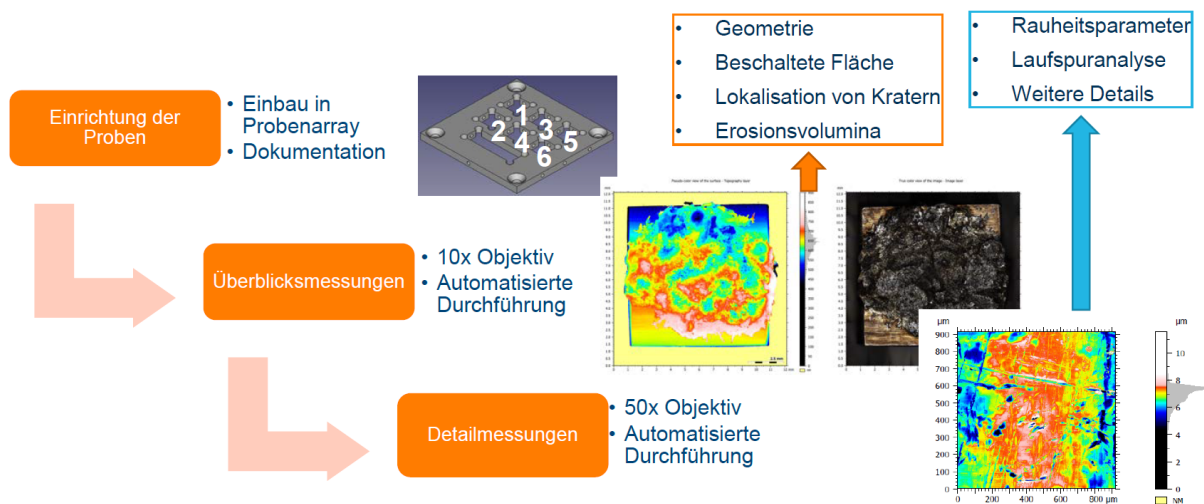


Abbildung 2.24: Zielstellung und Ablauf der Profilometermessungen im Hinblick auf Modellschalterexperimente

Während der Testläufe stellte sich heraus, dass die Gebäudeschwingungen während der Messung die Qualität der Messergebnisse negativ beeinflusst, weshalb durch Mittelumwidmung für das 3D-Hochdurchsatzprofilometer eine aktive Schwingungsdämpfungsplattform (Schwingungsisolationsystem) beschafft werden konnte. Die Schwingungsdämpfung wurde am 04.02.2022 erfolgreich in Betrieb genommen. Mit dieser konnte eine wesentlich höhere Qualität der Messdaten und eine höhere Reproduzierbarkeit, insbesondere bei höheren Vergrößerungen gewährleistet werden.

# Arbeitspaket 3

## 3.1 Versuchsplanung

Das Ziel des Arbeitspaketes war es, die Modellschaltversuche so zu planen, dass die Fragestellungen des Projektes untersucht werden konnten. Als erstes wurden die fixen Parameter für die Versuche bestimmt. Dies ist die 230-V-Batteriespannung. Weiterhin war durchgängig durch die Versuche der feste Kontakt die Kathode und der bewegte Kontakt die Anode. Die Zeitkonstante des Lastkreises sollte über alle Lastkreiseinstellungen hinweg bei 1 ms liegen. Die Einstellung wurde durch ein LCR-Meter vom Typ LCX200 (Messbrücke + Zubehör) geprüft. Die Öffnungsgeschwindigkeit betrug 1 m/s. Die Diskussionen zu den variablen Parametern führten zu einem Stufenplan für die Versuche. In jeder dieser Stufen wurden die Kontakte vorkonditioniert. Die Vorkonditionierung wurde bei 16 A und dem für die danach stattfindenden Versuche verwendete Magnetfeld für drei Schaltungen durchgeführt. Es handelt sich dabei nicht um eine Vorkonditionierung in dem Sinne, wie die Schaltgerätehersteller ihre Geräte vorkonditionieren. Es sollten dadurch jedoch Ausreißer, die die Ergebnisse stark verzerren würden, bei den ersten Schaltungen vermieden werden.

Im Folgenden ist die Versuchsmatrix dargestellt (Tabelle 3.7 und 3.8, sowie Abb. 3.25).

Tabelle 3.7: Versuchsmatrix für Modellschaltversuche - Stufe 1

Magnetfeld	Strom	Materialien	Schaltzahl
0, 10, 25, 40 mT	16, 32, 64, 128, 320 A	Ag/Ni 90/10, Ag/SnO <sub>2</sub> 88/12	10
radial / axial (in & gegen I-Richtung)		symmetrisch	

Tabelle 3.8: Versuchsmatrix für Modellschaltversuche - Stufe 2

Magnetfeld	Strom	Materialien	Schaltzahl
0, 10, 25, 40 mT	16, 32, 64, 128, 320 A	Ag/Ni 90/10, Ag/SnO <sub>2</sub> 88/12	10
radial + axial (in & gegen I-Richtung)		symmetrisch	

Die Versuche je Kontaktpaar wurden wie folgt durchgeführt:

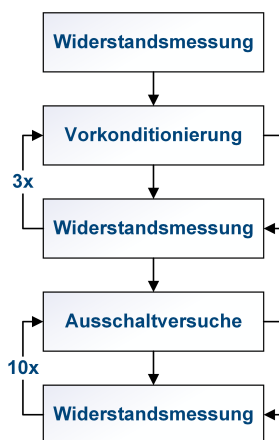


Abbildung 3.25: Versuchsablauf

Konnte keine Lichtbogenlöschung erzwungen werden, mussten nach spätestens 200 ms externe DC-Schütze den Strom abschalten.

Zusätzlich wurden die Kontakte auf ihren Abbrand untersucht. Dafür wurden die Kontakte vor dem Einbau in die Schaltkammer initial gewogen und nach den Messungen erneut gewogen.

Vor und nach den Schaltexperimenten wurden profilometrische Messungen durchgeführt, um den Abbrand und das Lichtbogenlaufverhalten besser einschätzen zu können. Dies ist in Abschnitt 4.1.1 detailliert beschrieben.

### **3.2 Einfluss des Kontaktwerkstoffes auf die Verharrdauer des Lichtbogens auf den Kontaktoberflächen (neue Kontakte)**

Hauptuntersuchungsschwerpunkt dieses Arbeitspaketes war es, zu untersuchen, wie sich Einlaufeffekte neuer Kontakte auf das Lichtbogenlaufverhalten auswirken und ob es Unterschiede in den Kontaktmaterialien bezüglich dieser Fragestellung gibt. Aus den Messungen in einem radialen Magnetfeld geht hervor, dass bei den ersten Schaltungen mit 16 A, die der Vorkonditionierung dienten, die Lichtbogenbrenndauer leicht höher als bei den nächsten 10 Schaltungen mit 16 A waren (Abb. 3.26). Gleichzeitig findet aber auch häufiger eine Kommutierung des Kathodenfußpunktes auf die Laufschiene statt. Bei den weiteren 10 Messungen mit 16 A war dies nicht der mehr der Fall.

Ag/Ni 90/10 FID7 BID8 40 mT radial

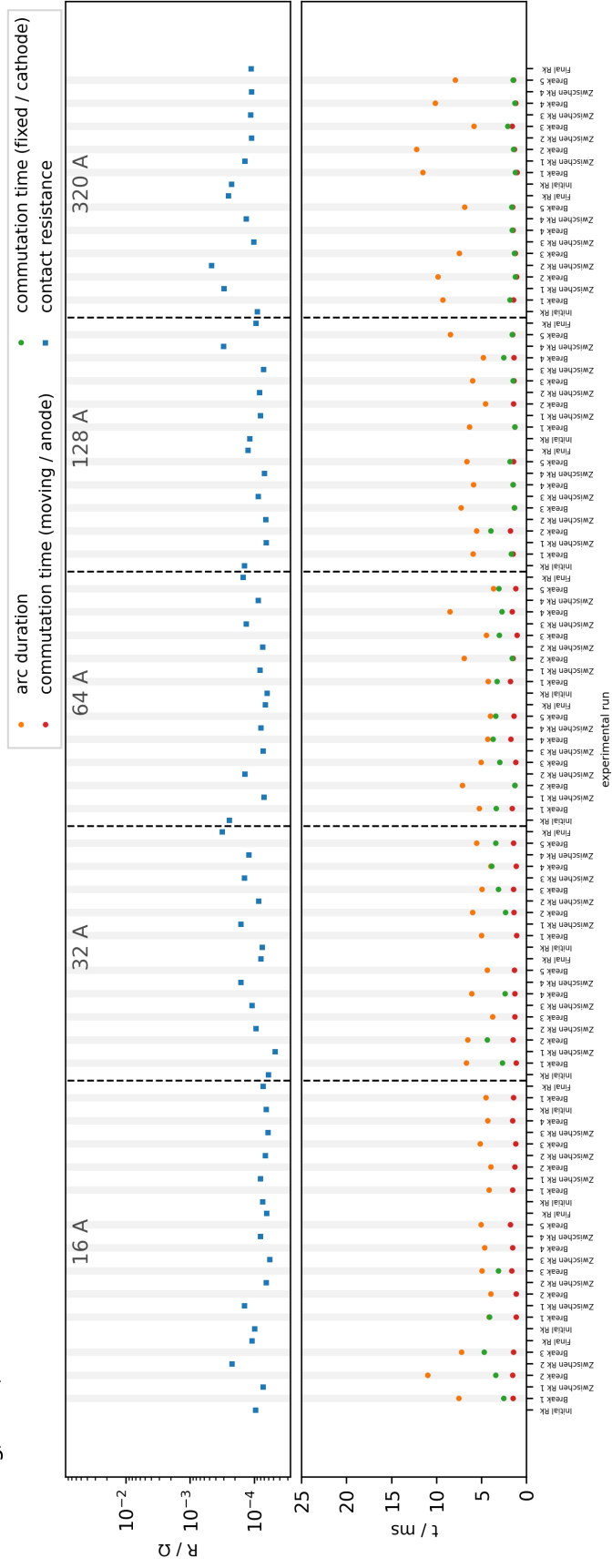


Abbildung 3.26: Einlaufverhalten der ersten 3 Schaltungen zur Vorkonditionierung der Kontakte

Dieses Verhalten konnte für beide Werkstoffe Ag/Ni 90/10 und Ag/SnO<sub>2</sub> 88/12 beobachtet werden. Ein statistisch belegbarer Unterschied zwischen den Kontaktmaterialien konnte nicht festgestellt werden. Im axialen Magnetfeld ist ein solcher Trend nur im Ansatz bei hohen Flussdichten von 40 mT zu erkennen. Bei kleineren Flussdichten von 10 mT oder 25 mT ist eine Abnahme nicht nachweisbar. Die Lichtbogenbrenndauer streut über alle Schaltungen hinweg stark. Unter gleichzeitiger Verwendung beider Magnetfelder kann ebenso, wie im radialen Magnetfeld bei den ersten drei Messungen eine erhöhte Lichtbogenbrenndauer beobachtet werden. Aus den Messungen lässt sich schlussfolgern, dass unter Verwendung eines radialen Magnetfeldes Einlaufeffekte bei neuen Kontaktflächen beobachtet werden können. Bei einem axialen Magnetfeld konnten diese nicht beobachtet werden. Das bedeutet jedoch nicht, dass diese nicht vorhanden sind. Diese sind vielmehr nicht beobachtet worden, da der Lichtbogen im axialen Magnetfeld schlecht bis gar nicht gelöscht werden konnte. Zudem kommutieren die Fußpunkte auch weniger häufig. Für genauere Aussagen und um auch eine statistische Robustheit zu haben, müssten in Zukunft mehr Schaltungen pro Kontaktpaarung durchgeführt werden. Zudem kann, bedingt durch das Versuchsdesign, keine Aussage über Einlaufeffekte bei neuen Kontakten und Strömen  $> 16$  A getroffen werden. Hierfür hätte je Stromhöhe eine separate Kontaktpaarung verwendet werden müssen.

### **3.3 Einfluss des Kontaktmaterials auf das Lichtbogenlaufverhalten des beblasenen Bogens bei höheren Schaltzahlen (beschaltete Kontaktfläche)**

Die Fragestellung dieses Arbeitspaketes sollte die Ermittlung von Unterschieden in den Kontaktmaterialien bei höheren Schaltzahlen ermitteln. Ein Unterschied in der Kommutierungsdauer der Anode und Kathode zwischen den beiden Kontaktmaterialien Ag/Ni 90/10 und Ag/SnO<sub>2</sub> 88/12 im radialen Magnetfeld konnte nicht beobachtet werden (Abb. 3.27).

Auch im axialen Magnetfeld konnte kein eindeutiger Unterschied festgestellt werden. Es scheint, als würden unter Verwendung von Ag/SnO<sub>2</sub> 88/12 die Fußpunkte häufiger auf die Laufschiene kommutieren. Die grundsätzlich seltene Kommutierung der Fußpunkte macht einen Vergleich jedoch schwer.

Auch in der Lichtbogenbrenndauer konnte kein Unterschied zwischen den beiden Materialien festgestellt werden (Abb. 3.28).

Die Kombination der Magnetfelder ändert die Beobachtungen aus dem radialen und axialen Magnetfeld nicht. Beide Kontaktwerkstoffe verhalten sich sehr ähnlich.

Das ähnliche Verhalten von Ag/Ni 90/10 und Ag/SnO<sub>2</sub> 88/12 zeigt sich nicht nur bei den oben dargestellten Versuchen mit 320 A, sondern auch bei niedrigeren Strömen bzw. weniger stark vorbelasteten Kontakten.

### **3.4 Referenzuntersuchungen an Bogensäule und Lichtbogenfußpunkten im Modellschalter ohne Magnetfeld (Strom- und Spannungsvariationen)**

Für eine analytische Untersuchung des Einflusses von Magnetfeldern auf das Lichtbogenlaufverhalten werden Referenzmessungen ohne Magnetfeld benötigt. Dieses Arbeitspaket verfolgte die Durchführung dieser Referenzuntersuchungen. Diese wurden für beide Kontaktmaterialien Ag/Ni 90/10 und Ag/SnO 88/12 durchgeführt. Im Vergleich zu den Versuchen mit Magnetfeld

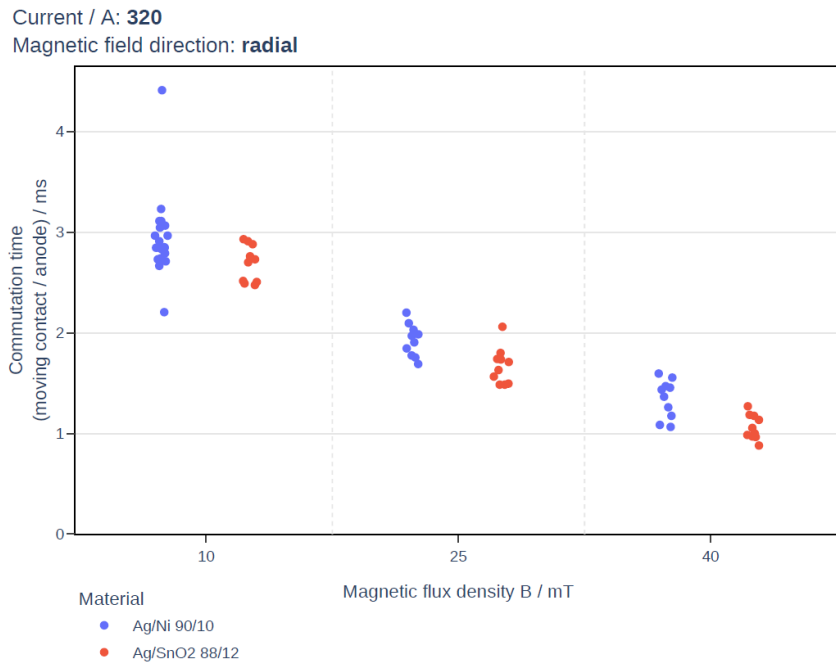


Abbildung 3.27: Vergleich von Ag/Ni 90/10 und Ag/SnO<sub>2</sub> 88/12 anhand der Kommutierungsdauer der Anode

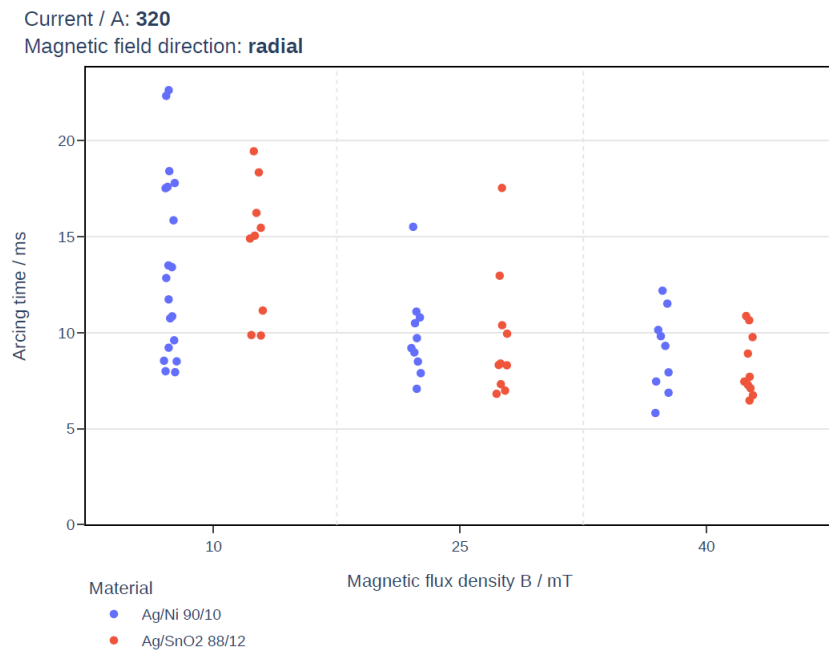


Abbildung 3.28: Vergleich von Ag/Ni 90/10 und Ag/SnO<sub>2</sub> 88/12 anhand der Lichtbogenbrenndauer

kam es ohne Magnetfeld zu keiner Lichtbogenlöschung. Es mussten für jede Schaltung die externen Schütze den Strom unterbrechen. Eine Kommutierung des Kathodenfußpunktes wurde bei keiner Schaltung beobachtet. Der Anode kommutierte ab Strömen von 128 A vereinzelt auf

die Laufschiene. Es lässt sich vermuten, dass dies mit dem größeren thermischen Auftrieb bei höheren Strömen zusammenhängt. Aus Hochgeschwindigkeitsaufnahmen geht eine undefinierte Bewegung des Lichtbogens hervor, die durch die gegenseitige Beeinflussung der Plasmastrahlen und der Strompfade verursacht wurde. Die Hochgeschwindigkeitskamera wurde mit neuen Optiken und Filtern (Nikon & Standardobjektiv sowie Zubehör) ausgestattet. Dadurch konnten optimale Lichtverhältnisse und dementsprechend gute Aufnahmen realisiert werden. Der einzige Unterschied der zwischen Ag/Ni 90/10 und Ag/SnO<sub>2</sub> 88/12 festgestellt werden konnte ist, dass bei Ag/Ni 90/10 der Anodenfußpunkt erst bei 320 A kommutiert. Unter Verwendung von Ag/SnO<sub>2</sub> 88/12 war dies bereits bei 128 A zu beobachten. Bei beiden Kontaktwerkstoffen trat bei der Messung ohne Magnetfeld die höchste Kontaktersion auf. Nur beim Kontaktwiderstand ist auffällig, dass Ag/SnO<sub>2</sub> 88/12 einen konstanteren Kontaktwiderstandsverlauf aufweist als Ag/Ni 90/10.

### 3.5 Untersuchung der Lichtbogenfußpunkte in Abhängigkeit vom Magnetfeld

Untersuchungsziel dieses Arbeitspaketes war es den Einfluss verschiedener Magnetfeldausrichtungen und -höhen auf die Lichtbogenfußpunkte zu ermitteln. Im radialen Magnetfeld zeigte sich, dass der Anodenfußpunkt früher kommutierte als der Kathodenfußpunkt. Die Stromhöhe scheint für die erste Kommutierung des Kathodenfußpunktes einen deutlichen Einfluss zu haben. Besonders für eine Flussdichten von 10 mT war dies besonders deutlich (Abb. 3.29) zu beobachten. Für den Anodenfußpunkt gilt dies nicht (Abb. 3.30).

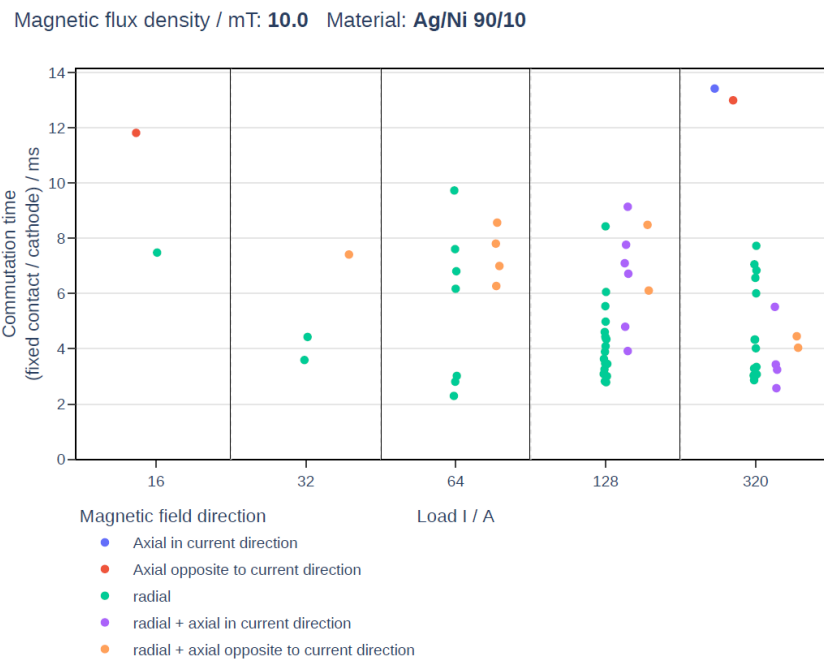


Abbildung 3.29: Kommutierungsdauer der Anode in 10 mT Magnetfeld für Ag/Ni 90/10

Die Erhöhung der Flussdichte hingegen führte bei beiden Fußpunkten zu einer Abnahme der Kommutierungsdauer (Abb. 3.32). Der Unterschied in der Veränderung der Kommutierungsdauer von 10 mT zu 25 mT war deutlicher als von 25 mT zu 40 mT. Dies lässt ein Sättigungsverhalten vermuten.

Magnetic flux density / mT: **10.0** Material: **Ag/Ni 90/10**

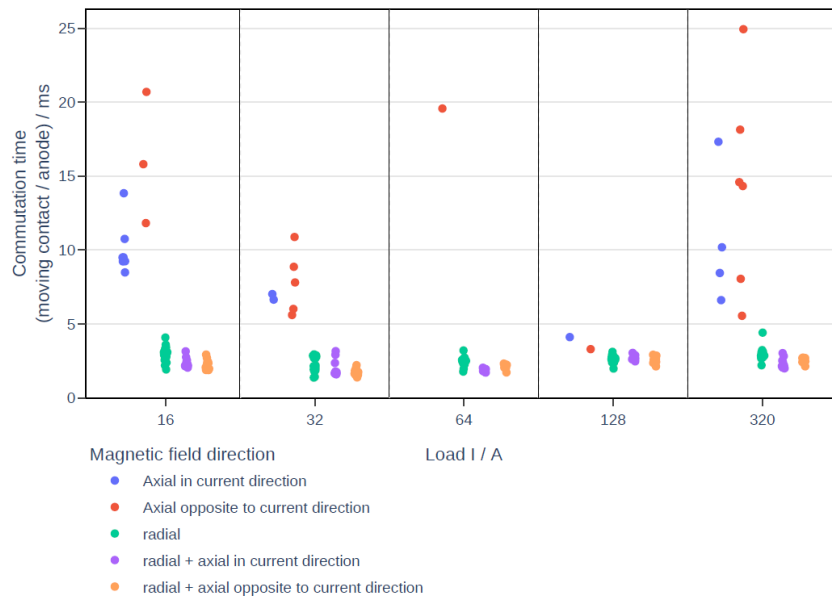


Abbildung 3.30: Kommutierungsdauer der Anode in 10 mT Magnetfeld für Ag/Ni 90/10

Current / A: **64** Material: **Ag/Ni 90/10**

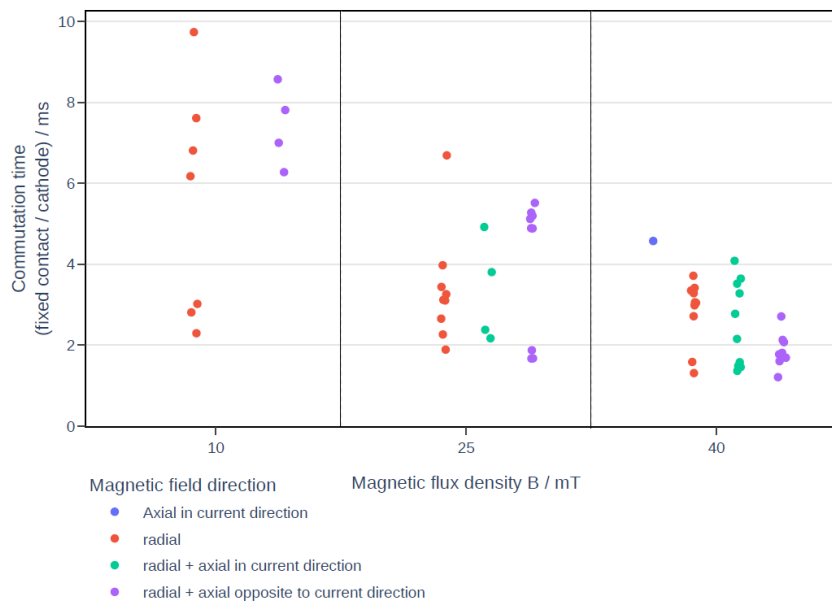


Abbildung 3.31: Kommutierungsdauer der Kathode bei 64 A für Ag/Ni 90/10

Jedoch kommutierte der Kathodenfußpunkt seltener und die Streuung der Kommutierungsdauer ist höher als die des Anodenfußpunktes. Mit größerer magnetischer Flussdichte wird diese Streuung kleiner. Zudem nimmt der zeitliche Unterschied in der Kommutierung von Kathoden- und Anodenfußpunkt ab (Abb. 3.31).

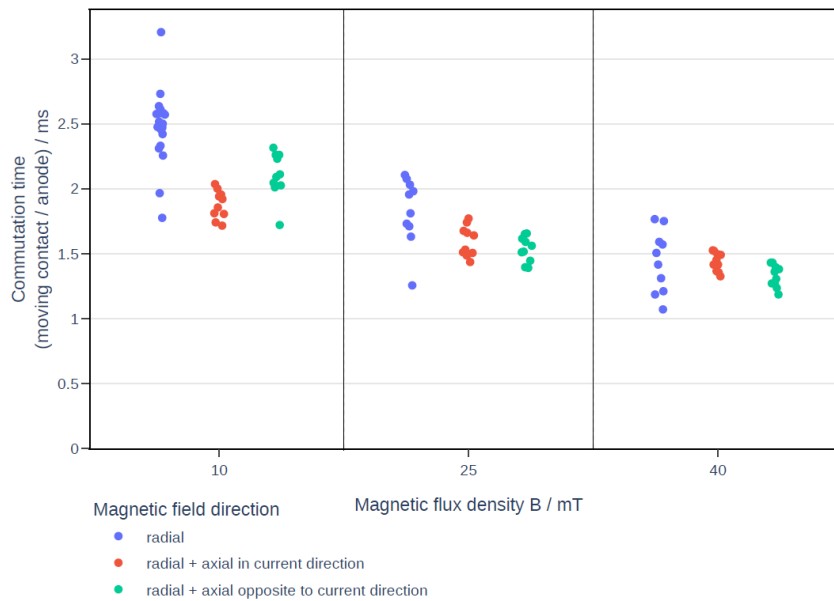


Abbildung 3.32: Kommutierungsdauer der Anode in bei 64 A Magnetfeld für Ag/Ni 90/10

Unter Verwendung eines axialen Magnetfeldes konnte das gleiche Kommutierungsverhalten der Fußpunkte beobachtet werden. Der Kathodenfußpunkt kommutiert selten bis gar nicht, während der Anodenfußpunkt häufiger und früher kommutiert. Ein Unterschied zwischen axialem Magnetfeld gegen und in Stromflussrichtung konnte nicht beobachtet werden. Werden beide Magnetfelder kombiniert verwendet, ergibt sich auch keine Veränderung im Verhalten der Fußpunkte. Auch hier ist das gleiche Verhalten wie im radialen und axialen Magnetfeld zu beobachten. Auch gibt es keinen Unterschied, ob das axiale Magnetfeld in oder gegen Stromflussrichtung ausgerichtet ist. Vergleicht man die verschiedenen Ausrichtungen gegeneinander, kommutiert der Lichtbogen im radialen und in der Kombination von radialem und axialem Magnetfeld am schnellsten auf die Laufschiene. Ein eindeutiger Unterschied zwischen diesen beiden Magnetfeldausrichtungen konnte nicht ermittelt werden. Im Ansatz zeigt sich jedoch, dass bei der Verwendung beider Magnetfelder die Kathode häufiger zu kommutieren scheint als im radialen Magnetfeld. Im Vergleich dazu kommutiert sowohl Anoden- und Kathodenfußpunkt im axialen Magnetfeld deutlich später. Zudem kommt es häufiger zu Rückkommutierungen. Auffällig im axialen Magnetfeld war jedoch die beobachtete Bewegung des Lichtbogens. Die Hochgeschwindigkeitsaufnahme zeigte, dass der Anodenfußpunkt fixiert auf dem Kontakt stehen bleibt. Der Kathodenfußpunkt hingegen drehte sich auf der Kontaktoberfläche.

Eine Erklärung hierfür konnte bei den Simulationen in Kapitel 4.3 ermittelt werden.

### 3.6 Statistische Datenanalyse und Modellidentifikation

Ziel dieses Arbeitspaketes war es, die Einflüsse der Kontaktmaterialien und des Magnetfeldes auf das Lichtbogenlaufverhalten zu bestimmen sowie die entsprechenden elektrischen Kenngrößen zu analysieren. Da sowohl bei den Versuchen an den kommerziellen DC-Schaltgeräten aus AP. 2.1, als auch bei den Untersuchungen am Modellschalter im Rahmen von Arbeitspaket 3 große Mengen an Messdaten angefallen sind, wurde in diesem Arbeitspaket eine automatisierte Auswertung

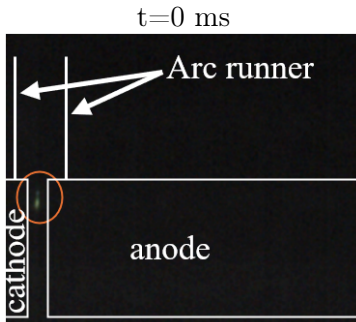


Abbildung 3.33: Lichtbogenzündung

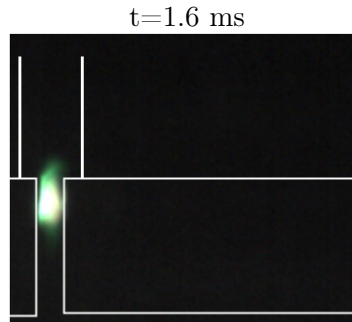


Abbildung 3.34: Start kleiner Lichtbogenbewegung

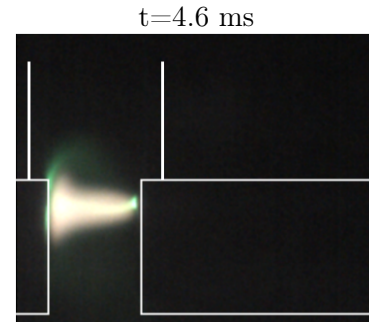


Abbildung 3.35: Formung eines glockenförmigen Lichtbogens

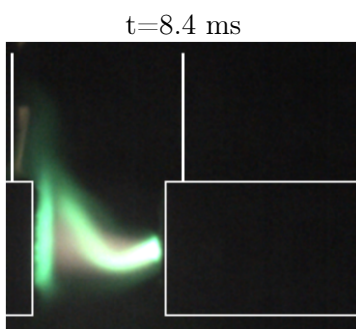


Abbildung 3.36: Start der Rotation des Lichtbogens auf dem festen Kontakt (Kathode)

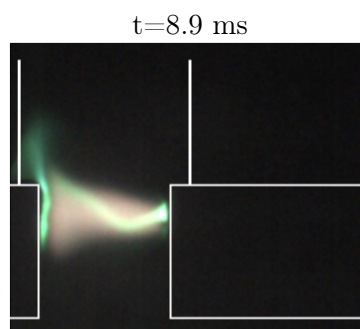


Abbildung 3.37: Verdrehung des Lichtbogens

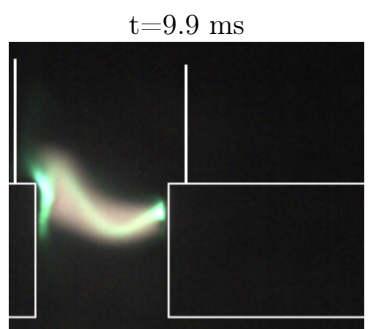


Abbildung 3.38: Verdrehung des Lichtbogens an Kathodenfußpunkt und Lichtbogen säule

hierfür entwickelt. Dabei sollten aus den elektrischen Signalen, die während der Ausschaltversuche aufgezeichnet wurden, die wichtigsten Zeitpunkte des Schaltvorgangs und darauf basierende elektrische Kenngrößen extrahiert werden. Die zugrundeliegende Methode dieser automatischen Extraktion von Zeitpunkten wird zudem im Journalbeitrag zu AP. 2.1 veröffentlicht.

Zunächst wurden die Zeitpunkte der Lichtbogenphasen aus Arbeitspaket 1 bestimmt, welche sich auch robust automatisiert aus den elektrischen Daten entnehmen lassen. Für die kommerziellen Schaltgeräte beschränkt sich die Extraktion auf die Zeitpunkte der Lichtbogenzündung und -löschung. Bei den Messungen am Modellschalter kommen noch die Zeitpunkte der ersten Lichtbogenkommütierung (separat für Beweg- und Festkontakt) hinzu, welche hier aufgrund der zusätzlichen Strommessung an den Laufschiene (AP. 2.3) ermittelt werden konnten, siehe auch Abbildung 3.39.

An den Messungen der kommerziellen Schaltgeräte wurde zusätzlich untersucht, ob der Zeitpunkt der ersten Lichtbogenbewegung kurz nach der Lichtbogenzündung ebenfalls automatisch extrahiert werden konnte. Bei manchen Messungen gab es hier deutliche Wechsel in der Steigung des Spannungssignals, welche im Allgemeinen aber nicht deutlich genug ausgeprägt waren und sich deswegen auch nicht robust ermitteln ließen.

Basierend auf den extrahierten Zeitpunkten, wurde für jede Schaltung die Lichtbogenbrenndauer, Lichtbogenarbeit und der  $I^2t$ -Wert für die weiteren Auswertungen bestimmt. Bei den Messungen am Modellschalter kamen die Arbeit und der  $I^2t$ -Wert zum Zeitpunkt der Lichtbogen-

Measurement: **Test001\_230516\_135058\_Break\_1** Material: **AgNi10/Cu**

Magnetic flux density / mT: **25** Orient.: **transversal**

Load I / A: **16** Load U / V: **230** Time constant / ms: **1**

Arcing time / ms: **5.255** Arcing energy / J: **5.1724**  $I^2t$ -Value / A<sup>2</sup>s: **0.7128**

Commutation time (moving contact / anode) / ms: **1.58** Commutation time (fixed contact / cathode) / ms: **2.69**

Commutation time 0.5A (moving contact / anode) / ms: **1.51** Commutation time 0.5A (fixed contact / cathode) / ms: **2.64**

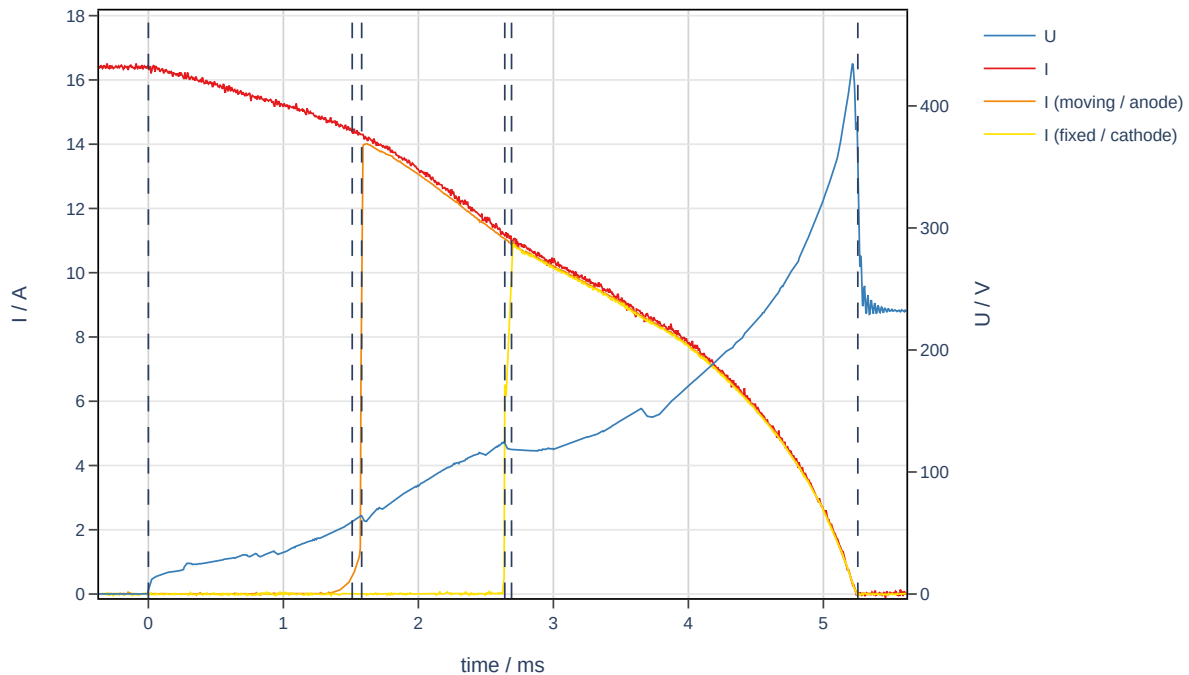


Abbildung 3.39: Messung eines Ausschaltvorgangs am Modellschalter mit extrahierten Zeitpunkten für die gesamte Lichtbogenbrenndauer sowie die Kommutierungszeiten für den Bewegt- und Festkontakt.

kommutierung hinzu sowie die Öffnungsweite der Kontakte zum Zeitpunkt der Kommutierung. Unabhängig davon wurden beim Modellschalter auch die Kontaktwiderstände zum Beginn, am Ende sowie zwischen den Schaltvorgängen gemessen und für weitere Auswertungen aufbereitet.

Mit Hilfe dieser Werte konnten nun zahlreiche grafische Vergleiche durchgeführt werden: Bei den kommerziellen Schaltgeräten erfolgte ein Vergleich der unterschiedlichen Gerätetypen unter verschiedenen Lastszenarien (Variation von Stromstärke und Zeitkonstante). Beim Modellschalter wurden verschiedene Kontaktmaterialien und Magnetfeldkonfigurationen (magnetische Flussdichte und Ausrichtung) verglichen (siehe z. B. die Abbildungen 3.27, 3.28, 3.29, 3.30, 3.31 und 3.32). Hier wurde zudem auch die zeitliche Entwicklung der Lichtbogenbrenndauer, Kontaktwiderstände und anderer Größen über alle Schaltungen pro Kontaktpaar dargestellt und untersucht (Abb. 3.26). Für die Kontaktpaare wurde weiterhin der Materialabbrand vor und nach allen Schaltversuchen gemeinsam mit der Lichtbogenenergie grafisch dargestellt.

Weitere Analysen im Rahmen dieses Arbeitspaketes beinhaltete die zeitliche Synchronisation von Hochgeschwindigkeitsvideoaufnahmen mit den zugehörigen elektrischen Signalen sowie Untersuchungen zur Bestimmung eines Homogenitätsmaßes für die Kontaktmaterialien im Rahmen der Materialanalyse. Die automatische Auswertung wurde zuletzt auch auf die Messungen am Demonstratorschaltgerät aus AP. 5.5 angewendet, um dessen Leistungsfähigkeit beurteilen zu können.

### 3.7 Optimierung des Magnetfeldes für Ausschaltvorgänge (x, y, z-Komponente, B-Feld)

Ziel dieses Arbeitspaketes war es, basierend auf den Ergebnissen aus Kapitel 3.5, eine optimale Magnetfeldausrichtung und -höhe für die Beeinflussung der Lichtbogenfußpunkte zu ermitteln. Die Hauptideen aus den Versuchen sind, dass sich ein radiales und eine Kombination aus radialem und axialem Magnetfeld am besten für die Lichtbogenkommutierung und -löschung eignen. Besonders interessant ist hierbei die Beobachtung, dass es so scheint, als würde die Kathode im kombinierten Magnetfeld bei niedrigen Strömen häufiger auf die Laufschiene kommutieren, als im radialen Magnetfeld. Das axiale Magnetfeld führt hingegen zu einer vollständigen Belastung der Kontaktfläche. Dies resultiert in einem konstanten Kontaktwiderstand. Grundsätzlich sind höhere Flussdichten sinnvoll. Eine magnetische Flussdichte von 40 mT hat sich nicht negativ auf die Kontakterosion ausgewirkt. Im Gegenzug konnte die Lichtbogenbrenndauer und die Kommutierungsdauer verkürzt werden. Nur bei Verwendung von Ag/Ni 90/10 im radialen Magnetfeld konnte mit zunehmender Flussdichte ein höherer Abbrand gemessen werden. Unter gleichzeitiger Verwendung von radialem und axialem Magnetfeld wurden in den Versuchen bisher die gleichen Flussdichten eingestellt. Ein Versuch wurde mit unterschiedlichen Flussdichten durchgeführt. Das radiale Magnetfeld wurde auf 40 mT eingestellt und das axiale Magnetfeld auf 20 mT. Eine Verbesserung der Lichtbogenkommutierung und -löschung konnte dabei nicht festgestellt werden. Hierzu müssten jedoch zukünftig weitere Versuche durchgeführt werden. Da die Ergebnisse für höhere Flussdichten sehr vielversprechend sind, sollen in Zukunft weitere Versuche mit deutlich höheren Flussdichten durchgeführt werden. Von Interesse sind Werte von 80 mT, 100 mT, 200 mT, 300 mT.

# Arbeitspaket 4

## 4.1 Entwicklung eines parametrischen Werkstoffmodells zum DC-Lichtbogenlaufverhalten

Ziel dieses Arbeitspaketes war es aus der Korrelation von elektrischen- und werkstoffanalytischen Ergebnissen, Erkenntnisse bezüglich des Einflusses des Kontaktmaterials auf das Lichtbogenlaufverhalten zu erhalten. Es sollte ein Werkstoffmodell (parametrisch und phänomenologisch) erstellt werden.

### 4.1.1 Werkstoffanalysen verschiedener Werkstoffe für Modellschalterexperimente

Für die Modellschalterexperimente wurden 2 unterschiedliche Kontaktwerkstoffe verwendet. Ein Ag/Ni 90/10 und ein Ag/SnO<sub>2</sub> 88/12. Die Kontaktwerkstoffe sowie das Aufbringen und die Herstellung der Endgeometrie der Plättchen wurde durch den assoziierten Partner Heraeus übernommen. Die Anforderungen an die Geometrie der Kontaktplättchen und deren Endbearbeitung wurde in Projekttreffen gemeinsam definiert und basiert auf der an der TU Ilmenau verwendeten Geometrie für den Modellschalter. Die Materialbereitstellung und Kontaktträgerfertigung wurde durch den Projektpartner E-T-A übernommen.

### Geometrie und Topographie der Kontakte

Die in den Projekttreffen definierte Geometrie wurde im Rahmen der Initialuntersuchungen für jeden Kontakt mittels des angeschafften Hochdurchsatzprofilometers vor jedem Schaltexperiment überprüft. Da die profilometrischen Untersuchungen auch zur Kontrolle der Einbaulage genutzt werden sollten, wurde gemeinsam definiert, dass die Kontakte im Modellschalter gleich eingebaut werden wie sie auch im Profilometer untersucht werden. Das bedeutet, die Beschriftung im Modellschalter und im Profilometer nach oben ausgerichtet. Dies ist anschaulich in Abbildung 4.40 dargestellt.

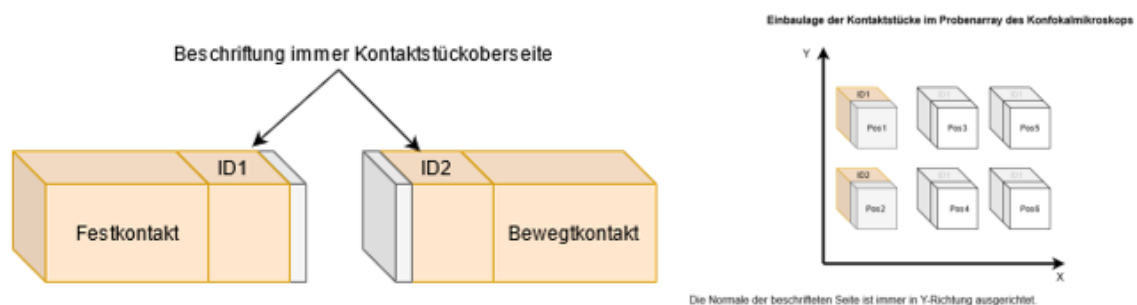


Abbildung 4.40: Links: Einbaulage der Kontakte im Modellschalter. Rechts: Einbaulage im Profilometer.

Beispielhafte Darstellungen für die mittels Hochdurchsatzprofilometrie gewonnenen Daten sind nachfolgend für einen Ag/SnO<sub>2</sub> 88/12 Kontaktwerkstoff vor und nach dem Beschalten im

Modellschalter in Abbildung 4.41 für eine Übersichtsaufnahme mit dem 10x-Objektiv und in Abbildung 4.42 für topographische Messungen mit dem 50x-Objektiv.

Die Initialuntersuchungen aller Kontakte vor dem Schaltvorgang zeigt, dass die geometrischen Vorgaben zur Herstellung der Zylinderoberfläche mit einem Radius von 80 mm bei um 90° gedrehtem Kontaktträger immer mit  $80 \pm 10$  mm eingehalten wurden. Somit standen immer gekreuzte Zylinderoberflächen für den ersten Schaltvorgang zur Verfügung.

Die Ergebnisse der Messungen mit dem 50x-Objektiv wurden für Berechnungen von Oberflächen- und Rauheitsparametern herangezogen, da hier die erforderliche Genauigkeit des Objektivs gegeben ist.

### **Werkstoffgefüge**

In den nachfolgenden Abbildungen 4.43 und Abbildung 4.44 sind die Gefüge der beiden Kontaktwerkstoffe anhand lichtmikroskopischer Aufnahmen von Querschliffen der Modellschalterkontakte dargestellt. Beim Ag/Ni 90/10 Werkstoff ist deutlich die Strangpressrichtung anhand der horizontal lang gezogenen dunkel kontrastierten Ni-Partikel zu erkennen. Diese sind bis an die Oberfläche des Kontaktplättchens zu erkennen. Die Endbearbeitung des Werkstoffs hat demnach keinen großen Einfluss auf das Gefüge an der Oberfläche. Die Bindenaht (solder joint) ist nahezu porenfrei, was auf eine gute elektrische und thermische Anbindung der Kontaktwerkstoffauflage zum Kupferträger schließen lässt und somit keine Einflüsse auf die Schaltexperimente zu erwarten sind.

Der zweite Werkstoff (Ag/SnO<sub>2</sub> 88/12) wurde mit einer anderen Technologie hergestellt und weist daher ein völlig anderes Gefüge auf. Die dunklen Partikel entsprechen dem Zinnoxid sowie Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und Verbindungen aus SnO<sub>2</sub> und Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. An der Oberfläche der Partikel zeigt sich scheinbar eine Verformungsschicht (Vgl. Bild ID 0088 surface 50x), welche scheinbar aus reinem Silber besteht. Dies kann einen Einfluss auf den initialen Kontaktwiderstand und das Laufverhalten der Fußpunkte des Lichtbogens bei ersten Schaltversuchen haben und muss beachtet werden. Für den Ag/SnO<sub>2</sub> 88/12 Kontakt trifft ebenfalls zu, dass die Bindenaht nahezu porenfrei ist, jedoch unterscheidet sich diese vom Ag/Ni 90/10, da hier eine Silber-Auflage unterhalb des (siehe Bild ID0088 joint 50x) Kontaktwerkstoffplättchens aufgebracht ist, um eine bessere Lötbarkeit mit dem verwendeten Lot zu gewährleisten. Aufgrund der geringen Anzahl von Bindenahtfehlern sind auch bei diesem Werkstoff keine elektrischen bzw. thermischen Einflüsse auf die Schaltexperimente zu erwarten.

### **Qualitative Phasenanalyse**

Zur Identifikation der enthaltenen Verbindungen wurde die Röntgendiffraktometrie genutzt. Hierbei können kristalline Reinelemente oder Verbindungen von Elementen über deren Kristallstruktur und Netzebenenabstände identifiziert werden.

Für den Silber-Nickel-Kontaktwerkstoff Ag/Ni 90/10 wurden beide Elemente Ag und Ni identifiziert, welche kubisch flächenzentriert kristallisieren. Anhand der nicht gleichen Intensitäten im Vergleich zu den für Pulver auftretenden Peaks kann eine Vorzugsorientierung bzw. Textur der Probe angenommen werden (Abb. 4.45). Diese hat Auswirkungen auf die physikalischen Eigenschaften der Probe, da dies mit anisotropen Materialeigenschaften einhergeht. Derartige Vorzugsorientierungen entstehen bei diesen Werkstoffen durch den Herstellungsprozess, z. B. Strangpressen.

Im Silber-Zinnoxid-Werkstoff Ag/SnO<sub>2</sub> 88/12 konnten 3 verschiedene Phasen identifiziert werden (Abb. 4.46). Hierbei handelt es sich um Ag mit kubisch flächenzentrierter Kristallstruktur,

Zinnoxid ( $\text{SnO}_2$ ) mit tetragonaler Kristallstruktur und Bismutstannat ( $\text{Bi}_2\text{Sn}_2\text{O}_7$ ) mit orthorhombischer Kristallstruktur. Auch bei diesem Werkstoff sind Vorzugsorientierungen festzustellen, was anisotrope Materialeigenschaften hervorruft.

#### 4.1.2 Übersichtliche Darstellung und Parameterextraktion der geometrischen und topographischen Daten

Anhand der makroskopischen Aufnahmen ist leicht die beschaltete Kontaktoberfläche zu erkennen. Zudem lässt sich ermitteln, an welcher Stelle der Lichtbogen die meiste Beeinflussung (u. a. Abbrand, Materialübertrag) auf den Kontaktwerkstoff hatte. Durch farbliche Unterschiede lassen sich Ablagerungen bzw. Fremdstoffe an der Oberfläche identifizieren, wie es bspw. für geringe Cu-Anteile bei beiden Kontaktwerkstoffen der Fall war.

Basierend hierauf konnte der Schaltzustand aller Kontakte als Parameter für die Korrelation mit elektrischen Kenndaten ermittelt werden. Zudem konnten erhaltene Werte für den Kontaktwiderstand und Massensummenabbrand auf Plausibilität geprüft werden. Neben diesen Darstellungen wurden auch die gemessenen Intensitäten sowie Höhenprofile abgebildet, um qualitative Ergebnisse zu extrahieren.

#### 4.1.3 Korrelationen von elektrischen und werkstoffbasierten Daten

Um Korrelationen von elektrischen Messdaten und Werkstoffdaten erstellen zu können, sind manuelle Begutachtungen des Schaltzustands der Oberflächen notwendig. Hierzu wurde eine übersichtliche Darstellung der mittels Hochdurchsatzprofilometrie gewonnenen Daten entwickelt. Beispielhaft sind die makro- und mikroskopischen Aufnahmen in Abbildung 4.47 und Abbildung 4.48 für drei Kontaktpaare vor und nach den Schaltvorgängen dargestellt.

Basierend auf den übersichtlichen Darstellungen, dem Summenabbrand und den im Modellschalter gewonnenen elektrischen Kenngrößen für das Lichtbogenlaufverhalten, wurde eine gemeinsame Tabelle erstellt und anhand von Streudiagrammen gegenübergestellt (Abb. 4.49). Diese Darstellungen wurden für alle Ströme generiert, obwohl nur der Endzustand nach 320 A (Summenabbrand, Schaltzustand) bewertet werden kann, da sich alle vorherigen Schaltexperimente (16 - 128 A) überlagern.

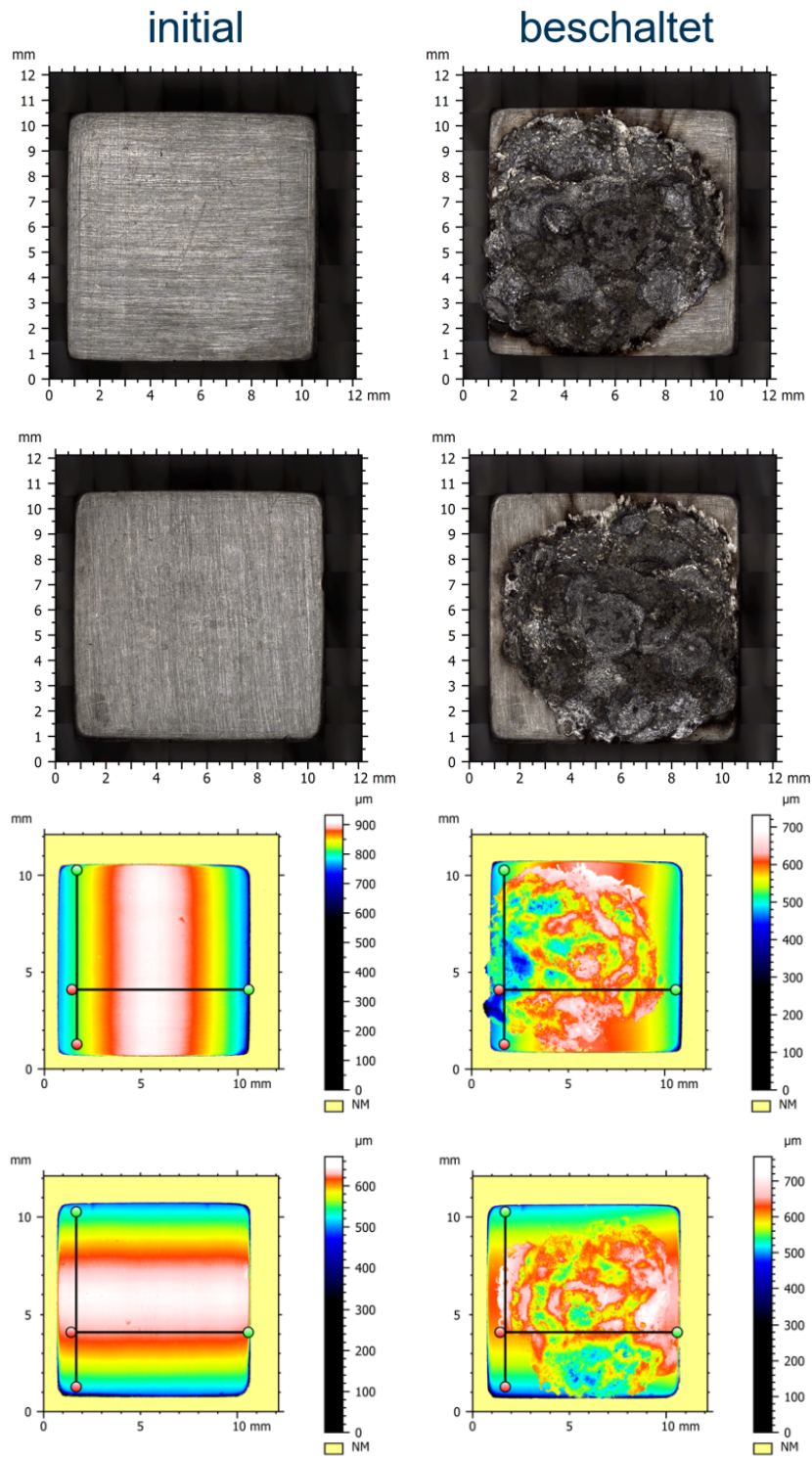


Abbildung 4.41: Beispiel für Initial- und Schaltzustandsuntersuchung mittels Hochdurchsatzprofilometer für ein Kontaktpaar aus Ag/SnO<sub>2</sub> 88/12 Kontaktwerkstoff mit 10x-Objektiv. Links: Aus vielen Einzelmessungen zusammengesetzte makroskopische RGB-Farbaufnahme vor und nach dem Schaltvorgang. Rechts: Aus vielen Einzelmessungen zusammengesetzte Geometrie/Topographie zur Bestimmung der Radien und Höhenunterschieden vor- und nach dem Schaltvorgang.

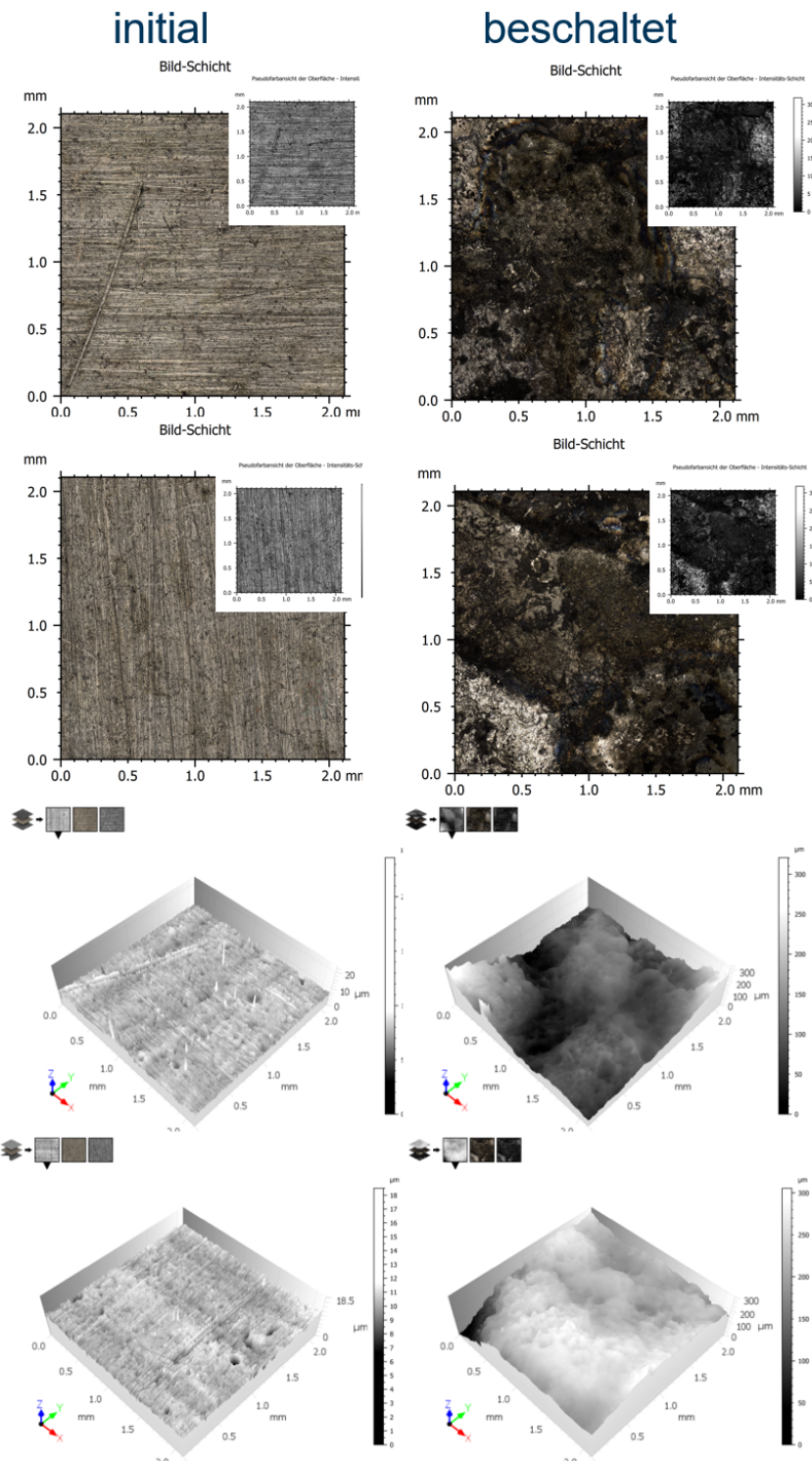


Abbildung 4.42: Beispiel für Initial- und Schaltzustandsuntersuchung mittels Hochdurchsatzprofilometer für ein Kontaktpaar aus Ag/SnO<sub>2</sub> 88/12 Kontaktwerkstoff mit 50x-Objektiv. Links: Aus vielen Einzelmessungen zusammengesetzte mikroskopische RGB-Farbaufnahme vor und nach dem Schaltvorgang. Rechts: Aus vielen Einzelmessungen zusammengesetzte 3D-Darstellung der Topographie der Oberfläche vor und nach dem Schaltvorgang.

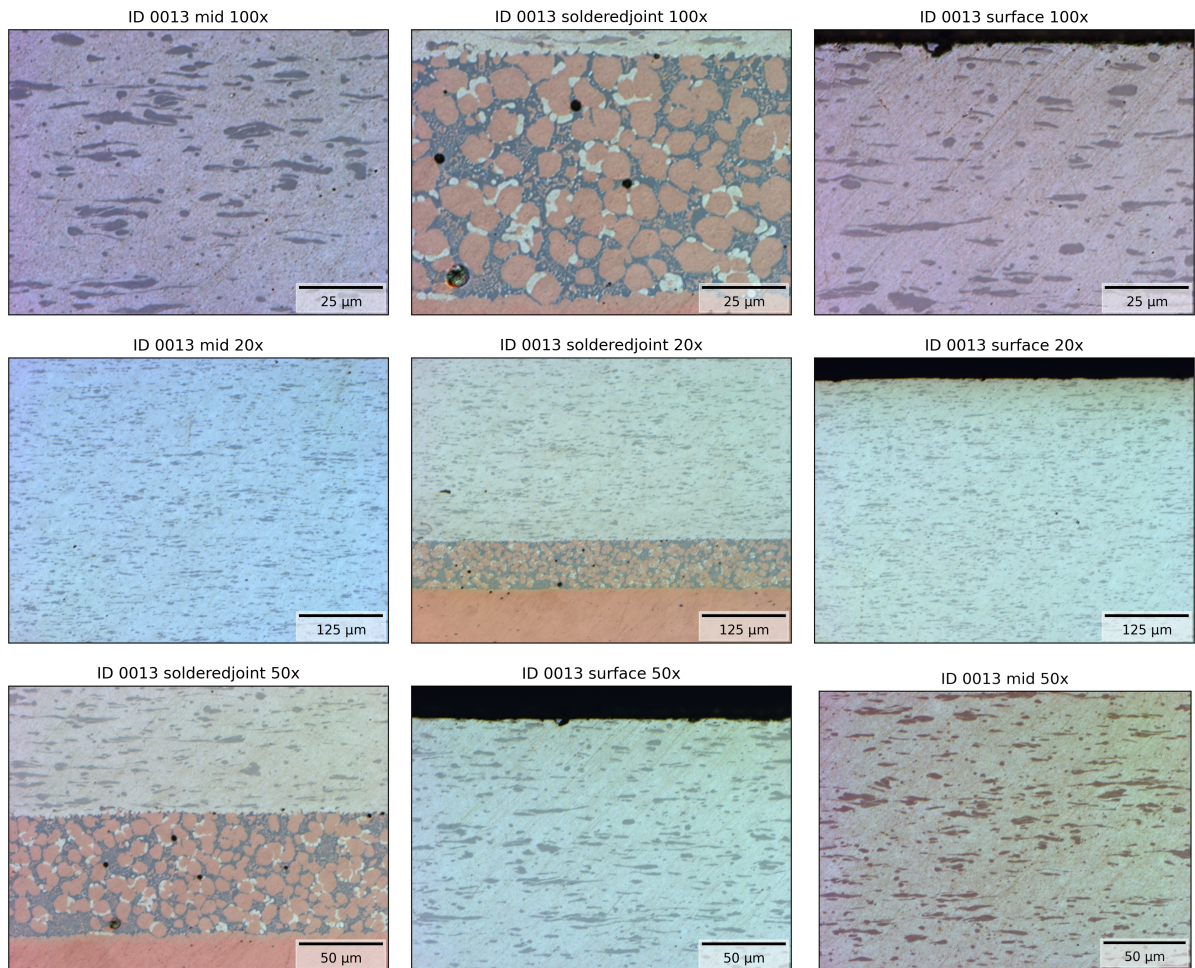


Abbildung 4.43: Lichtmikroskopische Aufnahmen des Kontaktwerkstoffgefüges und der Bindenaht (Querschliff) eines Modellschalterkontakts mit Ag/Ni 90/10 Kontaktwerkstoffauflage

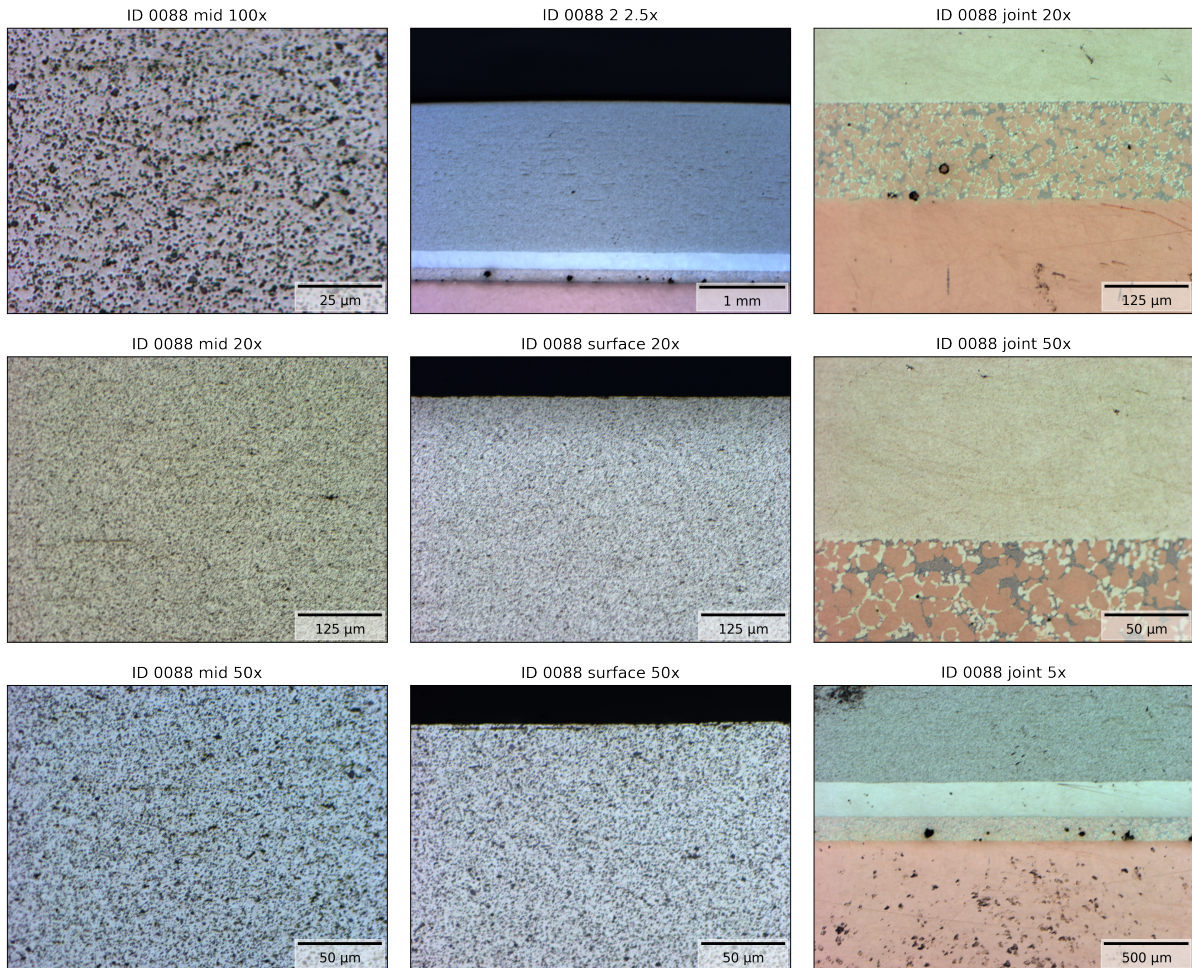


Abbildung 4.44: Lichtmikroskopische Aufnahmen des Kontaktwerkstoffgefüges und der Bindaht (Querschliff) eines Modellschalterkontakts mit Ag/SnO<sub>2</sub> 88/12 Kontaktwerkstoffauflage

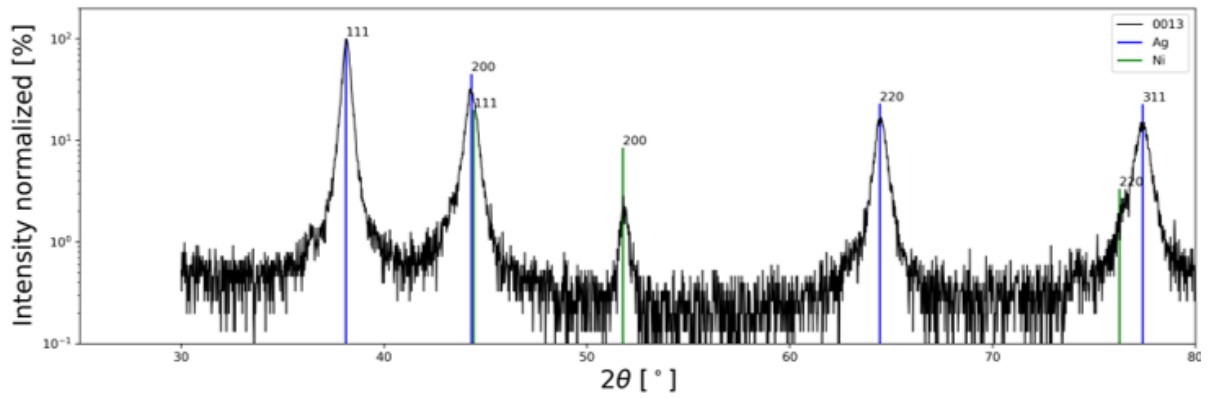


Abbildung 4.45: Röntgendiffraktogramm eines Ag/Ni 90/10 Kontaktwerkstoffs mit identifizierten Phasen Ag (kubisch flächenzentriert) und Ni (kubische flächenzentriert) in logarithmischer Skalierung

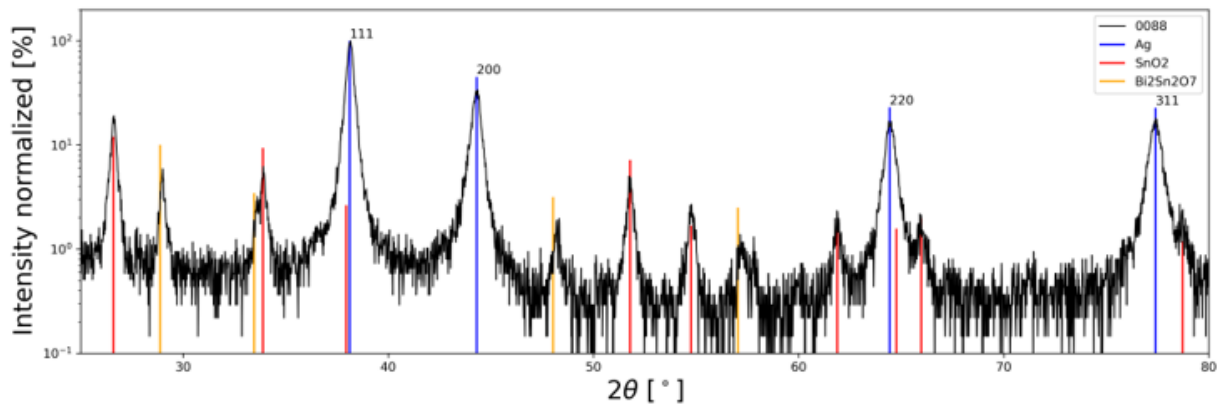


Abbildung 4.46: Röntgendiffraktogramm eines Ag/SnO<sub>2</sub> 88/12 Kontaktwerkstoffs mit identifizierten Phasen Ag (kubisch flächenzentriert), SnO<sub>2</sub> (tetragonal) und Bi<sub>2</sub>Sn<sub>2</sub>O<sub>7</sub> (orthorhombisch) in logarithmischer Skalierung

## F1-B6 (AgNi9010\_Cu) initial

10x RGB

10x height profile

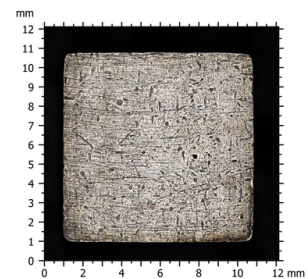
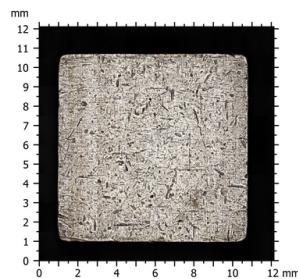
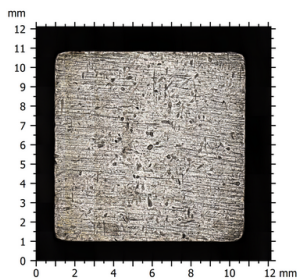
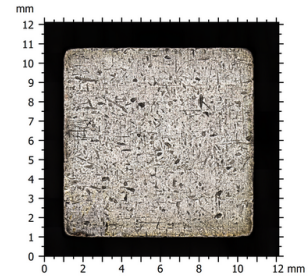
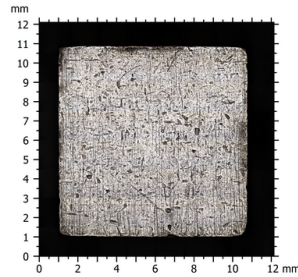
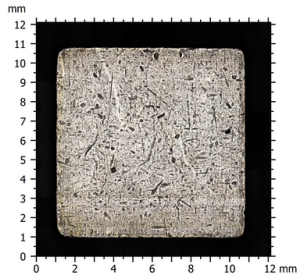
10x intensity

50x RGB

50x topography

50x 3D profile

observations



## F1-B6 (AgNi9010\_Cu) switched

10x RGB

10x height profile

10x intensity

50x RGB

50x topography

50x 3D profile

observations

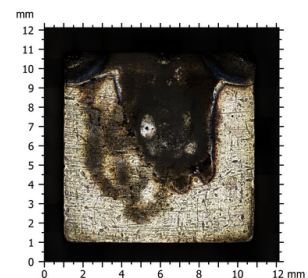
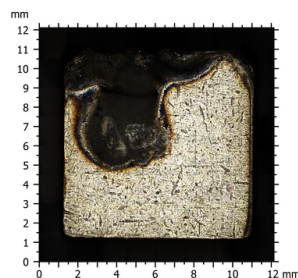
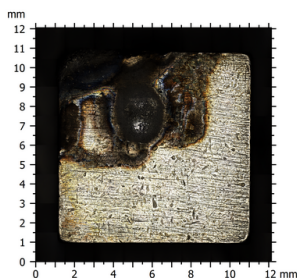
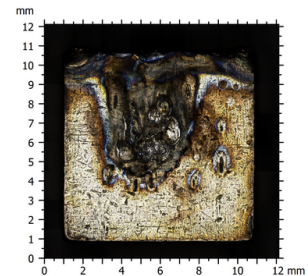
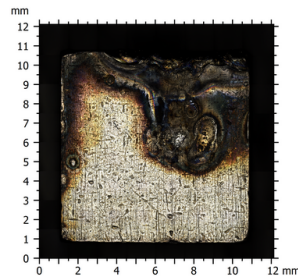
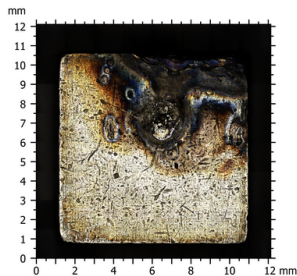
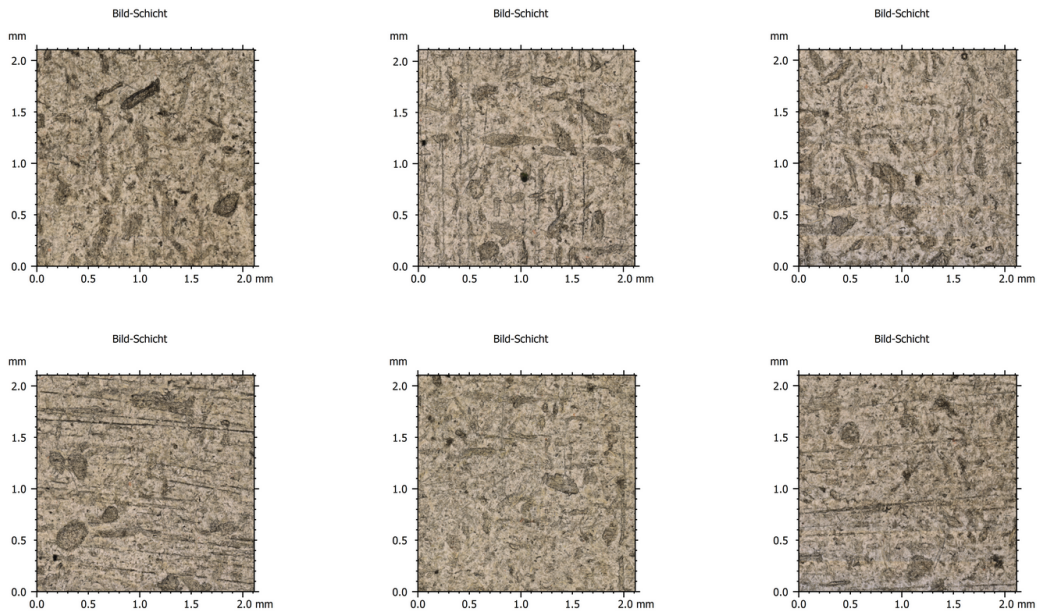


Abbildung 4.47: Vergleich der makroskopischen Aufnahmen der Kontaktoberflächen vor (oben) und nach (unten) den Schaltvorgängen für drei Kontaktpärchen mit der Kontaktwerkstoffauflage Ag/Ni 90/10

# F1-B6 (AgNi9010\_Cu) initial

[10x RGB](#) [10x height profile](#) [10x intensity](#) [50x RGB](#) [50x topography](#) [50x 3D profile](#) [observations](#)



# F1-B6 (AgNi9010\_Cu) switched

[10x RGB](#) [10x height profile](#) [10x intensity](#) [50x RGB](#) [50x topography](#) [50x 3D profile](#) [observations](#)

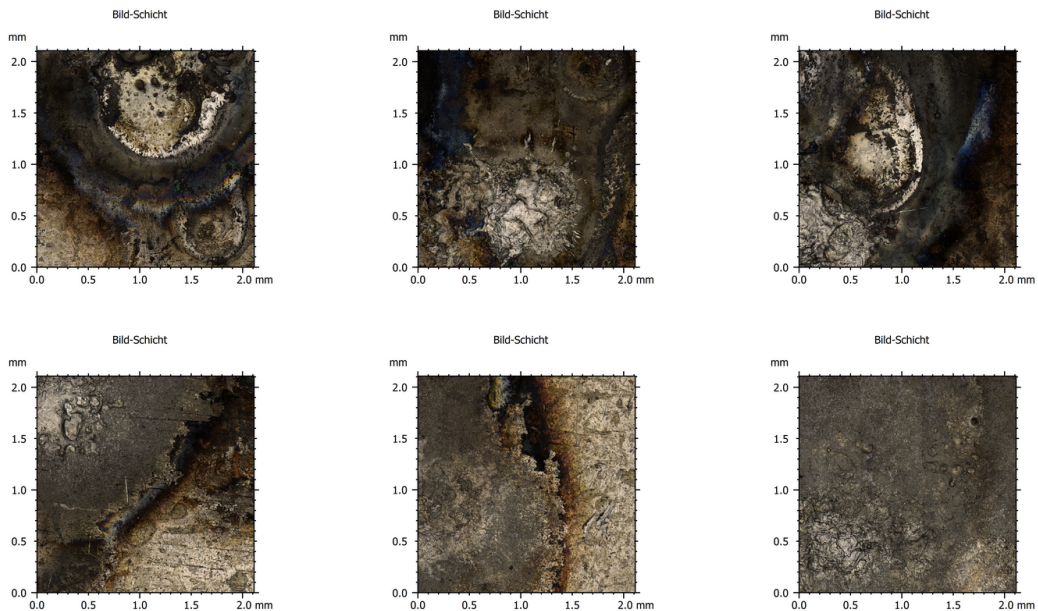


Abbildung 4.48: Vergleich der mikroskopischen Aufnahmen der Kontaktoberflächen vor (oben) und nach (unten) den Schaltvorgängen für drei Kontaktpärchen mit der Kontaktwerkstoffauflage Ag/Ni 90/10

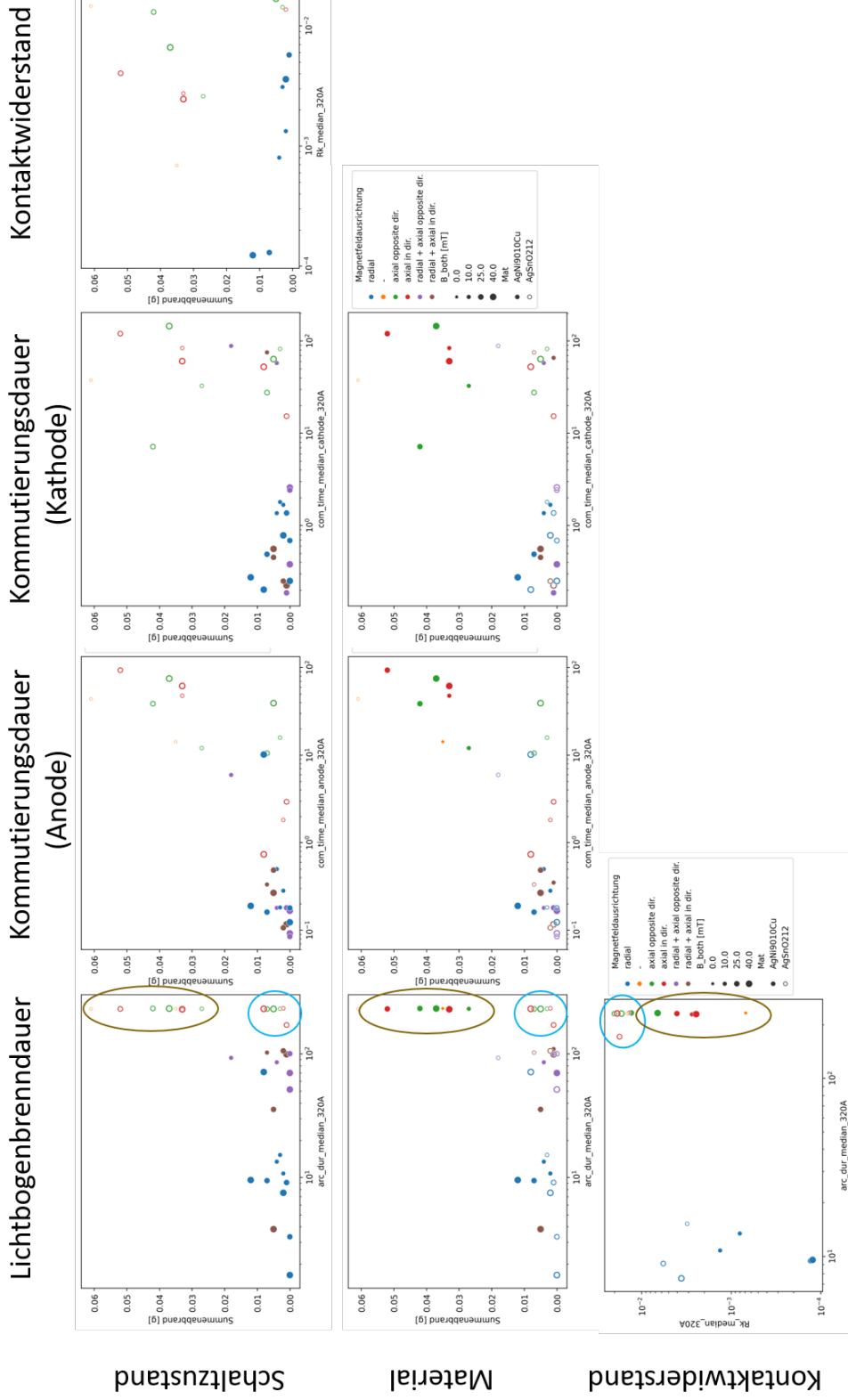


Abbildung 4.49: Streudiagramme elektrischer Kenngrößen, dem Material und dem Schaltzustand

Anhand der Abbildung 4.49 können die Minima und Maxima der Medianwerte der Lichtbogenbrenndauer, der Kommutierungsdauer auf Anode und Kathode sowie Kontaktwiderstand und Summenabbrand extrahiert werden, welche den Einfluss der unterschiedlichen Magnetfeldausrichtungen auf die Lichtbogenbrenndauer, Kommutierungsdauer und den Kontaktwiderstand in Korrelation mit dem Summenabbrand darstellen. Eine Darstellung dieser Werte ist in Tabelle 4.9 gegeben.

Tabelle 4.9: Minimal- und Maximalwerte des Medians verschiedener elektrischer Kenngrößen, abhängig vom Material und dem Schaltzustand nach allen Schaltvorgängen (letzter: 320 A Beschaltung)

Magnetfeldausrichtung Parameter (Median)	Material	axial		radial	
		min	max	min	max
Lichtbogenbrenndauer (320 A) [ms]	Ag/SnO <sub>2</sub> 88/12	171	234	1,63	71
	Ag/Ni 90/10	228	232	9,5	13,5
Kommutierungsdauer Anode (320 A) [ms]	Ag/SnO <sub>2</sub> 88/12	0,7	40	0,12	0,18
	Ag/Ni 90/10	12	94	0,16	0,5
Kommutierungsdauer Kathode (320 A) [ms]	Ag/SnO <sub>2</sub> 88/12	0	82	0,2	1,8
	Ag/Ni 90/10	7	120	0,27	1,68
Schaltzustand (320 A)	Ag/SnO <sub>2</sub> 88/12	voll		partiell	
	Ag/Ni 90/10	voll		partiell	
Kontaktwiderstand (320 A) [mΩ]	Ag/SnO <sub>2</sub> 88/12	13,7	20,2	3,1	5,7
	Ag/Ni 90/10	2,5	13,1	0,1	1,3
Summenabbrand (320 A) [mg]	Ag/SnO <sub>2</sub> 88/12	1	8	1	3
	Ag/Ni 90/10	27	52	2	12

Eine Interpretation der vorhandenen extrahierten Daten erlaubt folgende Aussagen zum Zustand nach 320 A:

- Beschaltungszustand: Die Kontaktoberfläche wird mit dem axialen Magnetfeld vollständig und mit dem radiale Magnetfeld nur partiell beschaltet. Dies ist unabhängig vom verwendeten Kontaktmaterial (hier Ag/SnO<sub>2</sub> 88/12 und Ag/Ni 90/10).
- Lichtbogenbrenndauer:
  - Die minimale Lichtbogenbrenndauer ist für Ag/SnO<sub>2</sub> 88/12 mit axialem Magnetfeld um das ca. 100-fache länger als mit radialem Magnetfeld. Die maximale Lichtbogenbrenndauer ist um das etwa 3-fache länger.
  - Die minimale Lichtbogenbrenndauer ist für Ag/Ni 90/10 mit axialem Magnetfeld um das ca. 24-fache länger als mit radialem Magnetfeld. Die maximale Lichtbogenbrenndauer ist um das etwa 17-fache länger.
  - Die minimale mittlere Lichtbogenbrenndauer wurde für Ag/SnO<sub>2</sub> 88/12 bei radialem Magnetfeld mit ca. 1,63 ms gemessen, die maximale Lichtbogenbrenndauer hingegen betrug 71 ms. Dies zeigt eine hohe Streuung der Messwerte für die Lichtbogenbrenndauer des Ag/SnO<sub>2</sub> 88/12 Werkstoffs.
  - Die minimale mittlere Lichtbogenbrenndauer wurde für Ag/Ni 90/10 bei radialem Magnetfeld mit ca. 9,5 ms gemessen, die maximale Lichtbogenbrenndauer hingegen

betrug 13 ms. Dies zeigt im Vergleich mit Ag/SnO<sub>2</sub> 88/12 eine geringere Streuung der Messwerte für die Lichtbogenbrenndauer des Ag/Ni 90/10 Werkstoffs.

- Kommutierungsdauer:
  - Die maximale mittlere Kommutierungsdauer der Anode ist für beide Materialien bei radialem Magnetfeld wesentlich kürzer als bei axialem Magnetfeld.
  - Die minimale mittlere Kommutierungsdauer der Anode ist für beide Materialien bei radialem Magnetfeld wesentlich kürzer als bei axialem Magnetfeld.
  - Die maximale mittlere Kommutierungsdauer der Kathode wird scheinbar durch ein radiales Magnetfeld stärker beeinflusst, als die minimale mittlere Kommutierungsdauer.
- Schaltzustand:
  - Für beide Werkstoffe zeigt sich bei Verwendung eines axialen Magnetfelds eine vollflächige Beschaltung der Kontaktoberfläche, wohingegen bei appliziertem radialem Magnetfeld nur eine partielle Beschaltung der Oberfläche stattfindet und sich die Lichtbogenfußpunkte eher an den Kanten der Kontakte aufhalten.
- Kontaktwiderstand:
  - Für Ag/SnO<sub>2</sub> 88/12 wurden sowohl im axialen, als auch im radialen Magnetfeld höhere Kontaktwiderstände als für Ag/Ni 90/10 gemessen.
  - Bei partieller Beschaltung (radiales Magnetfeld) zeigen sich für beide Werkstoffe um den Faktor von etwa 10 niedrigere Kontaktwiderstände.
  - Die niedrigeren Werte sind auf die partielle Beschaltung zurückzuführen.
- Summenabbrand:
  - Der Summenabbrand ist im Werkstoffvergleich für Ag/SnO<sub>2</sub> 88/12 niedriger als für Ag/Ni 90/10.
  - Tendenziell zeigt sich ein niedrigerer Summenabbrand bei beiden Werkstoffen durch Verwendung des radialen Magnetfelds. Dies könnte auf die partielle Beschaltung und kürzere Lichtbogenbrenndauer zurückzuführen sein.

Zusammenfassend kann statuiert werden, dass die radiale Komponente des Blasmagnetfeldes einen größeren Einfluss auf die Bogensäule aufweist und somit zu einer kürzeren Lichtbogenbrenndauer und Kommutierungsdauer führt. Die axiale Komponente zeigt eher einen Einfluss bei kleinen Kontaktöffnungsstrecken, wenn keine Lichtbogensäule ausgeprägt ist. Dies muss jedoch bei zukünftigen Untersuchungen genauer beobachtet werden.

## 4.2 Numerische Simulation der Magnetfeldverteilung des Modellschalters

Für die simulationsgestützte Analyse des Verhalten des Lichtbogens sollte in diesem Arbeitspaket die Magnetfeldverteilung im Modellschalter nachgebildet werden. Die in AP. 2.4 entworfenen Helmholtzspulen sollten ebenso in Comsol simuliert werden. Ziel war es, daraus neben der Höhe des Magnetfeldes auch die Verteilung des magnetischen Feldes analysieren zu können. In einem ersten Schritt wurden die Spulenpaare für die radiale Beeinflussung getrennt von dem Spulenpaar für die axiale Beeinflussung des Lichtbogens simuliert (Abb. 4.50). Die einzelnen Simulationen

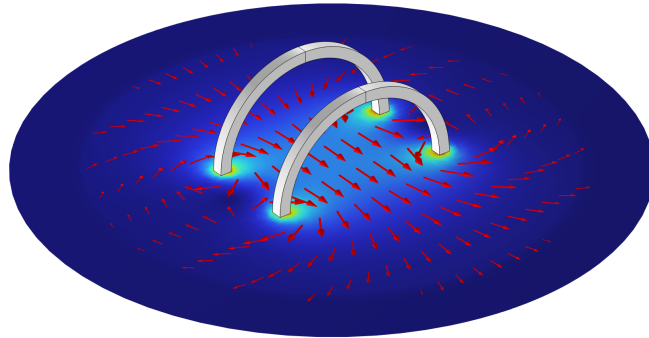


Abbildung 4.50: Simulation der axialen Helmholtzspulen

konnten durch die in AP. 2.4 durchgeführten Messungen verifiziert werden. Dafür wurde jeweils die Höhe des B-Feldes im Zentrum eines Spulenpaares mit den Simulationswerten abgeglichen. Nach der Verifikation der Simulationen wurden diese zusammengeführt zu einer Simulation, die die Auswirkung der Kombination von axialer und radialer Beblasung untersuchen sollte. Es wurde die Verteilung des Magnetfeldes untersucht. Diese hängt jedoch maßgeblich von der gewählten Stromhöhe durch die jeweiligen Spulenpaare ab. Somit kann durch Variation der Stromhöhen eine andere Magnetfeldverteilung erzeugt werden. Werden die axialen Spulen mit einem höheren Strom betrieben als die radialen Spulen, dominieren diese auch die Magnetfeldrichtung. Ist der Strom durch die radialen Spulen höher, richten sich auch die Feldlinien eher in radialer Richtung aus. Die Auswirkung der Variation der Spulenströme wurde auch auf Abweichungen in der Flussdichte untersucht. Aus der numerischen Berechnung des B-Feldes idealer Spulen geht hervor, dass eine lineare Zunahme des Stromes auch zu einer linearen Zunahme des B-Feldes führen muss. Dies war auch Ergebnis der Simulationen (thermische Auswirkungen durch den Stromfluss wurden in der Simulation nicht betrachtet). Geprüft wurde dies an den konstruierten Spulen. Die Simulation und die experimentelle Überprüfung stimmen weitestgehend überein. Diese wurden messtechnisch erfasst. Es konnte beobachtet werden, dass besonders bei hohen Strömen die Veränderung der Spulenteperatur zu einer Widerstandssteigerung führte, die von den Gleichstromquellen kompensiert werden musste. Zudem kann es z. B. durch Bauteile, die ferromagnetisch sind, oder konstruktive Abweichungen der Spulen von einer idealen Spule zu Abweichungen im Vergleich zur Simulation einer idealen Spule kommen. Diese Abweichungen sind jedoch vernachlässigbar klein. Die Ergebnisse aus den Teilsimulationen wurden bei den Projekttreffen vorgestellt und diskutiert.

### 4.3 Numerische Simulation der Magnetfeldverteilung des Modellschalters mit Lichtbogen

Ebenso wie in den Versuchen sollte das Lichtbogenverhalten ohne Magnetfeld untersucht werden. Dafür sollte in diesem Arbeitspaket der Lichtbogen ohne externes Magnetfeld simuliert werden. Um in AP. 4.4 die Kombination aus Magnetfelderzeugung durch Helmholtzspulen und stromdurchflossenen Lichtbogen analysieren zu können, wurde in AP. 4.3 der Lichtbogen als einzelnes Element zwischen zwei  $10 \text{ mm}^2$  großen Kontakten simuliert (Abb. 4.51). Der Lichtbogen wurde nicht in einer MHD-Simulation analysiert, sondern als vereinfachter zylindrischer Leiter aus Kupfer angenommen. In einer ersten Berechnung wurde die Verteilung der einzelnen Stromlinien in Abhängigkeit des Lichtbogendurchmessers untersucht. Dabei wurde der Durch-

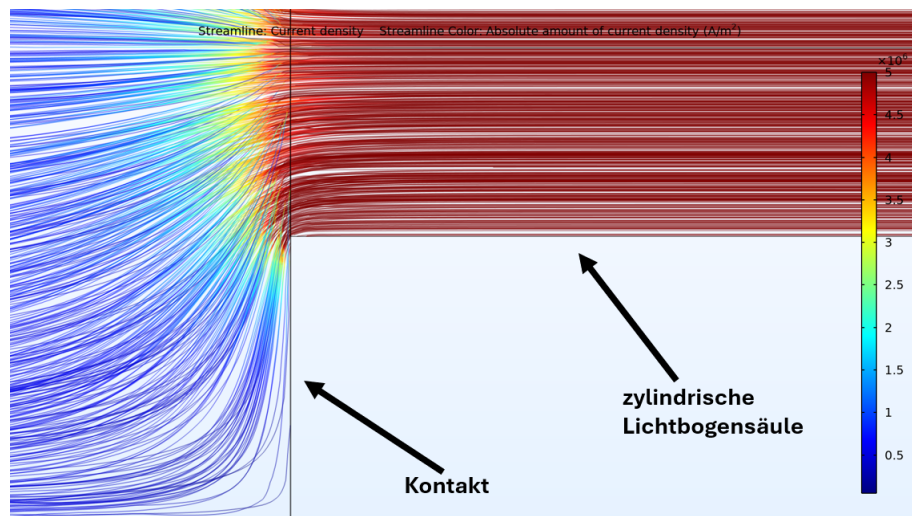


Abbildung 4.51: Verlauf der Stromlinien

messer zwischen 1 und 10 mm variiert. Bei 10 mm brennt der Lichtbogen somit fast auf der kompletten Kontakt-oberfläche. Diese Analyse ist notwendig, um in AP. 4.4 die Wirkrichtung der elektrodynamischen Kraft auf den Lichtbogen verstehen zu können. Eine zweite Berechnung wurde durchgeführt, um das Eigenmagnetfeld des Lichtbogens betrachten zu können. Daraus lässt sich die einschnürende Wirkung der Stromlinien erkennen, die auch als Pinch-Effekt bekannt ist (Abb. 4.52). Gasdynamische Effekte sind in dieser Simulation nicht berücksichtigt worden. Für die Ermittlung der magnetischen Kräfte auf den Lichtbogen war dies nicht notwendig. Im Anschluss an diese Simulationen wurde die Geometrie des Lichtbogens so verändert, dass diese eher dem realen Lichtbogen entspricht. Dies diente auch der Betrachtung von Abweichungen durch das zylindrische Säulenmodell. Simuliert wurden unterschiedliche Positionen der Fußpunkte auf den gegenüberliegenden Kontakten, eine bauchige oder eingeschnürte Säule, sehr kleine Fußpunkte oder eine Wolkenform, die den ganzen Schaltraum einnimmt. Aus der Variation dieser Formen konnten weitere Erkenntnisse über die Strompfade im Schaltraum gewonnen werden. Daraus ergaben sich neue Erkenntnisse über die Lichtbogenbewegung in Magnetfeldern und deren Abhängigkeit von der Lichtbogeengeometrie, des Stromes und der Höhe des B-Feldes. Weitere Vereinfachungen im Modell sind die Eigenschaften des Plasmas, die bei der Annahme eines simplen Kupferleiters vernachlässigt wurden. Diese können nur bedingt im verwendeten Modell geändert werden. Da das zylindrische Modell für das Erreichen der Ziele ausreichend war, wurde auf MHD-Simulationen oder zwei Temperaturzonenmodelle verzichtet. Die Ergebnisse aus den Teilsimulationen zu den

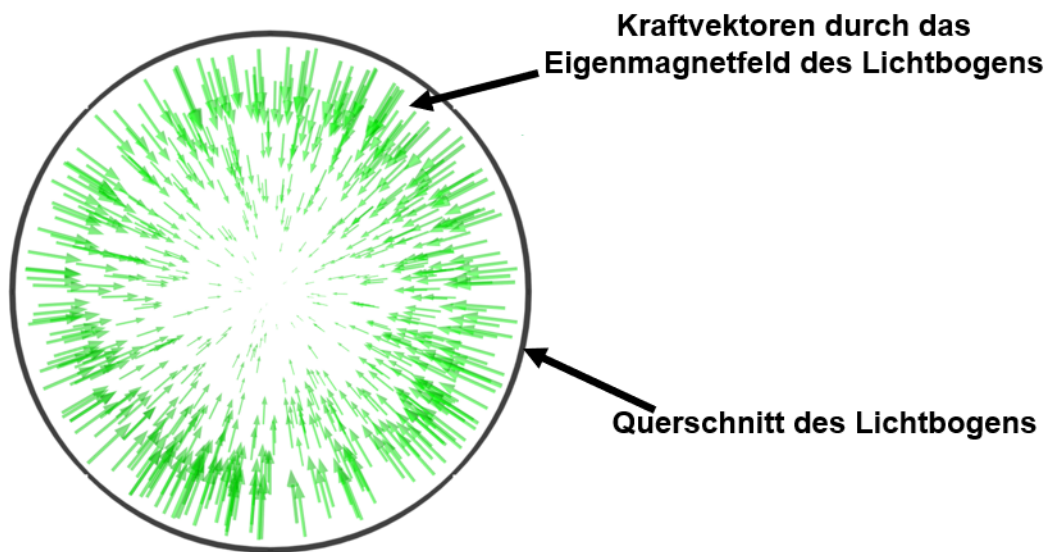


Abbildung 4.52: Einschnürende Kraftwirkung durch das Eigenmagnetfeld des Lichtbogens

verschiedenen Lichtbogenformen wurden bei den Projekttreffen vorgestellt und diskutiert.

#### 4.4 Numerische Simulation des schaltgerätenahen Prototyps mit Parameterstudien

Das Ziel dieses Arbeitspakets war es, den Wirkzusammenhang aus externen Magnetfeld und Lichtbogen zu simulieren. Dies sollte sowohl in der nachgebildeten Modellschalteranordnung geschehen, als auch im Demonstratorschaltgerät. Vor der Simulation des schaltgerätenahen Prototyps wurden die Simulationen aus AP. 4.2 und AP. 4.3 zusammengeführt. Aus der Zusammenführung der Helmholtzspulen und dem zwischen den Kontakten stehenden Lichtbogen ergaben sich neue Erkenntnisse über die Bewegung des Lichtbogens und dessen Fußpunkte, die über Hochgeschwindigkeitsaufnahmen verifiziert werden konnten. Dafür wurden drei Teilsimulationen durchgeführt. Als erstes die Kombination aus Lichtbogen und radialem Magnetfeld, dann die Kombination aus Lichtbogen und axialem Magnetfeld und zuletzt die Kombination aus beiden Magnetfeldausrichtungen und Lichtbogen. Wie in AP. 4.3. wurde auch in AP. 4.4 in einzelnen Simulationen die Lichtbogenform variiert. Daraus konnten weitere Rückschlüsse auf die Wirkrichtung der elektrodynamischen Kräfte auf die Fußpunkte und die Säule geschlossen werden. Die Simulation des Lichtbogens im radialen Magnetfeld ergab, wie erwartet, die gleiche Krafrichtung für die Lorentzkraft, wie die des thermischen Auftriebs. Die Simulation des Lichtbogens im axialen Magnetfeld ergab Erkenntnisse hinsichtlich der Fußpunktbewegung des Lichtbogens. Theoretisch hätte es keine Kraftwirkung auf die ideale zylindrische Säule geben dürfen, da hier das Magnetfeld parallel zum Strom verläuft. Dies bestätigte sich im Säulenbereich des Lichtbogens, jedoch nicht an dem Anoden- und Kathodenfußpunkt. Hier konnte eine verdrehende Kraftwirkung an den Fußpunkten ermittelt werden. Die verdrehende Kraftwirkung wirkt entgegengerichtet an den Fußpunkten. Verläuft der Strom von Anode zu Kathode (technische Stromrichtung) und die axialen Magnetfeldlinien verlaufen in die gleiche Richtung, so verdreht sich der Anodenfußpunkt im Uhrzeigersinn und der Kathodenfußpunkt gegen den Uhrzeigersinn. Dreht man das Magnetfeld

oder die Stromrichtung um, ändert sich die Richtung der Verdrehung an den Fußpunkten. Die Ursache der Verdrehung liegt am Übergang des Stromes von Kontakt zu Lichtbogen. An dieser Stelle kommt es zu einer Verengung des Stromes. Dieser Strom verläuft auch nicht parallel zum Magnetfeld, sondern im Winkel  $> 45^\circ$  (Abb. 4.51). Durch diesen Winkel kann eine Lorentzkraft wirken, die am Fußpunkt ansetzt. Diese Verdrehung konnte jedoch nur am Kathodenfußpunkt in den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen beobachtet werden. Der Anodenfußpunkt steht weitestgehend fixiert auf der Kontaktoberfläche. Eine Erklärung hierfür konnte noch nicht gefunden werden. Die Simulation des Lichtbogens im kombinierten Magnetfeld zeigte die Kombination der beiden Kräfte durch das radiale und axiale Magnetfeld. Je nach Höhe des B-Feldes des radialen oder axialen Magnetfeldes dominiert die Lorentzkraft in Richtung des thermischen Auftriebs oder die verdrehende Kraftwirkung durch das axiale Magnetfeld.

In der letzten Simulation wurde das Kontaktsystem des von der E-T-A entwickelten Prototypen simuliert. Dafür wurde die CAD-Datei des Prototyps vereinfacht, um ausschließlich den Hauptstrompfad inklusive eines vereinfachten Lichtbogens (Durchmesser der Säule = 1 mm) zu simulieren. Die Geometrie konnte dann in COMSOL eingebunden und ein Lichtbogen implementiert werden. Den Zuleitungen wurde Kupfer als Werkstoff zugewiesen. Für die Kontakte und den Lichtbogen wurde der Werkstoff Silber verwendet. Im Schalter ist ein Neodym-Permanentmagnet integriert. Aus dem Datenblatt konnten die relevanten Werkstoffkennwerte, wie z. B. die Remanenz entnommen werden. Für die integrierten Flussleitbleche wurden DC01 Stahl festgelegt. Die entsprechende B-H-Kennlinie wurde in COMSOL als Werkstoffparameter importiert. Für eine entsprechende Parameterstudie wurde die Spannung 230 V festgelegt. Eine Variation des Stromes von 30 A, 100 A, 300 A, 500 A und 1000 A wurde durchgeführt. Neben der Simulation des Lichtbogens genau zwischen den Kontakten wurde er auch in der Position der Löschkammer simuliert. Ebenso wie in Kapitel 4.2 und Kapitel 4.3 sind die verschiedenen Lichtbogenpositionen genutzt worden, um Abweichungen in der Kraft auf den Lichtbogen zu ermitteln. Basierend auf diesen Simulationen, konnte sowohl die Flussdichteverteilung im Schaltraum als auch die Lorentzkraft auf den Lichtbogen an den zwei verschiedenen Positionen im Schaltraum analysiert werden. Verifiziert wurde die Simulation durch Magnetfeldmessungen mit einer Hall-Sonde an verschiedenen Positionen im Schaltraum. Die Ergebnisse wurden mit den Projektpartnern geteilt und von der E-T-A verwertet.

# Arbeitspaket 5

## 5.1 Definition der technischen Randbedingungen

In diesem Arbeitspaket sollten die technischen Randbedingungen für die Entwicklung des Demonstrators ermittelt werden. In Zusammenarbeit mit der E-T-A wurden die technischen Randbedingungen für den Demonstrator für eine Spannung von 850 V DC festgelegt. Aus AP. 1 floss die Patentrecherche und -analyse ein. Dadurch konnten die verschiedenen bereits existierenden Kontaktsysteme verglichen werden und ermittelt werden. Somit konnten Rechtsschutzverletzung von Beginn an ausgeschlossen werden. Ebenso konnte aus der Literaturrecherche wichtige Informationen zum Kontakt- und Kammermaterial gewonnen werden. Hauptsächlich flossen die Versuche aus AP. 3 und die Simulationen aus AP. 4 in die Entwicklung und Optimierung ein. Einer der daraus gewonnenen technischen Randbedingungen ist die Verwendung eines radialen Magnetfeldes, um den Lichtbogen effektiv in die Löschkammer zu treiben.

## 5.2 Erstellung eines Pflichtenheftes des Schaltgerätes

Basierend auf den Erkenntnissen aus AP. 5.1, sollte ein Pflichtenheft des Demonstrators erstellt werden. Auch die Analyse der kommerziellen Schaltgeräte konnte zeigen, in welchen Bereichen diese Geräte den Lichtbogen unzuverlässig gelöscht hatten. Daraus ging hervor, wie der Demonstrator optimiert werden musste, damit dieser zuverlässiger und schneller den Lichtbogen löscht. Besonders die beobachteten Rückzündungen sollten im Demonstratorschaltgerät verhindert werden. Dafür wurde das fremderzeugte Magnetfeld optimiert. Die Optimierung sah vor, dass neben dem Permanentmagnet zusätzlich Flussleitbleche verwendet werden sollten. Dadurch sollte gewährleistet werden, den Lichtbogen rückzündungsfrei in die Löschkammer zu treiben. Ebenso legte man sich auf zusätzliche Kühlmechanismen fest. Der verwendete Kontaktwerkstoff wurde von der E-T-A bereitgestellt.

## 5.3 Inbetriebnahme der experimentellen Versuchsaufbauten

Ebenso wie in Arbeitspaket 2.2 sollte auch in diesem Arbeitspaket ein Prüffeld zur Testung des entwickelten Demonstrators aufgebaut werden. Das Demonstratorschaltgerät wurde am gleichen experimentellen Versuchsaufbau (AP. 2.2) wie die kommerziellen Schaltgeräte in AP. 2.1 untersucht. Zusätzlich zu den in AP. 2.1 dargestellten Versuchsparametern wurde das Demonstratorschaltgerät ebenso bei 1000 A geprüft.

## 5.4 Entwicklung eines Demonstratorschaltgerätes für $U_{\text{nenn}}$ bis 850 V DC durch optimale Magnetfeldbeeinflussung

In diesem Arbeitspaket sollten die Ergebnisse aus den Arbeitspaketen AP. 2.7, AP. 3.7 und AP. 5.2 zusammengeführt und ein Demonstratorschaltgerät entwickelt werden. Dieser Prozess fand iterativ statt. Die E-T-A, die PTB und die TU Ilmenau standen dabei in ständigem Austausch.

Das Kontaktsystem mit Magnetfelderzeugung im Demonstratorschaltgerät wurde von Seiten der E-T-A und der TU Ilmenau simuliert. Hierbei wurde die Magnetfeldverteilung und die Kraft auf den Lichtbogen im Schaltraum untersucht.

## **5.5 Entwicklung eines Demonstrators mit integrierter Magnetfelderzeugung**

Ziel dieses Arbeitspakets war es, die Entwicklung des Schaltgerätes zu finalisieren. Die in den Arbeitspaketen AP. 5.1, AP. 5.2, AP. 5.3 und AP. 5.4 erlangten Erkenntnisse wurden in AP. 5.5 zu einem finalen Demonstratorschaltgerät zusammengeführt. Die ersten Schaltversuche zeigten ein nicht-rückkommutierungsfreies Schaltverhalten. Daher wurde die Verteilung des Magnetfeldes im Schaltraum optimiert. Ebenso betrachtete man verschiedene Löschkammermaterialien, die ausgetauscht wurden, wenn diese der hohen Belastung beim Schalten nicht standhielten. Zu den möglichen Alternativen gab es auf den Projekttreffen entsprechende Diskussionen. Das finale Gerät wurde im Prüffeld der TU Ilmenau und der E-T-A einem Schaltregime unterzogen. Es wurden die gleichen Ströme wie in 2.1 untersucht. Zusätzlich wurden auch Schaltversuche mit 1000 A durchgeführt. Abschließend wurde ein Steckbrief des Demonstratorschaltgerätes erstellt.

# Anhang

## 7.6 Literatur

- ABB (Hg.): Durchbruch. Der ABB HGÜ-Hybridschalter – ein innovativer Durchbruch auf dem Weg zu zuverlässigen HGÜ-Netzen.
- ABB (Hg.): Ultraschneller Trennschalter für HGÜ-Hybridschalter.
- Alferov, D. F.; Ivanov, V. P.; Sidorov, V. A. (2003): Characteristics of DC vacuum arc in the transverse axially symmetric magnetic field. In: IEEE Trans. Plasma Sci. 31 (5), S. 918–922.
- Amft, D. (2002): Dynamisches Schweißen bei stromeinschaltenden Kontakten. Consulting Report 01-02. TU Chemnitz.
- Amsinck, R.; Jaeger, K.-W. (1979): Movement and Extinction of Switching-Arcs in Contactor Quench-Systems. In: IEEE Trans. Comp., Hybrids, Manufact. Technol. 2 (1), S. 8–11.
- Attia, Y.; Abdelrahman, A.; Hamouda, M.; Youssef, M. (2016): SiC devices performance overview in EV DC/DC converter: A case study in a Nissan Leaf. In: ITEC 2016. 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific) : June 1-4, 2016, BEXCO, Busan, Korea, S. 214–219.
- Bartosik, Marek; Borkowski, Piotr; Raj, Ewa; Wojcik, Franciszek (2019): The New Family of Low-Voltage, Hyper-Speed Arcless, Hybrid, DC Circuit Breakers for Urban Traction Vehicles and Related Industrial Applications. In: IEEE Trans. Power Delivery 34 (1), S. 251–259.
- Behrens, Nordholm E. (1980): Lichtbogenwanderung in Leitungsschutzschaltern. Dissertation. TU Braunschweig, Braunschweig. Behrens, Volker (2009): Kontaktwerkstoffe für Niederspannungs-Schaltkontakte – eine Einführung. In: VDE Fachbericht (65), S. 155–159.
- Belhachemi, B.; Carballeira, A. (1984): Influence of Delay and Duration of Bounce on Erosion Weldability and Resistance in Relay Contacts. ICEC Holm Conference. Chicago.
- Meckler, Peter; Gerdiand, Frank; Weiss, Roland; Boeke, Ulrich; Mauder, Anton (2014): Hybrid switches in protective devices for low-voltage DC grids at commercial used buildings. International Conference on Electrical Contacts; Energietechnische Gesellschaft; Informationstechnische Gesellschaft; ICEC. Berlin.
- Berger, Frank (2021): The Future of the Electromechanical Switchgear, Keynote, Proc. 30th International Conference on Electrical Contacts, online, 2021, Rorschach/Schweiz, S. 347 - 354.
- Borchert, Lothar (1972): Vorgaenge beim Schliessen und Oeffnen von Relaiskontakten der Nachrichtentechnik. Hg. v. VDE Seminar "Kontaktverhalten und Schalten". VDE Seminar "Kontaktverhalten und Schalten". Karlsruhe.

- Borkowski, P.; Walczuk, E. (2012): Test Stand for Testing Contacts of Switches in a Fixed Household Electrical Installations. Hg. v. Proceedings of ICEC-ICREPEC2012. Department of Electrical Apparatus, Technical University of Lodz. Lodz.
- Bösche, Dirk (2017): Hybridschalter - Universelles Schaltgerät für Gleich- und Wechselstrom, 29.06.2017.
- Bosche, Dirk; Wilkening, Ernst-Dieter; Kopf, Hendrik; Kurrat, Michael (2015): Breaking performance investigation of hybrid DC circuit breakers: An experimental approach, IEEE 61st Holm Conference on Electrical Contacts (Holm). San Diego, CA, USA, S. 117–123.
- Braumann, Peter; Heringhaus, Frank; Koffler, Andreas (2001): Neue Kontaktwerkstoffe auf der Basis von AgSnO<sub>2</sub> fuer Kfz-Relais und Motorschalter. In: VDE Fachbericht (57), S. 157–161.
- Burkhardt, Günter (1985): Schaltgeräte der Elektroenergie-technik - Grundlagen und technische Ausführung. 1. Aufl. Berlin: VEB Verlag.
- Chen, Hai (2017): Applications of laser arc image system on imaging the arcing behavior of electrical contacts. In: Electrical contacts - 2017. Proceedings of the Sixty-third IEEE Holm Conference on Electrical Contacts : held 10-13 September 2017, Denver, CO, USA, S. 69–74.
- Cinaroglu, H.; Behrens, V.; Honig, T. (2018): Neu entwickelter AgSnO<sub>2</sub> Kontaktwerkstoff für AC-Schütze. 24. Albert-Keil-Kontaktseminar. Karlsruhe. CIPS; Energietechnische Gesellschaft; International Conference on Integrated Power Electronics Systems, Frankfurt am Main: VDE.
- Deshpande, Amol; Luo, Fang (2019): Practical Design Considerations for a Si IGBT + SiC MOSFET Hybrid Switch: Parasitic Interconnect Influences, Cost, and Current Ratio Optimization. In: IEEE Trans. Power Electron. 34 (1), S. 724–737.
- Dong, Jinlong; Zhang, Guogang; Zhang, Zhiqiang; Geng, Yingsan; Wang, Jianhua (2018): Inverse Problem Solution and Regularization Parameter Selection for Current Distribution Reconstruction in Switching Arcs by Inverting Magnetic Fields. In: Mathematical Problems in Engineering 2018, S. 1–11.
- Doublet, L.; Ben Jemaa, N.; Hauner, F.; Jeannot, D. (2003): Make arc erosion and welding tendency under 42 VDC in automotive area. IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Washington.
- Eckel, E. (SS 2019): Widerstands- und Schweißverhalten von AgSnO<sub>2</sub> Schaltkontaktstellen. Projektierungsseminar Lichtbogen- und Kontaktphysik. TU Ilmenau.
- Féchant, L. (1996): Le contact électrique. Paris: Editions Hermès. Feng, Dingyu; Xiu, Shixin; Wang, Yi; Liu, Gang; Zhang, Yali; Li, Ning (2015): Experimental Investigation of Arc Ignition Modes of Vacuum Arc Under Transverse Magnetic Field. In: IEEE Trans. Plasma Sci. 43 (5), S. 1806–1814 .
- Feng, Dingyu; Xiu, Shixin; Li, Mengru; Yuan, Bo; Zhang, Yanzhe; Zhao, Li (2018): Experimental Investigation on Transition Characteristics of Arcing Stages Under Transverse Magnetic Field. In: IEEE Trans. Plasma Sci. 46 (3), S. 622–630.

- Gao, Lei; Yang, Kun; Xiang, Bin; Junaid, Muhammad; Liu, Zhiyuan; Geng, Yingsan et al. (2018): A DC Hybrid Circuit Breaker with Buffer Capacitor and Vacuum Interrupters. In: ISDEIV 2018. Proceedings of the 28th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum : Greifswald, Germany, S. 615–618.
- Gauster, E.; Rieder, W. (1998): Arc lengthening between divergent runners: influence of arc current, geometry, and materials of runners and walls. In: IEEE Trans. Comp., Packag., Manufact. Technol. A 21 (1), S. 82–95. DOI: 10.1109/95.679037.
- Gauster, E.; Rieder, W. (1995): Arc-wall interaction phenomena immediately after contact separation in magnet-blast interrupters. In: Electrical Contacts - 1995. Proceedings of the Forty-First IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Electrical Contacts, Montreal, Canada, S. 355–364.
- Ge, Guowei; Liao, Minfu; Duan, Xiongying; Huang, Jinqiang; Zou, Jiyan (2016): A novel post-arc current measuring equipment based on vacuum commutation and arc blow. In: 2016 27th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). 2016 27th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). Suzhou, China, 18.09.2016 - 23.09.2016: IEEE, S. 1–4.
- Ghazanfari, Amin; Perreault, Christian; Zaghbi, Karim (2019): EV/HEV Industry Trends of Wide-bandgap Power Semiconductor Devices for Power Electronics Converters. In: ISIE. 2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics, Vancouver, Canada, S. 1917–1923.
- Gonzalez, Diego; Hopfeld, Marcus; Berger, Frank; Schaaf, Peter (2018): Investigation on Contact Resistance Behavior of Switching Contacts Using a Newly Developed Model Switch. In: IEEE Trans. Compon., Packag. Manufact. Technol. 8 (6), S. 939–949.
- Grieshaber, W.; Davidson, C. C.; Whitehouse, R. S.; Dupraz, J.-P.; Barker, C. D. (2015): A new ultra-fast HVDC Circuit breaker for meshed DC networks. In: 11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. 10-12 Feb. 2015. 11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. Birmingham, Piscataway, NJ, 047 (7.)-047 (7.).
- Hasegawa, M.; Niizuma, K.; Mizukoshi, H.; Fujii, S.; Sawa, K. (1993): Material transfer characteristic of silver contacts under resistive DC load conditions. In: Proceedings of IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Pittsburgh, PA, USA, 27-29 Sept. 1993: IEEE, S. 275–281.
- Hauer, Wolfgang; Bartonek, Michael (2017): A novel low voltage grid protection component for future smart grids. In: 2016 51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Piscataway, NJ: IEEE, S. 1–6.
- Hauner, F.; Große, J. (1992): Effect of Heat Treatment on the Surface of Silver Metal Oxide Contact Materials. International Conference on Electrical Contacts. Loughborough.
- Hauner, F.; Große, J.; Müller, M. (1993): Vergleich von unterschiedlich hergestellten AgSnO<sub>2</sub>-Kontaktwerkstoffen. 12. VDE-Seminar Kontaktverhalten und Schalten. Karlsruhe.
- Hauner, F.; Jeannot, D.; McNeilly, K. (2002): Advanced AgSnO<sub>2</sub> Contact Materials with High Total Oxide Content. International Conference on Electrical Contacts. Zürich.

- Hetzmanseder, E.; Rieder, W. (1993): The Influence of Bounce Parameters on the Make Erosion of Silver/Metal-Oxide Contact Materials. IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Pittsburgh.
- Hetzmanseder, E.; Rieder, W. (1995): Einschalt-, Ausschalt- bzw. Ein- und Ausschaltabbrand von Silber/Metalloxyd - Kontaktwerkstoffen unter AC3 Bedingungen. 13. Kontaktseminar "Kontaktverhalten und Schalten". In: VDE Fachbericht 47.
- Hotta, Katsuki; Inaguchi, Takashi (2017): Contact Welding Mechanism With Bounce Arc on Ag and Cu Contacts in Low-Voltage Switches. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology.
- Jebramcik, Jens; Berger, Frank (2016): Investigations on the make-welding behavior of high power contactors for AC and DC applications up to 3kV. IEEE HOLM Conference on Electrical Contacts. Clearwater Beach.
- Jemaa, N. B. (2002): Contacts conduction and switching in DC levels. In: Electrical contacts - 2002. Proceedings of the Forty-Eighth IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Orlando, Florida, S. 1–15.
- Kaltenecker, A.; Schusseck, M. (1985): Anode-Spot Formation and Motion of Vacuum Arcs. In: IEEE Trans. Plasma Sci. 13 (5), S. 269–276.
- Karetta, F.; Lindmayer, M. (1998): Simulation of the gasdynamic and electromagnetic processes in low voltage switching arcs. In: IEEE Trans. Comp., Packag., Manufact. Technol. A 21 (1), S. 96–103.
- Kharin, S. N. (1995): Post bridge phenomena in electrical contacts at the initial stage. In: Electrical Contacts - 1995. Proceedings of the Forty-First IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Electrical Contacts, Montreal, Canada, S. 200–209.
- Kim, Hyosung: Arcing characteristics on low-voltage DC circuit breakers. In: 2013 15th European Conference 2013, S. 1–7.
- Kim, Keun Su (2009): Influence of a transverse magnetic field on arc root movements in a dc plasma torch: Diamagnetic effect of arc column. In: Appl. Phys. Lett. 94 (12), S. 121501.
- Klosinski, Christoph; Bosche, Dirk; Ross, Patrick; Nasser Hemdan, G. A.; Kurrat, Michael; Meisner, Johann et al. (2018): Hybrid Circuit Breaker-based Fault Detection and Interruption in 380V DC Test-setup. In: 2018 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Albuquerque, NM, S. 203–210.
- Lazzari, Riccardo; Piegari, Luigi (2019): Design and Implementation of LVDC Hybrid Circuit Breaker. In: IEEE Trans. Power Electron. 34 (8), S. 7369–7380.
- Lindmayer, Manfred (2016): Simulation of Switching Arcs Under Transverse Magnetic Fields for DC Interruption. In: IEEE Trans. Plasma Sci. 44 (2), S. 187–194.
- Lindmayer, M.; Schroder, K.-H. (1979): The Effect of Unsymmetrical Material Combination on the Contact and Switching Behavior. In: IEEE Trans. Comp., Hybrids, Manufact. Technol. 2 (1), S. 41–45.

- Lindmayer, M.; Springstubbe, M. (2001): 3D-simulation of arc motion between arc runners including the influence of ferromagnetic material. In: Proceedings of the Forth-Seventh IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Montreal, Canada, S. 148–153.
- Lindmayer, M.; Stammberger, H. (1994): Application of numerical field simulations for low-voltage switchgear. In: Proceedings of IEEE Holm Conference on Electrical Contracts. IEEE Holm Conference on Electrical Contracts. Chicago, USA, S. 65–77.
- Lu, Qu; Zhanqing, Yu; Songbo, Huang; Jiapeng, Liu; Wenpeng, Zhou; Zhengyu, Chen et al. (2018): Design and Analysis of a 375V/5kA Solid State DC Circuit Breaker Based on IGCT. IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC), Shenzhen, China, S. 1–5.
- Lutz, Josef (2012): Halbleiter-Leistungsbaulemente. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Lutz, O.; Behrens, V. et al. (2009): Silber/Zinnoxid-Kontaktwerkstoffe auf Basis der inneren Oxidation für AC- und DC-Anwendungen. 20. Albert-Keil-Kontaktseminar. Karlsruhe.
- M. Hasegawa; H. Sonobe; N. Ohkawa (2015): Influences of Contact opening speeds in the range of 0.5 to 200 mm/s on break arc behaviors of AgSnO<sub>2</sub> contacts in DC conditions. In: 2015 IEEE 61st Holm Conference on Electrical Contacts (Holm), S. 166–170.
- Manhart, H.; Rieder, W.; Veit, C. (1989): Arc mobility on new and eroded Ag/CdO and Ag/SnO/sub 2/ contacts. In: IEEE Trans. Comp., Hybrids, Manufact. Technol. 12 (1), S. 48–57.
- Marinescu, Marlene (2009): Elektrische und magnetische Felder: Eine praxisorientierte Einführung. 2. Aufl. Berlin: Springer.
- Martin, Benedikt (2009): Praxisorientierte Bewertung des lastartenabhängigen Schaltvermögens bei Geräte- und Mikroschaltern. In: VDE Fachbericht (65), S. 79–88.
- Martin Weis: Einfluss von Öffnungsgeschwindigkeit und Kontakttemperatur auf die Lichtbogenlöschlänge bei 48 - 60 VDC. In: 23. Albert-Keil-Kontaktseminar.
- McBride, J. W. (1988): Electrical contact bounce in medium duty contacts. IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. San Francisco.
- McBride, J. W.; Pechrach, K.; Weaver, P. M. (2001): Arc root commutation from moving contacts in low voltage devices. In: IEEE Trans. Comp. Packag. Technol. 24 (3), S. 331–336. DOI: 10.1109/6144.946475.
- Meckler, Peter: Stolpersteine beim Gleichstrom. E-T-A GmbH.  
<https://www.computer-automation.de/feldebene/stromversorgung/stolpersteine-beim-gleichstrom.146882.2.html>.
- Meckler, Peter (2014): Hybride Schutzgeräte für Gleichspannungsnetze in regenerativ versorgten Gebäuden. Symposium Energietechnik im Wandel, 27.10.2014.
- Meyer, Herbert (1972): Schuetze -Dynamische Vorgaenge beim Ein- und Ausschalten. Hg. v. VDE Seminar "Kontaktverhalten und Schalten". VDE Seminar "Kontaktverhalten und Schalten". Karlsruhe.

- Michal, R.; Wassermann, J. (1983): Optoelectrical Position Indicators Applied to Arc-Motion Research. In: IEEE Trans. Comp., Hybrids, Manufact. Technol. 6 (1), S. 92–99.
- Michalowsky, L. (1995): Magnettechnik. Grundlagen und Anwendung. 2. Auflage: Fachbuchverlag Leipzig-Köln.
- Mützel, T. (2008): Verfahren der Kurzschlussfrüherkennung zur Verbesserung der strombegrenzenden Wirkung von Niederspannungsleistungsschaltern. Dissertation. TU Ilmenau, Ilmenau.
- Mützel, T.; Bender, M.; Niederreuther, R. (2014): Contact Material Effects on Dynamic Contact Sticking. ICEC International Conference on Electrical Contacts. International Conference on Electrical Contacts; ICEC. Dresden.
- Mutzel, Timo; Braumann, Peter; Niederreuther, Ralf (2010 - 2010): Development of Contact Material Solutions for Low-Voltage Circuit Breaker Applications. In: 2010 Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Charleston, USA, S. 1–6.
- Mützel, T.; Hubrich, C. (2018): Contact Material Solutions for LED Lamp Application. IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Albuquerque.
- Mützel, T.; Niederreuther, R. (2012): Advanced silver-tin oxide contact materials for relay application. International Conference on Electrical Contacts. Beijing.
- Mutzke, Alexandra; Ruther, Thomas; Kurrat, Michael; Lindmayer, Manfred; Wilkening, Ernst-Dieter (2007): Modeling the Arc Splitting Process in Low-Voltage Arc Chutes. In: Electrical Contacts - 2007 Proceedings of the 53rd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, IEEE, S. 175–182.
- Neuhaus, Alexander R.; Rieder, Werner F.; Hammerschmidt, Martin (2002): Influence of arc duration and current on contact welding in low power switches. IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. IEEE, Components, Packaging and Manufacturing Technology Society Staff. Orlando.
- Nikolussi, J.; Behrens, V. et al. (2011): Zum Schaltverhalten hochoxidhaltiger Silber/Zinnoxid-Kontaktwerkstoffe im Hinblick auf Verwendungen in Leistungsschaltern. 21. Albert-Keil-Kontaktseminar. Karlsruhe.
- Ning, Puqi; Yuan, Tianshu; Kang, Yuhui; Han, Cao; Li, Lei (2019): Review of Si IGBT and SiC MOSFET based on hybrid switch. In: Chin. J. Electr. Eng. 5 (3), S. 20–29. DOI: 10.23919/CJEE.2019.000017.
- Ostling, Mikael; Salemi, Arash; Elahipanah, Hossein; Zetterling, Carl-Mikael (2016): State of the art power switching devices in SiC and their applications, 2016 IEEE Silicon Nanoelectronics Workshop (SNW). Honolulu, HI, USA, S. 122–123.
- Ou, Chomrong; Nakayama, Ryo; Zen, Shungo; Takeuchi, Nozomi; Yasuoka, Koichi (2018): Influence of Arc Discharge on Contact Erosion and Contact Resistance in a Hybrid DC Switch. In: 2018 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Albuquerque, NM, S. 184–188.
- R. Michal (1981): Theoretical and Experimental Determination of the Magnetic Blast Field due to the Current Flow in the Electrodes. In: IEEE Transactions on Components, Hybrids and manufacturing technology (Vol. 4, No. 1).

- Reil, C.; Schmidt, H. (2014 - 2014): Development of High-Resolution Magnetic Field Measurements for Switching Arc Diagnosis of Low-Voltage Switchgear. In: 2014 4th International Electric Drives Production Conference (EDPC). Nuremberg, Germany, S. 1–5.
- Ren, W.; Wei, J.; Zhang, X. (2017): Preliminary Study on switching characteristics of AgSnO Type contacts for capacitive load. IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Denver.
- Rieder, W. F. (2000): Low current arc modes of short length and time: a review. In: IEEE Trans. Comp. Packag. Technol. 23 (2), S. 286–292.
- Rieder, W.; Veit, C. (1990): Influence of materials on the interaction of switching arcs with contacts and walls. In: Thirty-Sixth IEEE Conference on Electrical Contacts, and the Fifteenth International Conference on Electrical Contacts, Montreal, Canada, S. 592–598.
- Rieder, W.; Veit, C.; Gauster, E. (1992): Interaction of magnetically blown break arcs with insulating walls in the contact region of interrupters. In: IEEE Trans. Comp., Hybrids, Manufact. Technol. 15 (6), S. 1123–1137.
- Samoilov, V.; Akachev, S.; Kapustin, V.; Mestcheryakov, V. (1999): Physical processes at opening contacts. Hg. v. IEEE Holm. Pittsburgh, PA, USA. Schoepf, Thomas J.; Rowlands, Robert; Repp, Brent (2005): Pre-Conditioning Contact Surfaces to Reduce Dynamic Welding Tendency in Relays. In: VDE Fachbericht (61), S. 13–19.
- Schreiber, J.; Rohde, T.; Behrens, V.; Honig, T.: Einfluss der Lichtbogenfußpunkt-Mikrobeweglichkeit auf die Kontaktlebensdauer von Ag/SnO<sub>2</sub>-Bimetallnieten in DC-Relais. In: Kontaktverhalten und Schalten - 23. Fachtagung Albert-Keil-Kontaktseminar 2015.
- Schroder, K.-H. (1988 - 1988): The future of electrical switching contacts under the influence of electronics. In: Electrical Contacts, 1988., Proceedings of the Thirty Fourth Meeting of the IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Electrical Contacts, San Francisco, USA, S. 3–11.
- SEMIKRON International GmbH (2015): Applikationshandbuch Leistungshalbleiter. 2., überarbeitete Auflage. Ilmenau: ISLE Verlag.
- Shen, Z. John; Miao, Zhenyu; Roshandeh, Aref Moradkhani (2015): Solid state circuit breakers for DC micrgrids: Current status and future trends. In: 2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM 2015).
- Sin, Johnny (Hg.) (2015): 2015 IEEE 27th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's (ISPSD 2015). International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs; Institute of Electrical and Electronics Engineers, Piscataway, NJ.
- Slade, Paul G. (Hg.) (2014): Electrical contacts. Principles and applications. 2. ed. Boca Raton, Fla.: CRC Press.
- Slade, Paul G. (2002): High current contacts: A review and tutorial. International Conference on Electrical Contacts. Zürich.
- Slonim, A. A. (1984): Analytical and Experimental Analysis of Nonlinear Bouncing Contacts. HOLM Conference on Electrical Contacts. Chicago.

- Slonim, A. A. (1987): Bouncing of Contacts Under Current Load (The Influence of Mechanical System Parameters and Load Current on the Closing Process of Electrical Contacts). IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology 1.
- Song, Xiaoqing; Huang, Alex Q.; Lee, Meng-Chia; Peng, Chang (2015): High voltage Si/SiC hybrid switch: An ideal next step for SiC. In: Johnny Sin (Hg.): 2015 IEEE 27th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's (ISPSD 2015), Piscataway, NJ, S. 289–292.
- Spaziani, Larry; Lu, Lucas (2018): Silicon, GaN and SiC: There's room for all: An application space overview of device considerations. In: Proceedings of the 30th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs. May 13-17, 2018, Chicago, USA. Piscataway, NJ, S. 8–11.
- Sun, Hao; Rong, Mingzhe; Chen, Zhixin; Hou, Chao; Sun, Yushu (2014): Investigation on the Arc Phenomenon of Air DC Circuit Breaker. In: IEEE Trans. Plasma Sci. 42 (10), S. 2706–2707.
- Swingler, J.; McBride, J. W. (2004): Micro-arcing and arc erosion minimisation using a 42 volt DC hybrid switching devices. In: Electrical contacts.
- Tokumitsu, Seika; Hasegawa, Makoto (2019 - 2019): Arc Movement Investigations of Break Arcs of AgSnO<sub>2</sub> Contacts under Applied External Magnetic Field in Inductive DC Load Conditions. In: 2019 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. 2019 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Milwaukee, USA, S. 95–100.
- Tokumitsu, Seika; Hasegawa, Makoto (2018): Effective Shortening of Break Arc Duration s of Ag and Several Ag-based Contacts in DC Load Conditions with Increased Contact Opening Speeds and External Magnetic Field. In: 2018 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. 2018 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Albuquerque, NM, S. 87–94.
- van Dam, B.; Cuk, V.; Cobben, J.F.G.; Kling, W. L. (2012): A low-voltage hybrid switch for laboratory experiments. In: 2012 IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP 2012), Piscataway, NJ, S. 59–63.
- Vassa, A.; Carvou, E.; Rivoirard, S.; Doublet, L.; Bourda, C.; Jeannot, D. et al. (2010 - 2010): Magnetic Blowing of Break Arcs up to 360 VDC. In: 2010 Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. 2010 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts (Holm 2010). Charleston, SC, USA, S. 1–5.
- Vassa, A.; Carvou, E.; Rivoirard, S.; Doublet, L.; Bourda, C.; Ben Jemaa, N.; Givord, D. (2012): DC-arc blowing under pulsed magnetic field. In: 26th International Conference on Electrical Contacts (ICEC 2012). 26th International Conference on Electrical Contacts (ICEC 2012). Beijing, China, S. 23–29.
- Vinaricky, E. (2002): Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- Vinaricky, E. (2016): Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- Wahl, Christian (2016): Experimentelle Untersuchung zu Gleichstromlöschprinzipien. Masterarbeit. Technische Universität Ilmenau, Ilmenau. Fachgebiet EGA.

- Walczuk, E.; Borkowski, P. (2010): Evaluation of basic electrical parameters of silver-based contact materials of different chemical composition and manufacturing technology. International Conference on Electrical Contacts. Charleston.
- Wang, Zhongyi; Liu, Zhiyuan; Zhang, Xuan; Zheng, Yuesheng; Wang, Jimei (2006): Analysis of Axial Magnetic Field Characteristics of Coil Type Axial Magnetic Field Vacuum Interrupters. In: 2006 International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. 2006 International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Matsue, Japan, S. 344–347.
- Wu, Yi; Rong, Mingzhe; Sun, Zhiqiang; Wang, Xiaohua; Yang, Fei; Li, Xingwen (2007): Numerical analysis of arc plasma behaviour during contact opening process in low-voltage switching device. In: J. Phys. D: Appl. Phys. 40 (3), S. 795–802.
- Yang, Fei; Wu, Yi; Rong, Mingzhe; Sun, Hao; Murphy, Anthony B.; Ren, Zhigang; Niu, Chungping (2013): Low-voltage circuit breaker arcs—simulation and measurements. In: J. Phys. D: Appl. Phys. 46 (27), S. 273001.
- Yasuoka, Koichi; Yamada, Yuta; Chen, Mo (2019 - 2019): Contact Resistance and Arc-free Commutation Current of Tungsten-clad Copper Contacts for a Hybrid DC Switch. In: 2019 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. 2019 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Milwaukee, WI, USA, S. 359–362.
- Yi, Xiuli; Zaiqin Zhang; Jianhua Wang; Jingyi Wang; Zhiyuan Liu; Hui Ma; Yingsan Geng (2018): Research on DC Current Interruption Technology by Vacuum Arcs Subjected to Adjustable Rotating Transverse Magnetic Field. Proceedings of the 28th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum : Greifswald, Germany.
- Yoshida, Kiyoshi; Sawa, Koichiro; Suzuki, Kenji; Daijima, Hideki; Takaya, Kouetsu (2012): Influence of Source Voltage on Various Characteristics of a Contactor Comparing Make Only, Break Only and Make and Break Arcs. IEEE HOLM Conference on Electrical Contacts. Portland.
- Yoshida, Kiyoshi; Shimotsuma, Shu; Sawa, Koichiro; Suzuki, Kenji; Takaya, Koetsu (2016): Various characteristics of electromagnetic contactor when arc discharge are generated only make arc. IEEE HOLM Conference on Electrical Contacts. Clearwater Beach.
- Yoshida, Kiyoshi; Tanimoto, Sunao (2007): An Experimental Study of Arc Duration and Transition from Metallic to Gaseous Phase in Ag Alloy Break Arc. In: Electrical Contacts - 2007 Proceedings of the 53rd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Electrical Contacts, S. 134–139.
- Zabello, K. K.; Barinov, Y. A.; Chaly, A. M.; Logatchev, A. A.; Shkol'nik, S. M. (2005): Experimental study of cathode spot motion and burning voltage of low-current vacuum arc in magnetic field. In: IEEE Trans. Plasma Sci. 33 (5), S. 1553–1559.
- Zeller, P.; Rieder, W. (1998): Arc structure, arc motion and gas pressure between laterally enclosed arc runners. In: Electrical Contacts - 1998. Proceedings of the Forty-Fourth IEEE Holm Conference on Electrical Contacts (Cat. No.98CB36238). Electrical Contacts, Arlington, USA, S. 69–74.

- Zen, Shungo; Hayakawa, Tatsuya; Nakayama, Kyotaro; Yasuoka, Koichi (2017): Development of an arcless DC circuit break using a mechanical contact and a semiconductor device. Proceedings of the Sixty-third IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Piscataway, NJ, S. 249–252.
- Zhang, Xu; Zheng, Zeh; Ren, Wanbin; Zhou, Zhefeng (2018): An Experimental Investigation of Dynamic Welding Mechanism of Contacts Used in Low Current Switching Devices. IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Albuquerque.
- Zhou, Xin; Theisen, P. (2000): Investigation of arcing effects during contact blow open process. In: IEEE Trans. Comp. Packag. Technol. 23 (2), S. 271–277.
- Zinke, Stefan; Schedel, Philipp (2018): Lichtbogenmoden bei AgSnO<sub>2</sub>-Kontakten. Vortrag im Rahmen der Lehrveranstaltung „Lichtbogen- und Kontaktphysik“. Prof. Frank Berger. Ilmenau, 2018.

## 7.7 Patente

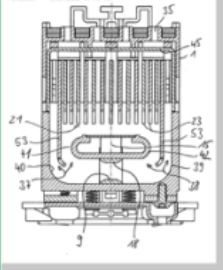
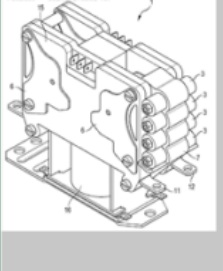
Patent Nr.	TI	Lichtbogenlöschung Löschkammer	Optimierung Magnetfeld	Optimierung Material: Laufschiene, Kontakte, Gehäuse	schnelle Öffnung	Skizze	AB	PA
<a href="#">WO/2015/10228</a> <a href="#">3A1</a>	QUENCHING PLATE ARRANGEMENT FOR A SWITCHING DEVICE	x					Source: US2018174775 AA [EN] A quenching plate arrangement for a switching device has plural quenching plates for arc splitting and/or lengthening; a guiding plate, the quenching plates being arranged substantially next to one another to form a stack, the guiding plate laterally delimiting the stack, the guiding plate protruding beyond the quenching plates in a main extension direction; and a DC-suitable switching device having a first contact and a second contact, at least the second contact being movable relative to the first contact, a first and second running rail arrangement for conducting an arc with respective first and second current directions, the two running rail arrangements having respective first and second running rails, the two first and two second running rails respectively running in opposite directions from the first and second contacts, and the first running rails being connected in an electrically conducting manner in closed loop form, with the quenching plate arrangement	EATON ELECTRIC GMBH AND CO. EATON INTELLIGENT POWER LTD
<a href="#">WO/2015/14430</a> <a href="#">3A1</a>	ELECTRIC SWITCHING APPARATUS COMPRISING AN IMPROVED ARC-QUENCHING DEVICE	x	x		x		Source: US2017178831 AA [EN] The present invention relates to an electric switching apparatus, in particular a DC contactor. The switching apparatus has at least one switching point as well as at least one arc-quenching device that is assigned to the switching point. The arc-quenching device comprises at least one quenching element and at least one permanent magnet for influencing an arc that arises during the switching process. The arc is blown into the quenching element by a magnetic field that is created by the permanent magnet. It is provided according to the invention that the at least one permanent magnet forms at the same time the quenching element and that it is arranged and polarized in a way that the arc is attracted by the permanent magnet and thereby sucked onto the permanent magnet and quenched by said permanent magnet	SCHALTBAU GMBH

Abbildung 7.53: Ausschnitt aus der Patentanalyse