

Projekt Autohybrids

Abschlussbericht

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Fördermaßnahme: Anwendungsorientierte nichtrückrale FuE im 7.
Energieforschungsprogramm der Bundesregierung im Förderbereich: Stromnetze-
Anträge

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) Berlin

Abschlussbericht

Laufzeit des Vorhabens: 01.12.2019-30.11.2023

Projekträger Jülich
Intelligente Transport- und
Verteilnetze, Stromspeichertechnologien
Forschungszentrum Jülich GmbH
z. H. Fr. Honeck
52425 Jülich

Altdorf, 13.05.2024

**“VERBUNDVORHABEN: „AUTOHYBRIDS“ – „AUTONOM GESTEUERTER
HYBRIDSCHALTER MIT EFFIZIENTER WIEDERVERFESTIGUNGSDETEKTION“ -
FÖRDERKENNZEICHEN – 03EI6006 A BIS 03EI6006 E**

VERBUNDVORHABEN:



Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren:

Partnerübersicht	
Industriepartner	Kurzform
E-T-A Elektrotechnische Apparate GmbH	E-T-A
DEHN SE	DEHN
Forschungspartner	
Technische Universität Ilmenau – Fachgruppe Elektrische Geräte und Anlagen	EGA
Leibniz Institut für Plasmaforschung und Technologie (INP)	INP
PTB Braunschweig – Netzintegrationsmessgrößen Arbeitsgruppe 2.35	PTB

Autoren:

PTB

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)

Bundesallee 100

Arbeitsgruppenleiter 2.35 "Netzintegration, erneuerbare Energien und Speicher"

Dr. Xiaofei Guo, Florian Schilling

E-Mail.: florian.schilling@ptb.de

EGA

Technische Universität Ilmenau

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Berger, Matthias Streck, Arno Bernhardt

Gustav-Kirchhoff-Straße 1

98693 Ilmenau

E-Mail: fg-eet@tu-ilmenau.de

DEHN SE

Dr. Arnd Ehrhardt, Sebastian Schmaußer, Marco Kellermann

Hans-Dehn-Straße 1

92318 Neumarkt i.d.Opf.

E-Mail: Arnd.Ehrhardt@dehn.de

INP Leibniz Institut für Plasmaforschung und Technologie (INP) Greifswald

Dr. Ralf Methling, Dr. Sergey Gortschakow, Ivan Bassai, Dr. Diego Gonzalez, Prof. Dr. Dirk Uhrlandt

Felix-Hausdorff-Straße 2

17489 Greifswald

E-Mail: diego.gonzalez@inp-greifswald.de

E-T-A Elektrotechnische Apparate GmbH Altdorf

Stefan Holbe, Peter Steegmüller, Dr. Hendrik Köpf

Industriestraße 2-8

90518 Altdorf/Nürnberg

E-Mail Hendrik.Koepf@e-t-a.de

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzbericht	1
1.1	Aufgabenstellung	1
1.2	Voraussetzungen, Planung und Ablauf des Vorhabens	2
1.3	Struktur des Vorhabens	3
1.4	Ziele des Vorhabens	5
2	Eingehende Darstellung	7
2.1	AP 1 - Literatur- und Patentstudium	7
2.2	AP 2 - Modularer Modellschalter: Auslegung und Inbetriebnahme	14
2.3	AP 3 - Charakterisierung des Lichtbogens, des Restplasmagases und der Wiederverfestigung	38
2.4	AP 4 - Auslegung der Hybridelektronik und Testmessungen	85
2.5	AP 5 - Modellbildung und Simulation	115
2.6	AP 6 - Qualifizierung der Messeinrichtungen	141
2.7	AP 7 - Funktionsüberprüfung	165
2.8	Veröffentlichungen	178

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Projektkonsortium	2
Abbildung 2.1: DC-System des Typs 3 [3], [4].....	8
Abbildung 2.2: - 1. Zeigt einen bidirektionalen elektronischen Schutzschalter ..	9
Abbildung 2.3: Ausführung Hybridschaltkonzepte	10
Abbildung 2.4: Übersicht relevanter Anmeldungen weltweit.....	12
Abbildung 2.5: CAD-Darstellung des modularen Modellversuchsstandes.....	15
Abbildung 2.6: Modularer Modellschalter mit mechanischer Schaltstrecke	16
Abbildung 2.7: Laserinterferometrisches Wegmesssystem.....	17
Abbildung 2.8: Erstes Konzeptmodell des Schalters.	18
Abbildung 2.9: Skizze der Elektroden.....	18
Abbildung 2.10: Versuchsaufbau – Modellschalter mit LWL	19
Abbildung 2.11: Versuchsaufbau - LWL-Signal	20
Abbildung 2.12: Versuchsaufbau zur Zündung des Modellschalters	21
Abbildung 2.13: Zündung bei 400 V / 80 A Abstand 0,8 mm.....	22
Abbildung 2.14: Zündung bei 400 V / 80 A Abstand 2,4 mm	22
Abbildung 2.15: Versuchsaufbau mit Modellfunkenstrecke	23
Abbildung 2.16: Lichtbogen in der Modellfunkenstrecke.	23
Abbildung 2.17: Modellschalter mit angeschlossenen Hybridkreis	24
Abbildung 2.18: Versuchsaufbau zur Zündung des Modellschalters	25
Abbildung 2.19: Messverlauf bei LWL-Zündung des Modellschalters	25
Abbildung 2.20: Versuchsaufbau zur Zündung des Modellschalters	26
Abbildung 2.21: Messverlauf bei 8/20 μ s-Zündung des Modellschalters.....	26
Abbildung 2.22: Schematische Darstellung der Hybridschaltertopologie	29
Abbildung 2.23:	30
Abbildung 2.24: CAD-Darstellung der Kontaktgeometrie	31
Abbildung 2.25: CAD-Schnittdarstellung des beweglichen Kontaktssystem	31
Abbildung 2.26: CAD-Darstellung einer ersten Alternative	32

Abbildung 2.27: CAD-Darstellung der überarbeiteten Variante	32
Abbildung 2.28: CAD Darstellung der Modelschaltkammer.....	33
Abbildung 2.29: -Darstellung des zunächst umgesetzten Modellschalters	33
Abbildung 2.30: Foto des überarbeiteten Modellschalters.....	34
Abbildung 2.31: Links, Aufnahme vom gesamten Modellschalter	35
Abbildung 2.32: Vergleich verschiedene Antriebssysteme	35
Abbildung 2.33: Schaltplan des Versuchsaufbaus	39
Abbildung 2.34: Seitenansicht des Konzepts Prüfaufbau im Prüffeld	41
Abbildung 2.35: Draufsicht des Konzepts Prüfaufbau im Prüffeld	42
Abbildung 2.36: Schalten von 1 kA bei 1 tau.....	43
Abbildung 2.37: Versuch ohne Wiederzünden	46
Abbildung 2.38: Versuch mit Wiederzünden.....	47
Abbildung 2.39: a) Frontaufnahme des HVR10 in originalem Zustand.....	49
Abbildung 2.40: Kameraaufnahme eines 50 A Bogens	50
Abbildung 2.41: Zeitliche Verläufe von Strom und Spannung	50
Abbildung 2.42: Links: Strom- und Spannungsverlauf eines Ausschaltvorgangs .	51
Abbildung 2.43: Strom- und Spannungsverläufe im Bereich der Ausschaltung ...	52
Abbildung 2.44: Oben: Zeitlicher Verlauf der Spannung	55
Abbildung 2.45: Links: Spannungsverlauf. Rechts Videosequenz.....	56
Abbildung 2.46: Links: Spannungsverlauf. Rechts Videosequenz.....	57
Abbildung 2.47: Versuchsanordnung zur Untersuchung hybriden Schaltens	59
Abbildung 2.48: Links: Zeitverlauf der elektrischen Signale.	60
Abbildung 2.49: Modellschalter des INP.....	62
Abbildung 2.50: Links: aufgezeichnete Elektrodenabstand	63
Abbildung 2.51: Stromkreis zur Untersuchung des hybriden Schaltverhalten	64
Abbildung 2.52: Charakteristische Verläufe vom Generator.....	65
Abbildung 2.53: Beispiel der gemessenen Strom- und Spannungsverläufe	65
Abbildung 2.54: Links: Zusammenstellung von 4 Bildern	66
Abbildung 2.55: Spektrale Verteilung der Bogenstrahlung	67
Abbildung 2.56: Spektren hybrider Schaltlichtbögen	68

Abbildung 2.57: Links: Bogenspektren bei 300 A	69
Abbildung 2.58: Schematische Darstellung des elektrischen Kreises	70
Abbildung 59: Spannungs- und Stromverläufe eines hybriden Schaltvorgangs ...	70
Abbildung 2.60: Verdeutlichung der gemessenen Ströme und Spannungen	71
Abbildung 2.61: Links: Vergrößerung der elektrischen Verläufe.....	71
Abbildung 2.62: Ausschnitte einer Videosequenz mit Doppelbildern.....	72
Abbildung 2.63: 2D-Übersichtsspektren für Entladungen in Modellkammern.....	73
Abbildung 2.64: Links: Übersichtsspektrum unter Verwendung	74
Abbildung 2.65: Zeitverlauf der elektrischen Messungen (links).....	75
Abbildung 2.66: Zeitlicher Verlauf der Plasmatemperatur	77
Abbildung 2.67: Temperaturverlauf um Stromnull. [25]	78
Abbildung 2.68: Beispiel - Errechnete Konduktanz per Längeneinheit.....	81
Abbildung 2.69: Berechnete Leitfähigkeit für Metalldampfplasma	82
Abbildung 2.70: Berechneter Verlauf der kritischen elektrischen Feldstärke.....	83
Abbildung 2.71: Schematische Darstellung des Demonstrators.....	86
Abbildung 2.72: Prüfaufbau	87
Abbildung 2.73: Kondensatorbatterie	87
Abbildung 2.74: Steuerung- bzw. Regeleinheit	88
Abbildung 2.75: Modell der Steuerung- bzw. Regeleinheit	89
Abbildung 2.76: Netzteil.....	90
Abbildung 2.77: Koppeleinheit	90
Abbildung 2.78: Detektionseinheit	91
Abbildung 2.79: Treibereinheit.....	92
Abbildung 2.80: Steuerungseinheit	93
Abbildung 2.81: Steuerungsmodifikationen	93
Abbildung 2.82: Modulare Aufbau Messaufbaus	94
Abbildung 2.83: Bestückung der Leistungsplatine	94
Abbildung 2.84: Hybridschaltkonzept 2-a-ii – Lichtbogenreduziert	97
Abbildung 2.85: Hybridschaltkonzept 2-a-iii – Lichtbogenarm	98
Abbildung 2.86: Begriffsdefinition	99

Abbildung 2.87: Vergleichsmessungen zur Verifikation.....	100
Abbildung 2.88: Bauform der verwendeten Varistoren	102
Abbildung 2.89: Ergebnisüberblick Reihenschaltung	102
Abbildung 2.90: Ergebnisüberblick Parallelschaltung.....	103
Abbildung 2.91: Modelle zur Begrenzung der Peak-Spannung.....	104
Abbildung 2.92: Anschluss des Überspannungsschutzes	106
Abbildung 2.93: Versuchsaufbau.....	107
Abbildung 2.94: Vergleich der Messung ohne Begrenzerschaltung	108
Abbildung 2.95: Vergleich der Messung ohne Begrenzerschaltung	109
Abbildung 2.96: Vergleich der Messung ohne Begrenzerschaltung	110
Abbildung 2.97: Vergleich der Simulation mit der realen Messung	111
Abbildung 2.98: Elektroden vor den Belastungen für die Aufnahmen	112
Abbildung 2.99: Wiederzünden der Funkenstrecke.....	113
Abbildung 2.100: Verhindern des Wiederzündens der Funkenstrecke	115
Abbildung 2.101: Vereinfachtes Ersatzschaltbild des Simulationsmodells	116
Abbildung 2.102: Erweitertes ESB des Versuchsaufbaus	117
Abbildung 2.103: Simulationsmodell in MATLAB Simulink.....	118
Abbildung 2.104: Simulierter Kommutierungsvorgang 1	118
Abbildung 2.105: Simulierter Kommutierungsvorgang 2	119
Abbildung 2.106: Schematische Repräsentation der Schaltstrecke	124
Abbildung 2.107: Blockschema des physikalischen Modells.....	128
Abbildung 2.108: Zeitlicher Verlauf der Elektronendichte	129
Abbildung 2.109: Räumliche Profile des elektrischen Potentials	129
Abbildung 2.110: Räumliche Profile der Teilchendichten für 20 µm Spalt,	130
Abbildung 2.111: Räumliches Profil des elektrischen Potentials.	131
Abbildung 2.112: Räumliche Profile des elektrischen Potentials.....	132
Abbildung 2.113: Räumliche Profile des elektrischen Potentials	133
Abbildung 2.114: (a) räumliche Temperaturprofile für Elektronen	133
Abbildung 2.115: Abhängigkeit der Gasttemperatur an Strom/Stromstärke.	134
Abbildung 2.116: Abhängigkeit des Entladungsstroms	134

Abbildung 2.117: Spannungsbedarf einer Entladung	135
Abbildung 2.118: Typische Temperaturprofile in der Elektrode	136
Abbildung 2.119: Abschaltvorgang für Spannung an der Schaltstrecke.....	136
Abbildung 2.120: Anstieg des Widerstandes	137
Abbildung 2.121: Kritisches elektrisches Feld für Luft-Silber-Gemische	138
Abbildung 2.122: Temperaturprofile in der Elektrode nach 1 ms.....	139
Abbildung 2.123: Temperaturprofile einer Ag-Elektrode.....	139
Abbildung 2.124: Eine Messspule der TU Ilmenau.....	142
Abbildung 2-125 Ein Digitizer der TU Ilmenau.....	143
Abbildung 2-126 Schaltung zur Erzeugung einer rechteckförmigen Stromwelle	147
Abbildung 2-127 Messung mit dem Kabelgenerator.....	148
Abbildung 2-128 Adapter für die Messspule.....	149
Abbildung 2-129 Messshunt.....	150
Abbildung 2-130 Versuchsaufbau: Spannungssprunggenerator	151
Abbildung 2-131 Eine Periode der Rechteckspannung.....	151
Abbildung 2-132 Abfallzeit der Rechteckspannung.....	152
Abbildung 2-133 Schaltbild des Referenzspannungsteilers.	153
Abbildung 2-134 Messaufbau zum Testen	155
Abbildung 2-135 dynamisches Verhältnis des LEM CTSR 0.3 p.....	155
Abbildung 2-136 Schaltbild des finalen Hochspannungsteilers	156
Abbildung 2-137 Schaltbild des Niederspannungsteils.....	157
Abbildung 2-138 Ein Spannungsteiler ohne Gehäuse.....	157
Abbildung 2-139 Hochspannungsteiler mit Gehäuse	158
Abbildung 2.140: Modulare Aufbau Messaufbaus	159
Abbildung 2.141: Aufbau Messshunt Typ 1	160
Abbildung 2.142: Funktion und Ausführungen - Messshunts Typ 1	161
Abbildung 2.143: Vermessung der koaxialen Messshunts.....	162
Abbildung 2.144: Aufbau Messshunt Typ 2	162
Abbildung 2.145: Funktion und Ausführungen - Messshunts - Typ 2.....	163
Abbildung 2.146: Vergleichsmessung zwischen dem Messshunt	164

Abbildung 2.147:	Bypassschalter [27].....	166
Abbildung 2.148:	Common Emitter- oder Common Source	167
Abbildung 2.149:	Hybridschaltkonzept 2-a-ii – Lichtbogenreduziert	169
Abbildung 2.150:	Hybridschaltkonzept 2-a-ii – Lichtbogenreduziert	170
Abbildung 2.151:	Ablaufdiagramm Lichtbogenlöschung –	170
Abbildung 2.152:	Hybridschaltkonzept 2-a-ii – Lichtbogenreduziert	171
Abbildung 2.153:	Ablaufdiagramm Kommutierungsprozess 2	172
Abbildung 2.154:	Hybridschaltkonzept 2-a-ii – Lichtbogenreduziert	172
Abbildung 2.155:	Hybridschaltkonzept 2-a-iii – Lichtbogenreduziert.....	173
Abbildung 2.156:	Hybridschaltkonzept 2-a-iii – Lichtbogenreduziert.....	174
Abbildung 2.157:	Ablaufdiagramm Kommutierungsprozess 1	174
Abbildung 2.158:	Hybridschaltkonzept 2-a-iii – Lichtbogenreduziert.....	175

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1:	Übersicht der AutoHybridS Arbeitspakete	4
Tabelle 2.1:	Übersicht der Patentrechercheergebnisse	12
Tabelle 2.2:	Einteilung der relevanten Treffer der Patentrecherche nach inhaltlichen Schwerpunkten.....	12
Tabelle 2.3:	Zu messende Ströme und Anforderungen an die Messtechnik... 29	
Tabelle 2.4:	Beispiele zeitliche Verläufe von Strom- und Spannung bei hybrid Schalten mit HVR10	52
Tabelle 2.5:	Netzteil - Technische Anforderungen	89
Tabelle 2.6:	Koppeleinheit - Technische Anforderungen	90
Tabelle 2.7:	Detektionseinheit - Technische Anforderungen.....	91
Tabelle 2.8:	Treibereinheit - Technische Anforderungen	91
Tabelle 2.9:	Steuereinheit - Technische Anforderungen	92
Tabelle 2.10:	Parameter für einen Schaltstrom von 500 A.....	95
Tabelle 2.11:	Parameter für einen Schaltstrom von 500 A.....	96
Tabelle 2.12:	Übersicht der verwendeten Parameter	101
Tabelle 2.13:	Vergleich der Varistor-Lebensdauer	104
Tabelle 2.14:	Übersicht der Spannungs-Peaks bei Anwendung der Begrenzer- Schaltungen	105
Tabelle 2.15:	Aufnahmen der Highspeedkamera	113
Tabelle 2.16:	Aufnahmen der Highspeedkamera	115
Tabelle 2.17:	Mögliche Modellansätze	122
Tabelle 2.18:	Plasmachemische Prozesse in Silberplasma	126
Tabelle 2.19:	Vorhandene Messeinrichtungen der DEHN.....	143
Tabelle 2.20:	Vorhandene Messeinrichtungen des INPs.....	145
Tabelle 2.21:	Parameter - Leitungshalbleiter.....	167
Tabelle 2.22:	Energieumsätze Hybridschaltkonzept 2-a-ii – Lichtbogenreduziert – 400 V, 32 A und $\tau = 1$ ms	172

Tabelle 2.23: Energieumsätze Hybridschaltkonzept 2-a-ii – Lichtbogenreduziert – 400 V, 32 A und $\tau = 1$ ms	175
Tabelle 2.24: Ergebnisse der Schutzrechtsrecherche	184

1 Kurzbericht

1.1 Aufgabenstellung

Im Rahmen des Projekts wird anhand verschiedenartiger Messungen des Lichtbogenrestgases und der elektrischen Festigkeit der Schaltstrecke der optimale Ausschaltzeitpunkt genau bestimmt. Das Restplasma kann hierbei hinsichtlich seiner physikalischen Eigenschaften durch spektroskopische Methoden [4] charakterisiert werden. Ein spezielles Augenmerk liegt zusätzlich auf der Temperatur der Elektroden. Mit Hilfe bekannter physikalischer Gesetzmäßigkeiten zur Elektronenemission kann hierbei die Neigung zur Rückzündung ermittelt werden. Eine Überprüfung erfolgt anhand von Impulsspannungsversuchen zur Verifikation der elektrischen Festigkeit der Schaltstrecke.

Für die Erkennung des Kurzschluss- oder Überstromes und gleichzeitiger Einleitung des Ausschaltvorgangs soll die im Kurzschlussfall elektrodynamisch bedingte Kontaktabhebung genutzt werden. Diese tritt an den Kontakten infolge der Holm'schen – Engekraft [5], der Gasdynamik des Metalldampfes [6] und der Lorentzkraft der Stromzuführung auf. Nach einigen 100 μ s ist dadurch ein registrierbarer Spannungsfall [7] über der Schaltstrecke zu detektieren. Hierfür wird im Rahmen des Verbundprojektes eine Detektionselektronik entwickelt. Für einen erfolgreichen extrem schnellen Ausschaltvorgang werden Auslegungskriterien für das Schaltschloss und die Kontakteinheit entwickelt und in Modellschaltern und Demonstratoren umgesetzt. Ziel ist es, dass nach einem dynamischen Kontaktabheber ein ungewolltes Schließen des Kontaktes verhindert wird. Natürlich darf im fehlerfreien Systembetrieb ein auftretender transienter Impulsstrom nicht zu einer Schädigung des Schaltsystems führen.

Die Komplexität dieser Aufgabe erfordert die Zusammenarbeit der beteiligten Projektpartner.

Partnerübersicht	Kurzform
Industriepartner	
E-T-A Elektrotechnische Apparate GmbH	E-T-A
DEHN SE	DEHN
Forschungspartner	
Technische Universität Ilmenau – Fachgruppe Elektrische Geräte und Anlagen	EGA
Leibniz Institut für Plasmaforschung und Technologie (INP)	INP
PTB Braunschweig – Netzintegrationsmessgrößen Arbeitsgruppe 2.35	PTB



Abbildung 1.1: Projektkonsortium

1.2 Voraussetzungen, Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wird durch die 5 Partner, die Firmen Elektrotechnische Apparate GmbH Altdorf (E-T-A), DEHN SE Neumarkt (DEHN), und die Institute Leibniz-Institut für Plasmaforschung und Technologie (INP), das Fachgebiet Elektrische Geräte und Anlagen der Technischen Universität Ilmenau (EGA) sowie die Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig (PTB) durchgeführt. Das Projekt gliedert sich in drei Projektphasen, welche auch im zeitlichen Verlauf wiederzufinden sind. Eine Übersicht über den zeitlichen Verlauf der einzelnen Arbeitspakete gibt der **Anhang 8** wieder. In **Tabelle 1** sind die Arbeitspakete mit Personenmonaten eingetragen. Die detaillierte Übersicht über die Personenmonate der einzelnen Projektteilnehmer ist in der jeweiligen Teilvorhabenbeschreibung zu finden.

In Phase 1 in den ersten 1,25 Jahren erfolgt zu Beginn in **AP. 1** eine Literatur und Patentrecherche zur Aktualisierung vorhandener Literatur, zum Stand der Forschung sowie zur Auswahl geeigneter Lösungsansätze. Basierend auf den erarbeiteten Resultaten wird eine Literaturdatenbank im Zuge des Projektes angelegt.

Die technischen Anforderungen an ein Hybridschaltgerät und einen hybriden Überspannungsschutz in modernen DC-Netztopologien werden mit Hilfe von Systembetrachtungen, Berechnungen und Recherchen durch das EGA, die E-T-A und DEHN erarbeitet und definiert. Die Definition orientiert sich an Normen und aktuellen Normenentwürfen. Das INP vertieft die vorhandenen Erfahrungen auf den Gebieten thermischer und nicht-thermischer Plasmen in Absprache mit den Verbundpartnern bezüglich der Herausforderungen in Schaltkammern hybrider Anordnungen. Unterstützt wird diese Arbeit durch die Partner E-T-A und DEHN, welche über einen hohen Erfahrungsschatz im Bereich hybrider DC-Schutzgeräte verfügen.

Das Projekt stützt sich auf die messtechnische Ermittlung und Charakterisierung der Eigenschaften des Lichtbogenrestplasmas nach Stromnull und der damit zusammenhängenden elektrischen Festigkeit der Schaltstrecke. Ausgehend von den Ergebnissen in **AP. 1** werden in **AP. 2** schaltgerätnahe Prüfstände und Messeinrichtungen am INP und des EGA ausgelegt und in Betrieb genommen. Dabei konzentriert sich das INP in **AP. 3** auf die Erarbeitung und Erforschung der plasmaphysikalischen Vorgänge inklusive der Wiederverfestigung der Modellschaltstrecke und das EGA in **AP. 4** wird die anwendungsnahe Forschung an der Modellschaltkammer mit Hybridelektronik verfolgen. Das EGA wird die Auslegung einer Hybridelektronik inklusive Steuerung federführend übernehmen. Die Verbundpartner E-T-A und DEHN werden die Dimensionierungen konstruktiv und fertigungstechnisch unterstützen. Auf diese Weise werden experimentelle Schaltkammer-Anordnungen hoher Anwendungsnähe / Seriennähe gewährleistet.

1.3 Struktur des Vorhabens

Das Projekt besteht aus mehreren Projektphasen, welche auch im zeitlichen Verlauf wiederzufinden sind. In der folgenden Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. sind die Arbeitspakete mit Personenmonaten eingetragen.

Tabelle 1.1: Übersicht der AutoHybridS Arbeitspakete

AP (Arbeitspakete)		PM (Personenmonate)				
		FGEA	PTB	E-T-A	DEHN	INP
AP. 1	Literatur- und Patentstudium	3,6	1	1	1,5	3,1
AP. 2	Modularer Modellschalter: Auslegung, Aufbau und Inbetriebnahme	15	0,5	1	12,25	12,6
AP. 3	Charakterisierung des Lichtbogens, des Restplasmagases und der Wiederverfestigung der Schaltstrecke (INP)	2	0	1	8	24
AP. 4	Auslegung der Hybridelektronik und Testmessungen (TUI)	16	0	8	3,25	0
AP. 5	Modellbildung und Simulation zur elektrischen Festigkeit und auftretender elektrischer Feldstärke der Schaltstrecke bei DC	11	0	1	0,25	24,5
AP. 6	Qualifizierung der Messeinrichtungen für schnelle Strom- und Spannungsvorgänge in den Fachlaboren der Projektpartner	2	21,5	2	2	2,9
AP. 7	Funktionsüberprüfung in realen Schaltgeräten	8	0	4	4,5	0
Gesamt		57,6	23	18	31,75	67,1

1.4 Ziele des Vorhabens

Ziel des Forschungsprojektes „AutoHybridS“ ist die Absicherung der bedarfsorientierten Verteilung von Energie auf Bussystemen mit Nennspannungen von bis zu 850 V Gleichspannung. Vorgesehen sind solche Schaltgeräte für Produktionsanlagen mit einem Höchstmaß an Ressourceneffizienz. Hierfür werden extrem schnell auslösende, kostengünstige, autonome Schaltgeräte für maximale Systemstabilität und Versorgungssicherheit entwickelt und erprobt. Diese sollen nicht nur eine sichere und selektive Zu- und Abschaltung der elektrischen Verbraucher gewährleisten, sondern auch die Einbindung regenerativer Energiequellen und Speicher einfach und flexibel ermöglichen.

Wichtiger Faktor zur Zielerreichung ist die Nutzung zentraler DC-Bussysteme hoher Systemspannung und dadurch der Verzicht auf verteilte, verlustbehaftete AC/DC Umrichter. Aufgrund der in DC-Netzstrukturen vorkommenden schnellen Energiespeicher und der kapazitiven Lasten kommt hierbei im Fehlerfall, insbesondere beim Kurzschluss, den Schaltgeräten eine wichtige Aufgabe zu. Diese müssen möglichst selektiv den Überstrom oder Kurzschluss in den gestörten Anlagenteilen nach *DC-Industrie* [1] in weniger als 1 ms strombegrenzend ausschalten oder begrenzen und eine sichere galvanische Trennung herstellen. Nur auf diese Weise kann ein kontinuierlicher Systembetrieb gewährleistet werden.

Diese Forderungen an Schaltgeräte können nur durch die Kombination von Elektronik und Mechanik im Hybridschaltgerät erreicht werden. Schwachstelle bzgl. der Schaltgeschwindigkeit ist der mechanische Schalterteil. Gelingt es die Wiederverfestigungsspannung der Schaltstrecke dynamisch zu ermitteln, können Halbleiter in kürzest möglichen Intervallen den Schaltvorgang ausführen. Die Ermittlung des frühestmöglichen Ausschaltzeitpunktes des Halbleiters stellt demzufolge die grundlegende Information für die optimale Ansteuerung dar. Erfolgt die Abschaltung früher als ideal, kommt es zur Wiederzündung des Lichtbogens und zum Scheitern des Ausschaltvorgangs. Erfolgt dagegen die Abschaltung zu spät, wird das halbleitende Element unnötigerweise überlastet, wodurch es zur Lebensdauerminde rung oder gar zu seiner Zerstörung kommen kann. Hierbei wäre mit einer Verlängerung der Schaltzeiten sowie der Aufhebung der Selektivität zu rechnen.

Im Rahmen dieses Projekts wird anhand verschiedenartiger Messungen des Lichtbogenrestgases und der elektrischen Festigkeit der Schaltstrecke der optimale Ausschaltzeitpunkt genau bestimmt. Das Restplasma kann hierbei hinsichtlich seiner physikalischen Eigenschaften durch spektroskopische Methoden [4] charakterisiert werden. Ein spezielles Augenmerk liegt zusätzlich auf der Temperatur der Elektroden. Mit Hilfe bekannter physikalischer Gesetzmäßigkeiten

zur Elektronenemission kann hierbei die Neigung zur Rückzündung ermittelt werden. Eine Überprüfung erfolgt anhand von Impulsspannungsversuchen zur Verifikation der elektrischen Festigkeit der Schaltstrecke.

Für die Erkennung des Kurzschluss- oder Überstromes und gleichzeitiger Einleitung des Ausschaltvorgangs soll die im Kurzschlussfall elektrodynamisch bedingte Kontaktabhebung genutzt werden. Diese tritt an den Kontakten infolge der Holm'schen – Engekraft [5], der Gasdynamik des Metalldampfes [6] und der Lorentzkraft der Stromzuführung auf. Nach einigen 100 μ s ist dadurch ein registrierbarer Spannungsfall [7] über der Schaltstrecke zu detektieren. Hierfür wird im Rahmen des Verbundprojektes eine Detektionselektronik entwickelt. Für einen erfolgreichen extrem schnellen Ausschaltvorgang werden Auslegungs-kriterien für das Schaltschloss und die Kontakteinheit entwickelt und in Modellschaltern und Demonstratoren umgesetzt. Ziel ist es, dass nach einem dynamischen Kontaktabheber ein ungewolltes Schließen des Kontaktes verhindert wird. Natürlich darf im fehlerfreien Systembetrieb ein auftretender transienter Impulsstrom nicht zu einer Schädigung des Schaltsystems führen.

Die Komplexität dieser Aufgabe erfordert die Zusammenarbeit der beteiligten Institute INP und EGA, der PTB und der Industriepartner E-T-A sowie Dehn. Hierdurch erfolgt von Projektbeginn an die Konzeptionierung und später die Umsetzung eines Funktionsmusters eines DC-Schutzschalters in Abstimmung und im Erfahrungsaustausch mit Partnern aus der Praxis.

2 Eingehende Darstellung

2.1 AP 1 - Literatur- und Patentstudium

2.1.1 E-T-A

Ziel der Literatur- und Patentrecherche ist es den Stand der Technik zu erfassen und sinnvolle Untersuchungsschwerpunkte zu erörtern.

E-T-A hat sich hierbei auf die Themengebiete „Schutzkonzepte und Systeme“ und „Schaltgeräte und Materialien“ der Hybridschalter [1], [2]. In Abstimmung mit den Partnern fand eine erste Schutzrechtsrecherche am PATON der TUI statt. Ausgehend von diesen Ergebnissen wurde seitens der E-T-A eine weitere Schutzrechtsrecherche initiiert. Suchvorgaben wurden im Rahmen eines Projekt-Treffens mit den Partnern geteilt. Einen gekürzten Auszug der Ergebnisse der Recherche zeigt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** in Anhang A.

Ziel der E-T-A ist eine effiziente Ausnutzung der Komponenten des Hybridschalters. Auf diese Weise kann das Schaltverhalten verbessert werden. Anlass für Untersuchung und Bewertung von Hybridschaltkonzepten ist der zunehmende Einsatz von Gleichstromanwendungen. Gleichstromanwendungen nehmen aktuell immer weiter zu. Sei es im Bereich der Industrieautomation 24 V, 48 V, 380 V, 650 V, 760 V [3], [4], [5], Straßenbeleuchtung 760 V, Schiffs-Bordnetze 1500 V und 3000 V [6], elektrifizierte Luftfahrt 800 V, 1500 V, 3000 V, Bahnanwendungen-Infrastruktur 400 V, Bahnanwendungen-Antrieb 400 V, 1500 V, 3000 V oder Ausbau und Integration erneuerbarer Energieerzeuger 1000 V, 3000 V [7] in Inselnetzen, privatem häuslichem Bereich 380 V, Gewächshäusern 380 V, 760 V sowie Elektrifizierung straßengebundener Mobilität bzw. Elektromobilität, Landwirtschaft, Baustellenfahrzeuge 48 V, 110 V, 400 V, 800 V bis derzeit 1500 V .

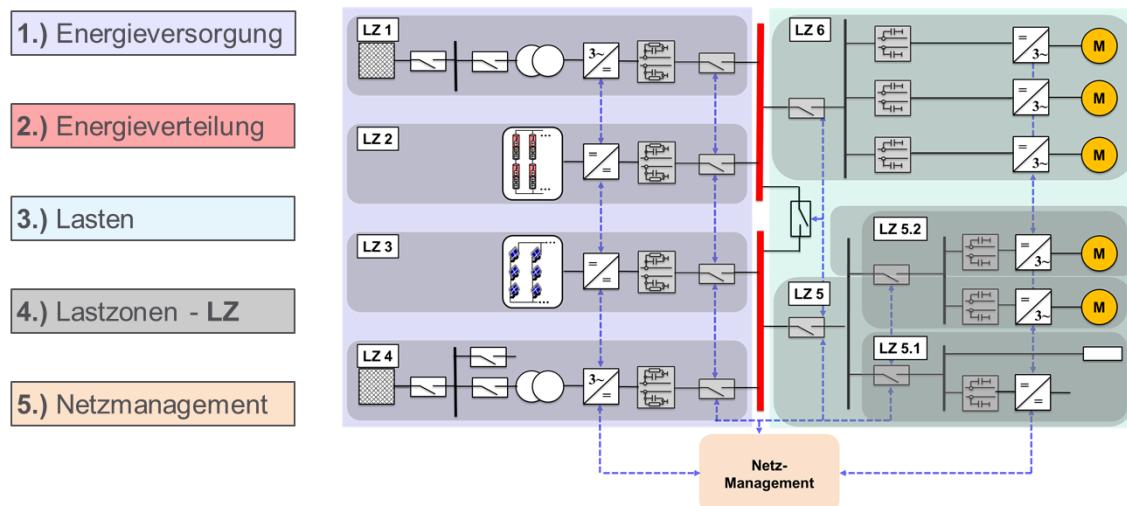


Abbildung 2.1: DC-System des Typs 3 [3], [4]

Solchen Systeme verfügen gegenüber herkömmlichen Netzen über drei auslegungsrelevante Eigenschaften nach [8] und [9]. Erstens können Lasten auch Quellen sein. Zweitens liegen kapazitive Zwischenkreisspeicher im System vor. Drittens werden Speicher, wie Batterien oder Brennstoffzellen eingesetzt [10].

Diese Merkmale führen zu vier technischen Anforderungen, welche ein Schaltgerät beherrschen muss [4]. Hierbei handelt es sich um;

1. Das Freischalten von elektrischen Fehlern in kleiner 3 ms
2. Das Schalten bidirektonaler Ströme
3. Das Beherrschen hoher Stromsteilheiten im Fall eines Kurzschlusses
4. Hohe transiente Kurzschlussströme aufgrund verteilter Quellen

Die Integration leistungselektronischer Schaltelemente in Schalt- und Schutzkonzepte bringt technische Vorteile. Normenentwürfe wie [11] sind eine Konsequenz. Ausgehend von Ergebnissen des Projekts werden bei der E-T-A folgende Schaltkonzepte unterschieden:

- 1. Mechanische Schaltgeräte**
- 2. Hybridschalter, engl. „Semiconductor hybrid switch“**

Konzept a – NULL-Spannung

Konzept i – **Lichtbogenbehaftet**

Konzept ii – **Lichtbogenreduziert**

Konzept iii – **Lichtbogenarm**

Konzept iv - **Lichtbogenfrei**

Konzept b - NULL-Strom

3. Halbleiter Schalter, engl. „Semiconductor switch“

In einigen Fällen werden elektronikbasierte Schaltgerätetypen: Relais, Schütze, Leistungsschalter, Geräteschutzschalter, Leitungsschutzschalter, Lastschalter oder Trennschalter eingesetzt. Hierbei kann man am Beispiel der Leistungsschalter nach „*Draft IEC 60947-10 Semiconductor Circuit Breaker*“ unterscheiden zwischen:

1. **Semiconductor circuit-breaker (SCCB)** – Schutzeinrichtung mit Halbleiterschallementen und in Serie geschalteten mechanischen Schaltelementen für die Isolationsfunktion, die in der Lage ist, unter normalen Bedingungen Strom einzuschalten, zu leiten und zu unterbrechen sowie unter bestimmten abnormalen stromkreisbedingungen, wie z.b. Kurzschluss, Strom zu einzuschalten, für definierte Zeit zu führen und zu unterbrechen
2. **Semiconductor hybrid circuit-breaker (SCHCB)** – Schutzeinrichtung mit Halbleiterschallementen und zur Isolationsfunktion in Reihe geschalteten mechanischen Schaltelementen, die zusätzlich mechanische Schaltelemente parallel zu den Halbleiterschallementen aufweisen, um die Funktionsleistung zu reduzieren, die in der Lage ist, unter normalen Bedingungen Ströme einzuschalten, zu führen und zu unterbrechen sowie unter bestimmten abnormalen Bedingungen wie denen eines Kurzschlusses Ströme einzuschalten, für eine bestimmte Zeit zu führen und zu unterbrechen.

Die nachfolgende Darstellung zeigt Schaltzeichen nach IEC sowie die 2 mögliche Ausführungsbeispiele eines semiconductor hybrid circuit-breakers (SCHCB).



Abbildung 2.2:- 1. Zeigt einen bidirektionalen elektronischen Schutzschalter – 2 Zeigt einen bidirektionalen elektronischen Schutzschalter mit Isolationsvermögen, bzw. Trennkontakt

Solche semiconductor hybrid switching devices (SCHSD) können sowohl für AC als auch für DC eingesetzt werden.

Vor- und Nachteile mechanischer, elektronischer und hybrider Schaltkonzepte geben [12] und [13]. Im Gegensatz zu [14] werden keine Schaltkonzepte des Typs **Konzept 2-b-NUL-STROM** in Autohybrids seitens der E-T-A untersucht. Im Rahmen des Projekts werden ausschließlich verschiedene Schaltkonzepte des Typs **Konzept 2-a-NUL-SPANNUNG** bis zu einem Nennstrom von 250 A analysiert. Die nachfolgende Darstellung zeigt schematisch vereinfacht zwei

Ausführungsbeispiele von **Konzept 2-a-NUL-Spannung** Hybridschaltkonzepten, die im Projekt untersucht werden.

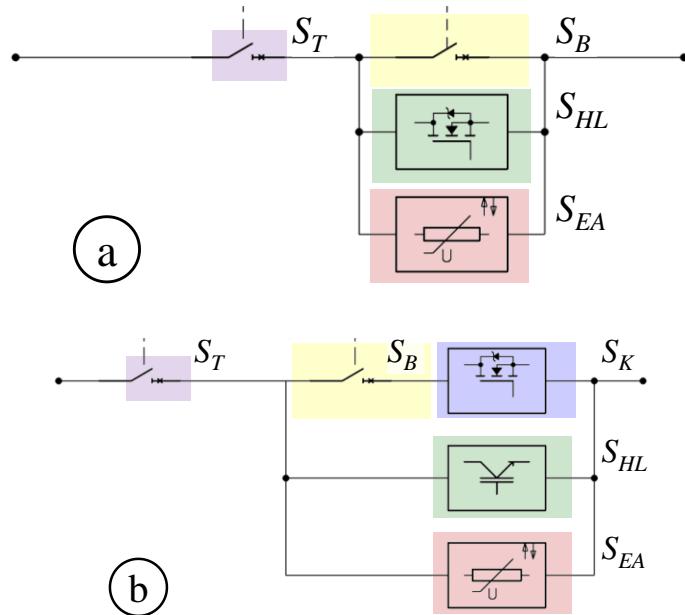


Abbildung 2.3: Ausführung Hybridschaltkonzepte

Abbildung 2.3-a zeigt ein klassisches Hybridschaltkonzept, bestehend aus einem Bypassschalter S_B , einem Halbleiterschalter S_{HL} und einem Energieabsorber S_{EA} . Schalter S_T ist ein Schalter mit Trennfunktion. In Abbildung 2.3-b ist die Ausführung eines Hybridschaltkonzepts mit zusätzlichem Kommutierungsschalter S_K , für die Einleitung einer Zwangskommunikation, zu sehen [15].

Das Schaltkonzept **Konzept 2-a-NUL-Spannung** beruht darauf, dass ein Schaltlichtbogen im Bypassschalter S_B durch einen ein- und ausschaltbaren niederohmigen Halbleiterschalter S_{HL} kurzgeschlossen wird. Der Spannungsfall über der Schaltstrecke wird unter die Mindestlichtbogenbrennspannung gesenkt und der Schaltlichtbogen verlischt. Nach einer Wiederverfestigungsdauer der Schaltstrecke, welche idealerweise der Mindesteinschaltdauer t_{HL} des Halbleiterschalters S_{HL} entspricht, wird der Halbleiterschalter S_{HL} ausgeschaltet. Final wandelt der Energieabsorber S_{EA} etwaige induktive Lastkreisenergie W_L um und der Strom wird zu 0 A gezwungen.

Hybridschaltkonzepte des Typs **Konzept 2-a-NUL-Spannung** wurden bereits von [16], [17], [13], [18] untersucht. Diese Arbeiten behandeln die Herausforderungen des hybriden Schaltens von Gleichströmen im Fall von Spannungen bis 800 V.

2.1.2 FG EGA

Im Rahmen des Projektes sind, wie in der Gesamtvorhabenbeschreibung dargelegt, mehrere, über die Projektlaufzeit verteilte, Literatur- und Patentrecherchen erfolgt.

Fokus liegt hierbei auf internationalen Veröffentlichungen, sowohl wissenschaftlich als auch normativ, sowie thematisch korrespondierende Patentanmeldungen. Die Literaturrecherchen sind federführend von wissenschaftlichen Mitarbeitern durchgeführt worden. Unterstützend sind hierbei studentische Hilfskräfte eingesetzt worden. Die gewonnenen Erkenntnisse der Literaturrecherche sind laufend zu den Projekttagen vorgestellt worden. Somit konnte zeitnah eine Steuerung der Recherchetätigkeit entsprechend der aktuellen Bedürfnisse und Fragestellung des Konsortiums erreicht werden. Zum Ende der Projektlaufzeit ergab sich so eine Literaturdatenbank im Umfang von 74 Literaturstellen.

Der Patentrecherche sind projektinterne Abstimmungen, insbesondere mit den Partnern der Industrie vorangegangen. Hierdurch konnte vorab eine Eingrenzung des Suchfeldes erreicht werden. Durchgeführt wurde die Patentrecherche durch das PATON, dem Landespatentzentrum Thüringen. Mit den Informationen zu bereits bekannten, sowie thematisch relevanter Anmeldungen und zugehöriger Schlagworte konnte durch das PATON eine Vorabrecherche durchgeführt werden. Auf Basis der dabei gewonnenen Erkenntnisse ist eine Nachschärfung des Suchfeldes möglich gewesen, wodurch die Ergebnisqualität der Hauptrecherche gesteigert wurde. Die Auswertung und Vorstellung der Vorabrecherche ist federführend durch wissenschaftliche Mitarbeiter unter enger, gemeinsamer Abstimmung mit den Projektpartnern erfolgt. Die deutlich umfangreichere Hauptrecherche ist ebenso in Gesamtheit primär durch wissenschaftliche Mitarbeiter, unterstützt durch studentische Hilfskräfte erfolgt. Hierdurch wurde sichergestellt, dass eine fachlich geeignete Bewertung der Patente erfolgt und somit ausschließlich relevante Anmeldungen herangezogen wurden. Nach Ablauf von zwei Dritteln der Projektlaufzeit ist aufgrund der hohen Dynamik im Forschungsbereich des Hybridschalters eine Nachrecherche durchgeführt worden. Diese erfolgte aufbauend auf den Erkenntnissen der Hauptrecherche und konnte das Suchfeld nochmals im Bereich der vollelektronischen Schaltgeräte nachschärfen. Die in den Recherchen erzielten Ergebnisse sind zusammengefasst dargestellt.

Unterstützt wurden die Auswertungen des FG EGA durch die vom PATON selbst erstellte statistische Auswertung der Patentrecherche zu verschiedenen Aspekten der Patentanmeldungen. Besonders relevante Patente sind detailliert durch wissenschaftliches Personal ausgewertet und im Rahmen von Projekttagen dem Konsortium vorgestellt worden.

Tabelle 2.1: Übersicht der Patentrechercheergebnisse

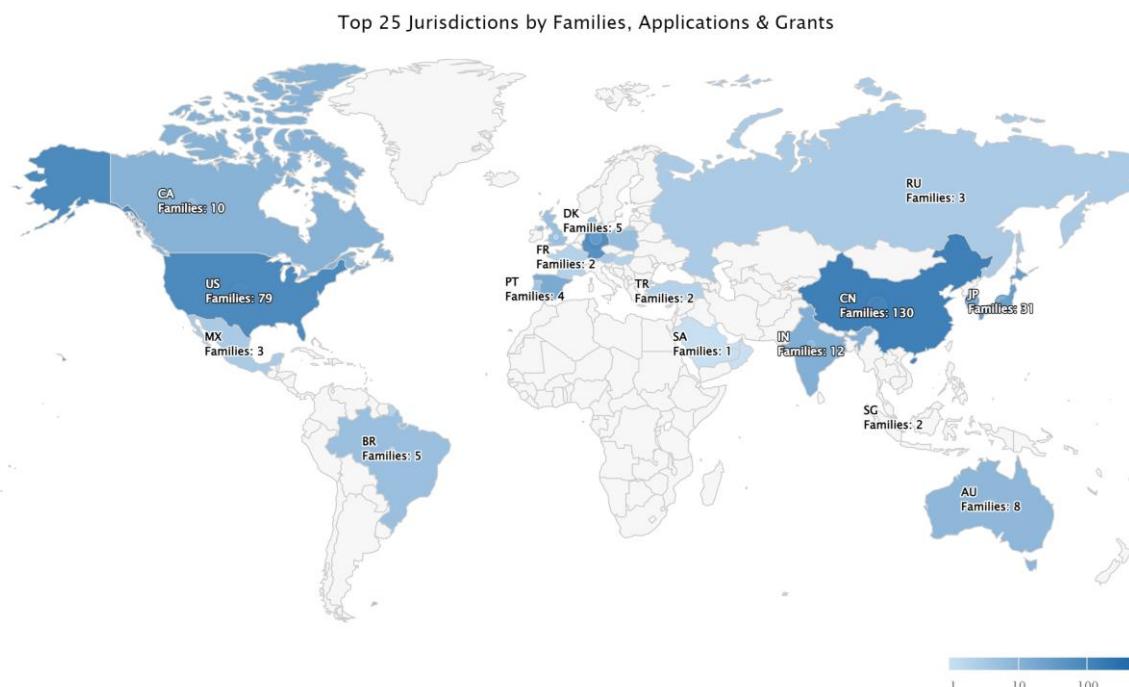
Recherchetreffer	Recherche	Vorabrecherche	Hauptrecherche	Nachrecherche
Gesamttrefferzahl		60	170	207
Relevante Treffer		20	46	20

Die relevanten Treffer der Patentrecherche sind dabei nochmals inhaltlichen Schwerpunkten zugeordnet worden. Damit sind erste, grundlegende Einschätzungen hinsichtlich des aktuellen Forschungs- und Entwicklungsstandes innerhalb der Industrie ableitbar. In nachfolgender Darstellung ist die Verteilung der Patente dargestellt.

Tabelle 2.2: Einteilung der relevanten Treffer der Patentrecherche nach inhaltlichen Schwerpunkten

Schwerpunkt	Konzept / Verfahren	/	Schaltung	marktreifes Produkt
Anzahl Patente	26		20	3

Basis dieser Auswertung bilden die Rechercheergebnisse der Hauptrecherche. Die vergrößerte Gesamtsumme an Patenten gegenüber der relevanten Treffer der Hauptrecherche ist mit Doppelzuordnungen zu erklären. Eine sehr trennscharfe Zuordenbarkeit zu den Schwerpunkten ist nicht immer möglich.

**Abbildung 2.4: Übersicht relevanter Anmeldungen weltweit**

Dadurch ist eine umfangreiche Aktualisierung des Kenntnisstandes zum aktuellen Stand der Forschung sowie geeigneter Lösungsansätze erreicht worden. Aufbauend auf den hier erzielten Ergebnissen ist innerhalb des Projektes eine Literaturdatenbank angelegt worden. Gleichermaßen gilt für die Ergebnisse der Patentrecherchen. Die relevanten Treffer sind in Excellisten zusammengestellt worden, um eine kompakte und durchsuchbare Ergebnisübersicht zu erhalten. Mit Hilfe der Erkenntnisse aus den Recherchen sind im weiteren Projektverlauf insbesondere in AP 2 schaltgerätenahe Prüfstände und geeignete Messeinrichtungen konzipiert, aufgebaut und in Betrieb genommen worden.

Die Literatur- und Patentdatenbank steht den Projektpartnern auf dem projekteigenen SharePoint des Fachgebietes Elektrische Geräte und Anlagen zur Verfügung.

2.2 AP 2 - Modularer Modellschalter: Auslegung und Inbetriebnahme

2.2.1 E-T-A

Als Grundlage der Untersuchungen des Volumens zwischen den mechanischen Schaltkontakten, der sogenannten Schaltstrecke, in den Phasen der Kontaktöffnung bis zur Nachbogenphase im Rahmen der Arbeitspakete AP. 3 bis AP. 6 werden in AP. 2 Modellschaltkammern konzipiert, konstruiert und realisiert. Zur Umsetzung der Kontaktbewegung im Inneren dieser Modellschaltkammern ist eine entsprechende Antriebseinheit notwendig. Das Konzept der Modellschaltkammer muss dabei sowohl den plasmaphysikalischen Forschungsaufgaben (INP) als auch der schaltgerätenahen Forschungsaufgabe (EGA) genügen. Hierbei bedarf es unterschiedlichster Modellaufbauten, um die Lichtbogen- bzw. Plasmeeigenschaften des öffnenden Schaltkontaktees messtechnisch zu erfassen.

Weiterhin müssen die Größenordnungen der Modellschaltkammer, Kontaktabstände, Kontaktgrößen, Materialeinflüsse von Isoliermaterialien, Kontaktwerkstoffen und deren geometrische Anordnungen denen des zu entwickelnden Schalt- und Überspannungsschutzsystems entsprechen. Weiterhin unterstützt E-T-A in den Arbeitspaketen beim Festlegen des Parameterbereichs, den Anforderungen an die Modellschaltkammer, Belastungsgrößen, der konzeptionellen Messmethodik sowie der Schnittstellendefinition für die Anbindung der Hybridelektronik an den Modellschalter.

Die E-T-A hat für die Entwicklung der Modellschalter bei den Partnern EGA und INP das Produkt HVR 10 der E-T-A als Grundlage herangezogen. Es wurden sowohl technische Parameter, Konstruktionsdateien als auch Materialdaten ausgetauscht.

2.2.2 EGA

AP 2.3 Modellschalter (Antrieb, Steuerung) Elektronik

Im Rahmen des Projektes AutoHybridS wurde ein modularer Modellschalter (siehe unten) entwickelt und aufgebaut. Er ermöglicht es, austauschbare elektrische Kontakte definiert zu öffnen und zu schließen und dabei dynamisch elektrische und mechanische Parameter präzise und hochauflöst zu erfassen.

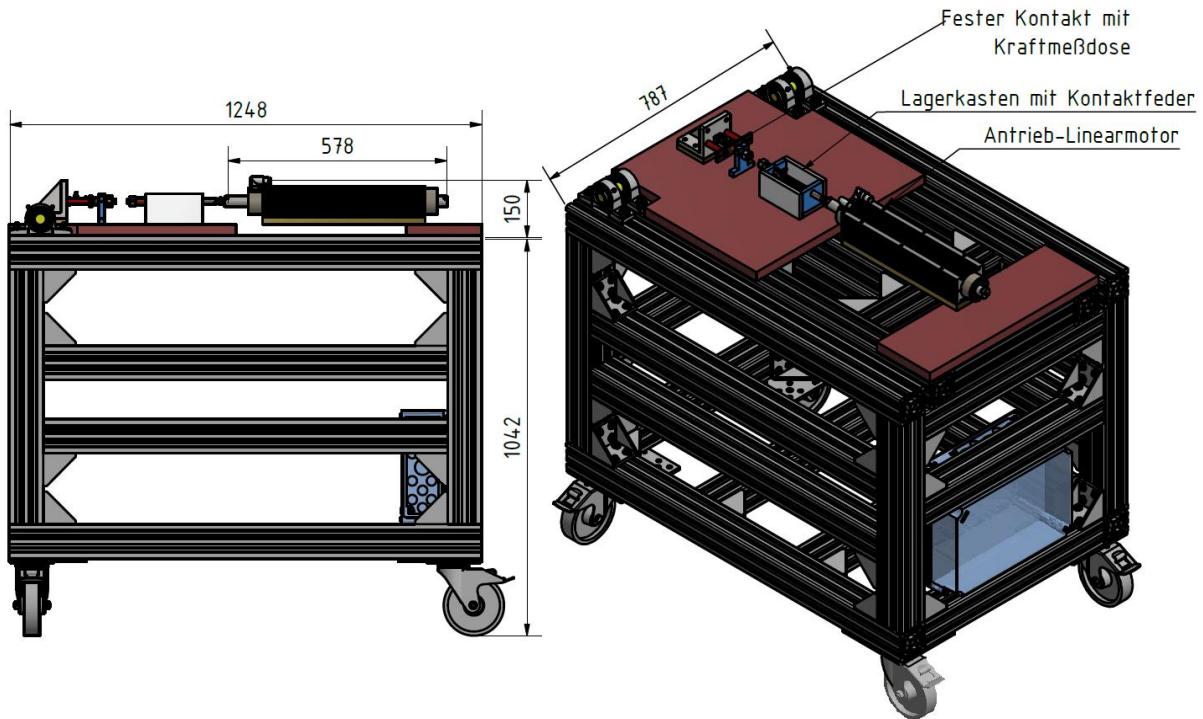


Abbildung 2.5: CAD-Darstellung des modularen Modellversuchsstandes

Im Fokus stehen bei diesen Untersuchungen die Folgenden Parameter:

- Strom
- Spannung
- Kraft wie z. B. Verschweißkraft
- Weg wie z. B. Öffnungsstrecke

Die Gesamtsteuerung und Messdatenerfassung übernimmt ein Echtzeitsystem von NI. Als Antrieb wurde ein Linearantrieb der Fa. LinMot verwendet. Hierdurch wird ermöglicht frei parametrierbare Weg-Zeit-Kennlinien für die Kontaktöffnungsbewegung vorzugeben. Damit sind beispielsweise die in mechanischen Schaltgeräten üblichen Öffnungsgeschwindigkeiten im Bereich von bis zu 2 m/s bei Kontakthüben von 10 bis 20 mm darstellbar. Somit kann das Öffnungsverhalten beliebiger Schaltgeräte nachgebildet werden. Gleichzeitig können auch sehr kleine Geschwindigkeiten, wie sie bei o. g. Verschweißkraftmessungen (Zugversuch) üblich sind, realisiert werden. Mit dem hier entwickelten Modellschalter ist es zusätzlich möglich das Schaltverhalten der Kontakte in unterschiedlichen Einbaulagen zu untersuchen. Hierzu kann, wie nachfolgend dargestellt, die Schaltstrecke in eine vertikale Position verbracht werden.

Zur Messung der elektrischen Größen kommen im aktuellen Ausbau des Versuchsstandes kompensierte Stromwandler zum Einsatz.

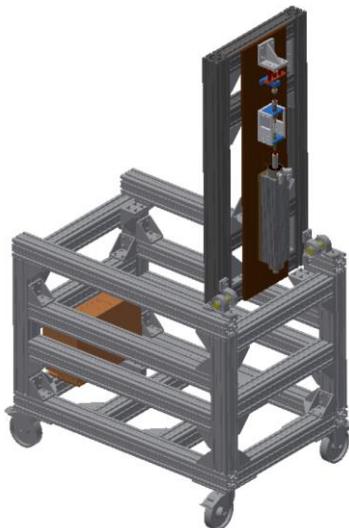


Abbildung 2.6: Modularer Modellschalter mit mechanischer Schaltstrecke in vertikaler Position

Die Spannungsmessung erfolgt mit im Projekt durch die PTB entwickelten und kalibrierten Spannungsteilern. Deren Anforderungen sind durch das Projektkonsortium festgelegt worden.

Die für die Untersuchung notwendigen Kraftmessungen werden mit Hilfe eines piezoelektrischen Kraftsensors realisiert. Hauptaufgabe ist hierbei neben der Messung der Kontaktkräfte eine Erfassung der bei eventuellen Kontaktverschweißungen auftretenden Aufbrechkräfte.

Weiterer zentraler Bestandteil des modularen Versuchsschalters ist ein laserinterferometrisches Wegmesssystem, welches nachfolgend dargestellt ist. Die Kontaktposition wird durch das Messsystem mit einer Abtastrate im MHz-Bereich vermessen. Die Kontaktposition kann mit einer Genauigkeit im Sub- μm -Bereich abgebildet werden.



Abbildung 2.7: Laserinterferometrisches Wegmesssystem bestehend aus: 1 Sensorkopf, 2: Umlenkspiegel, 3: Reflektor

Nach initialer Programmierung aller mechanischen und elektrischen Parameter in der Benutzeroberfläche, führt das System das Mess- und Versuchsprogramm vollständig automatisch durch und legt alle erhobenen Daten zentral in einer Messdatei ab, die der weiteren Nutzung und Verarbeitung zu Verfügung steht.

2.2.3 DEHN

AP.2.3: Modularer Modellschalter mit feststehenden Elektroden: Auslegung, Aufbau, Inbetriebnahme

Im **AP 2.3.1** wurde ein Modellschalter modularer Bauweise konzipiert und aufgebaut (siehe Abbildung 2.8). Durch optische Zugänge wird die spektroskopische Analyse von Lichtbogen, Restplasma und Kontaktflächen ermöglicht. Für die austauschbaren Fenster und Elektroden wurden in Abstimmung mit INP unterschiedliche Materialien ausgewählt, um einen möglichen Materialeinfluss auf das Wiederzünden zu untersuchen. Für die optischen Fenster wurden die Materialien Quarzglas und Makrolon, für die Elektroden Kupfer (E-Cu 2.0060), Wolframkupfer 80/20 sowie optional Edelstahl (1.4301) bestimmt. Die Materialauswahl erfolgte unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Literaturrecherche. Die Elektroden im Modellschalter befinden sich in einer feststehenden Anordnung. Um die Auswirkungen des Elektrodenabstands zu bewerten, wurden Funkenstrecken mit drei verschiedenen Elektrodenabständen (0.8 mm, 1.6 mm und 2.4 mm) entworfen und erstellt (siehe Abbildung 2.9).

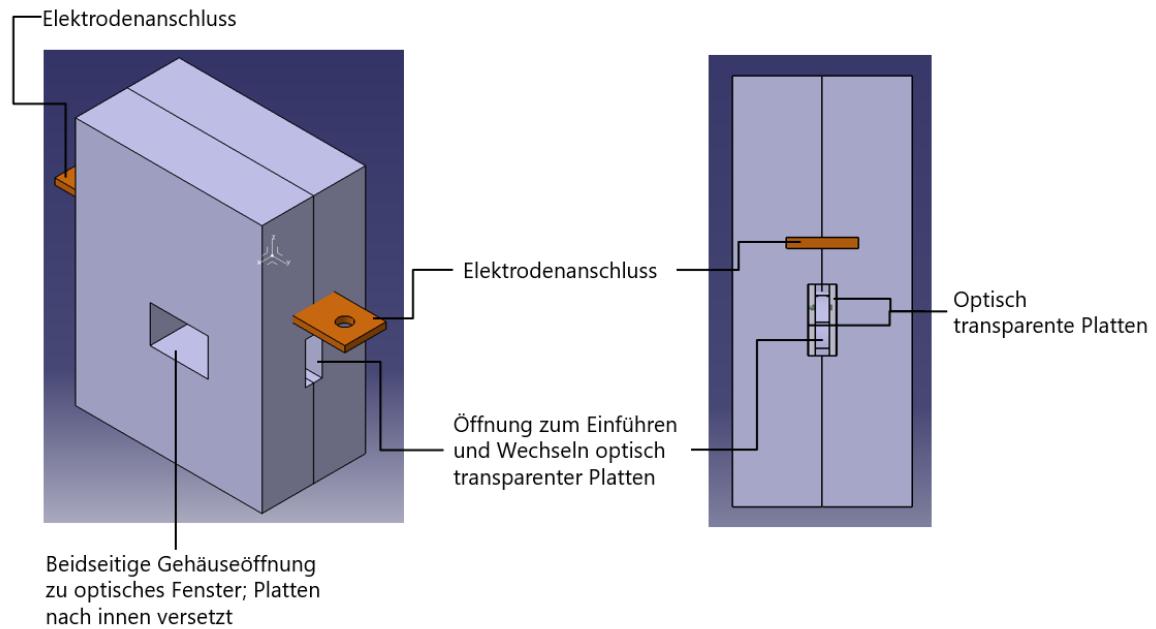


Abbildung 2.8: Erstes Konzeptmodell des Schalters.

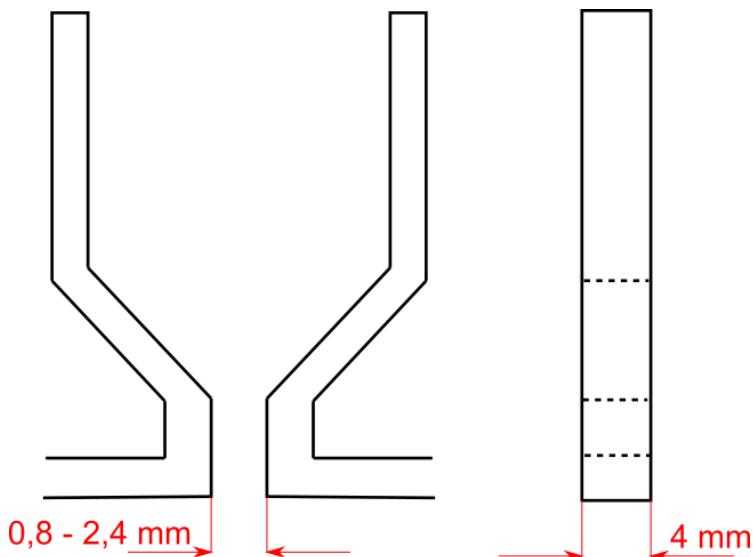


Abbildung 2.9: Skizze der Elektroden.

Die Breite der Elektroden wurde nach Abstimmung mit INP nicht variiert und auf 4 mm festgelegt.

Des Weiteren wurden weitere mögliche Schaltermodifikationen vereinbart, die Einfluss auf die Wiederverfestigung haben könnten. Dabei handelt es sich um folgende Punkte:

- Druckluftzuführung im Zündbereich
- Änderung des Verdämmungsgrades
 - frei ausblasend

- teilausblasend
- geschlossen
- Homogenes Magnetfeld durch Ringmagnete

Jede dieser Maßnahmen wirkt sich auf die Verweildauer des Lichtbogens im Zündbereich aus, indem sie das Abwandern fördert oder hemmt.

In **AP 2.3.2** wurde die Steuerungseinheit des Modellschalters entwickelt und an das zuvor vorgestellte Konzept des Schalters angepasst. Dabei wurden in **AP 2.3.3**, nach Abstimmung mit INP, die Modellschalter mit der Triggerung über ein LWL-Signal ausgestattet, da die Untersuchungen vorerst nur analog zum Modellschalter von ETA mit Gleichstrom belastet werden sollen. Die LWL-Triggerung erlaubt die einfache Einbindung des Schalters in die Ablaufsteuerungen (Abbildung 2.10). Durch die Steuerung (INP) wird der Modellschalter über LWL getriggert und der Zeitverzug für den Kurzschluss durch den Thyristor (INP) festgelegt. Der Strom kommutiert auf den Kurzschlusspfad und der Lichtbogen im Modellschalter verlöscht. Durch die optischen Zugänge des Modellschalters kann die Abkühlung des Plasmas/Gases im Schalter untersucht und Rückschlüsse auf die Wiederverfestigung der Schaltstrecke gezogen werden.

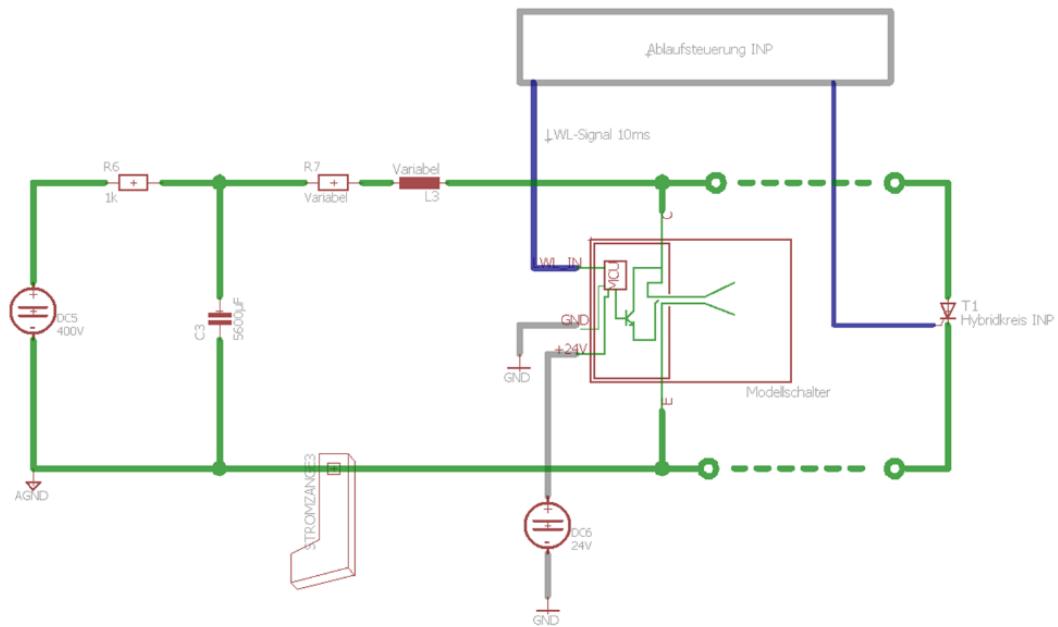


Abbildung 2.10: Versuchsaufbau – Modellschalter mit LWL Triggerung und Thyristor-Kurzschießer

Lichtbogenzündung im Modellschalter

Zur Zündung der Funkenstrecke wurden zwei Methoden untersucht und ein möglicher Versuchsaufbau hierzu entwickelt. Sowohl die Platine für die Zündeinrichtung als auch der Löschhilfe wurden entworfen, simuliert und aufgebaut (**AP 2.3.4** und **AP 2.3.5**). Zum einen wurde die Triggerung über ein LWL-Signal getestet (Abbildung 2.11), zum anderen wurde die Funkenstrecke durch einen 8/20- μ s-Impuls getriggert (Abbildung 2.12). In beiden Fällen lag eine Spannung von 400 V DC an der Funkenstrecke an. Für spätere Untersuchungen mit Impulsströmen, werden Modellschalter mit einer einfachen Triggerschaltung bereitgestellt. Auf eine kombinierte Belastung der Modellschalter mit Impuls- und Gleichstrom wird nach Absprache mit INP aufgrund der vorhandenen Möglichkeiten verzichtet. Die kombinierte Belastung soll nur bei Messungen bei DEHN durchgeführt werden.

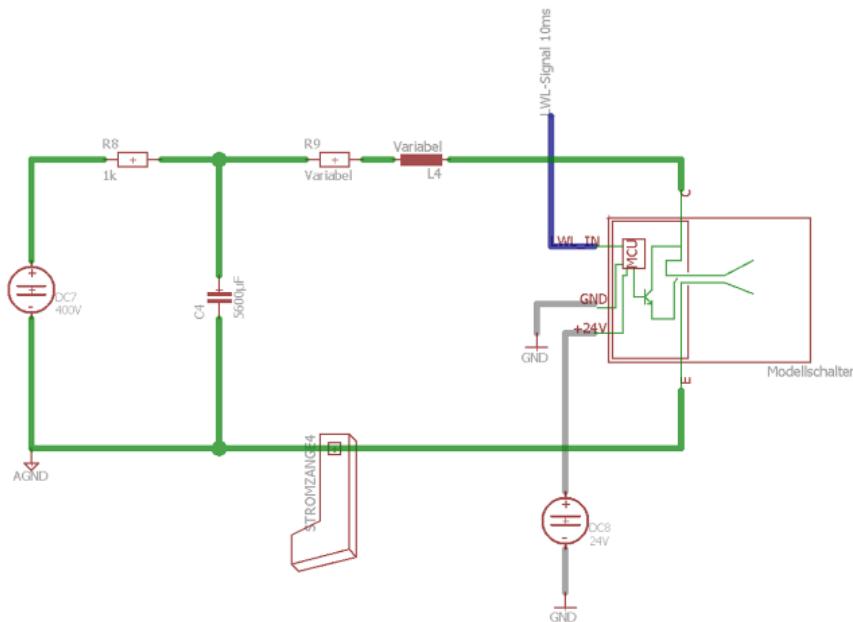


Abbildung 2.11: Versuchsaufbau - LWL-Signal

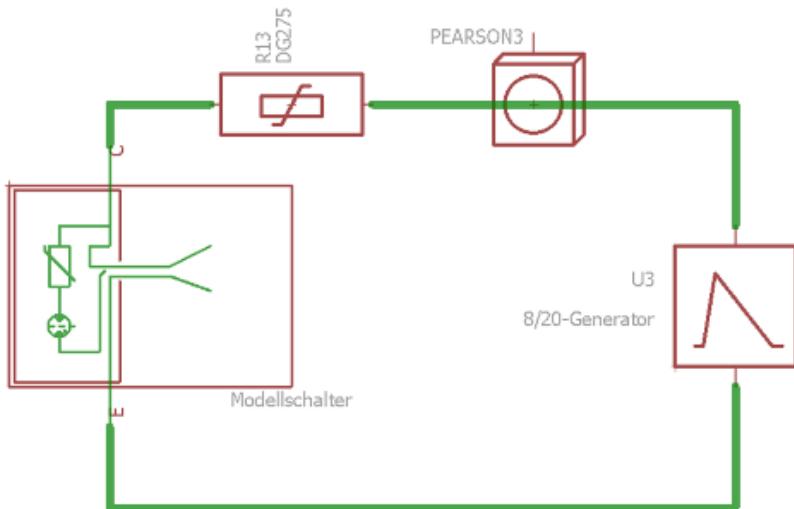


Abbildung 2.12: Versuchsaufbau zur Zündung des Modellschalters mit 8/20- μ s-Impuls (klassische Triggerung)

Im Anschluss an die Konzepterstellung und den Aufbau wurde der modulare Modellschalter in **AP 2.3.8** in ersten Versuchen in Kombination mit dem Hybridschalter getestet. Die Abbildung 2.13 und Abbildung 2.14 zeigen einen Zündvorgang an Modellschaltern bei 0,8 mm Abstand der Elektroden und 2,4 mm Abstand bei jeweils 400 V und einem Strom von ca. 80 A. Mit dem Abstand der Elektroden erhöht sich der Zündverzug der Funkenstrecke leicht. Ein stabiler Lichtbogen zwischen den Elektroden ist bei 400 V nach LWL-Signalgabe spätestens nach 100 μ s zu erwarten. Bei den Untersuchungen entsprechend den Abbildung 2.13 und Abbildung 2.14 wurde ein Hybridkreis zur Abschaltung des Lichtbogens in der Funkenstrecke genutzt. Der Hybridkreis schaltete den Lichtbogen nach ca. 100 μ s kurz und wurde nach weiteren 100 μ s selbst unterbrochen. Durch den Hybridkreis konnten die Belastung der Elektroden an den Modellschaltern zeitlich begrenzt werden, wodurch ein Test aller für INP bereitgestellten Schalter nahezu verschleißfrei möglich war. Der Hybridkreis soll im Weiteren für die Untersuchungen zu AP 3.3 ertüchtigt und weiterentwickelt werden.

Einzelbelastung Modellschalter

Elektrodenmaterial: Stahl
 Elektrodenabstand: 0,8 mm
 Fenstermaterial: Makrolon

Kanal 1: Gesamtspannung
 Kanal 2: Stromstärke

Erläuterung:
 4,7 μ s nach dem ersten Stromfluss zündete die Funkenstrecke.

Nach rund 100 μ s wurde die Funkenstrecke durch Kommutierung des Stroms in einen Hybridkreis gelöscht

Nach rund 200 μ s schaltete der Hybridkreis ab

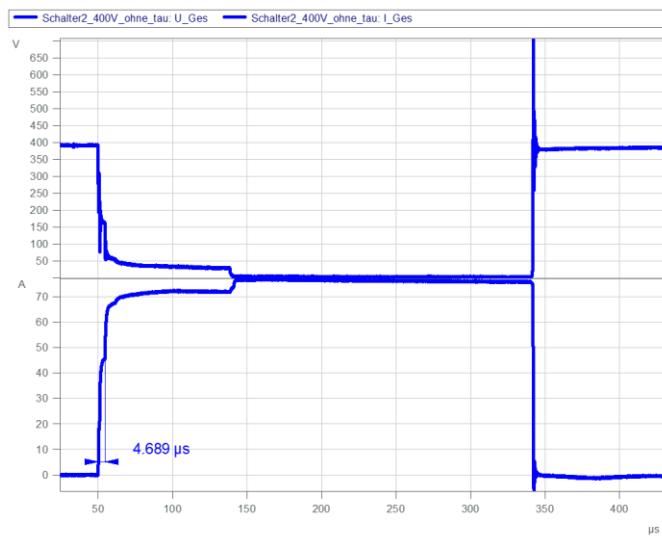


Abbildung 2.13: Zündung bei 400 V / 80 A Abstand 0,8 mm

Einzelbelastung Modellschalter

Elektrodenmaterial: Kupfer
 Elektrodenabstand: 2,4 mm
 Fenstermaterial: Quarz

Kanal 1: Gesamtspannung
 Kanal 2: Stromstärke

Erläuterung:
 23,5 μ s nach dem ersten Stromfluss zündete die Funkenstrecke.

Nach rund 100 μ s wurde die Funkenstrecke durch Kommutierung des Stroms in einen Hybridkreis gelöscht

Nach rund 200 μ s schaltete der Hybridkreis ab

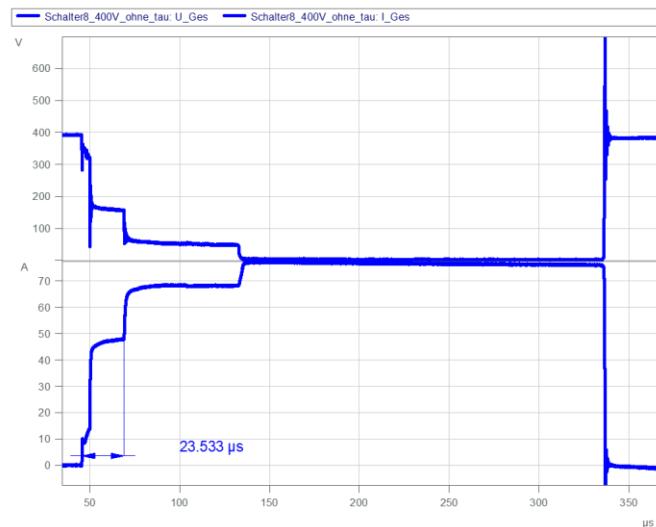


Abbildung 2.14: Zündung bei 400 V / 80 A Abstand 2,4 mm

Im Anschluss wurde der Modellschalter, der die erste Inbetriebnahme bestanden hat, in **AP 2.3.9** und **AP 2.3.10** in den entwickelten Versuchsaufbauten integriert und zusammen mit dem entwickelten Hybridschalter getestet. Außerdem sollte durch diese Messungen der optische Zugang bewertet werden.

Hierfür wurden Fenster aus Makrolon und Elektroden aus Kupfer verwendet. Der Elektrodenabstand betrug 0,8 mm. Die Anbindung an die Hybridelektronik geschah in diesem Fall induktionsarm über die Elektrodenanschlüsse (Abbildung 2.15).

Der zündende Lichtbogen wurde mit einer HG-Kamera aufgezeichnet. Die Abbildung 2.16 zeigt unmittelbar den Zündprozess. Nach der Zündung läuft der Lichtbogen zwischen die beiden Elektroden und verharrt bei den Versuchsbedingungen nach einigen Millimetern.

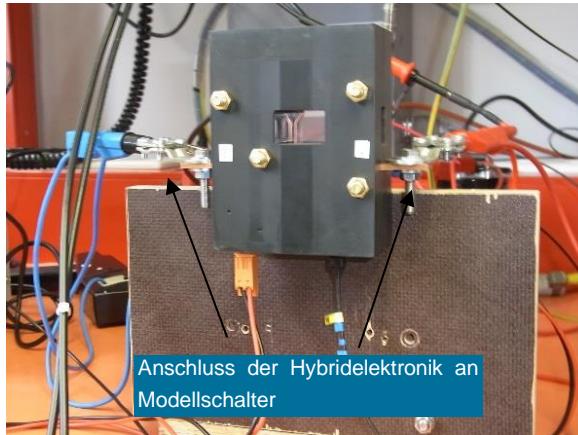


Abbildung 2.15: Versuchsaufbau mit Modellfunkenstrecke und angeschlossenen Hybridkreis

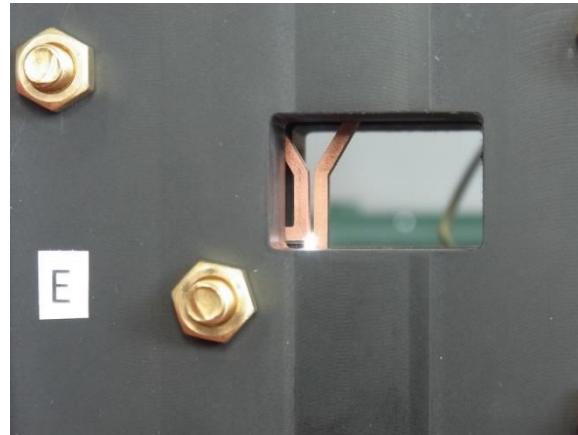


Abbildung 2.16: Lichtbogen in der Modellfunkenstrecke.

In Abbildung 2.17 sind der noch über Leitungen am Modellschalter angeschlossene Hilfshybridkreis, der Modellschalter und Teile des Versuchsaufbaus dargestellt. Der Hybridkreis umfasst ein MCU-Board und einen Drehcodierschalter zur Einstellung der Lichtbogenbrenndauer und lichtbogenfreien Zeit durch den Hybridkreis.

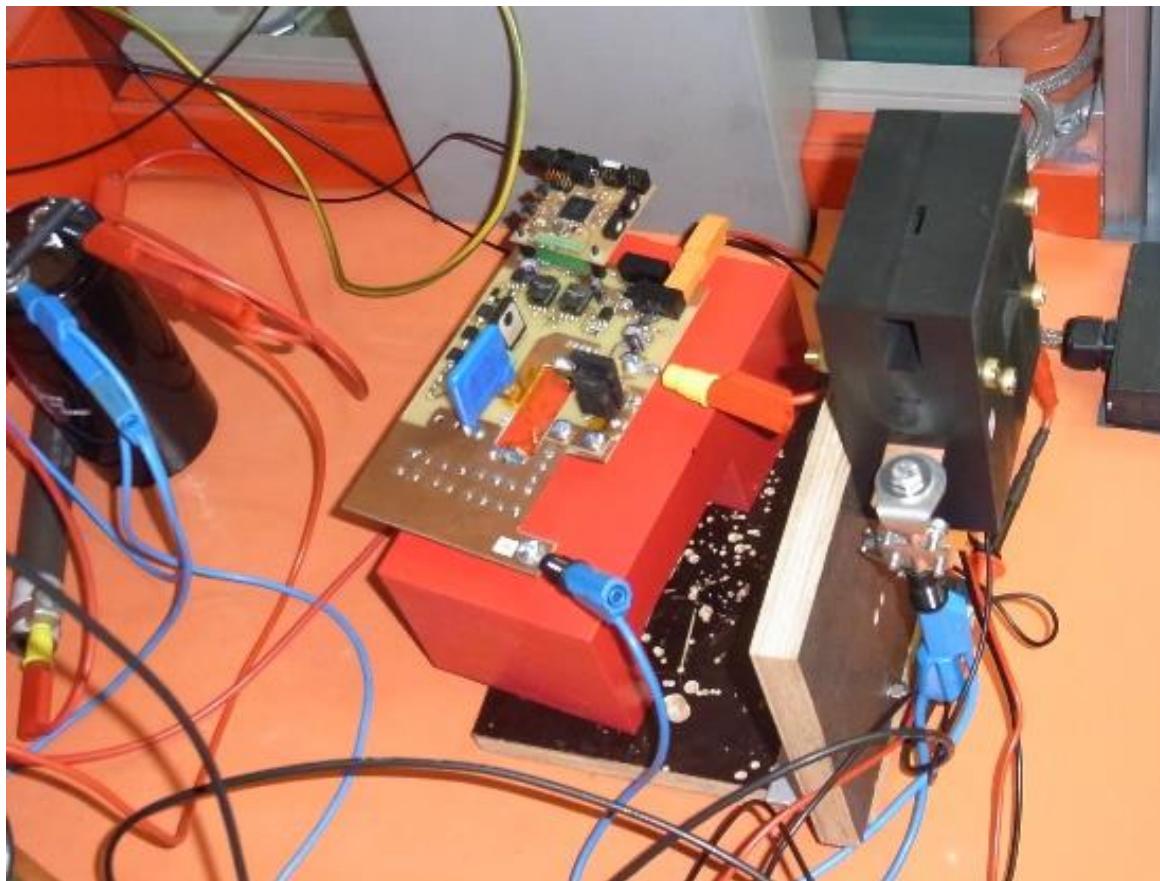


Abbildung 2.17: Modellschalter mit angeschlossenen Hybridkreis

Die Funktion des Hybridkreises mit dem Modellschalter wurde mit beiden Zündvarianten (LWL-Ansteuerung und Impulsstromzündung) getestet.

In der Abbildung 2.19 ist der Versuch mit LWL-Zündung (Ersatzschaltbild siehe Abbildung 2.18) und der Abschaltung eines Stromes von 150 A bei 400 V bei geringer „lichtbogenfreier“ Pause bzw. Erholzeit von $< 100\mu\text{s}$ dargestellt.

Die Abbildung 2.21 zeigt den Versuch bei Impulsstromzündung (Ersatzschaltbild siehe Abbildung 2.20) und eine erfolgreiche Abschaltung bei gleichem Strom (150 A, 400 V). Der Impulsstrom zur Zündung betrug ca. 600 A (Impulsform 8/20 μs).

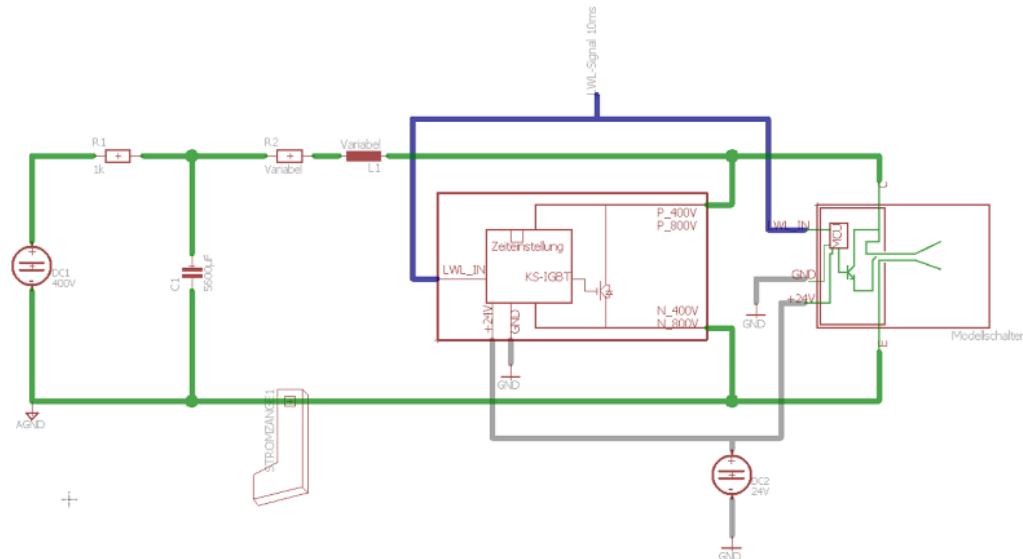
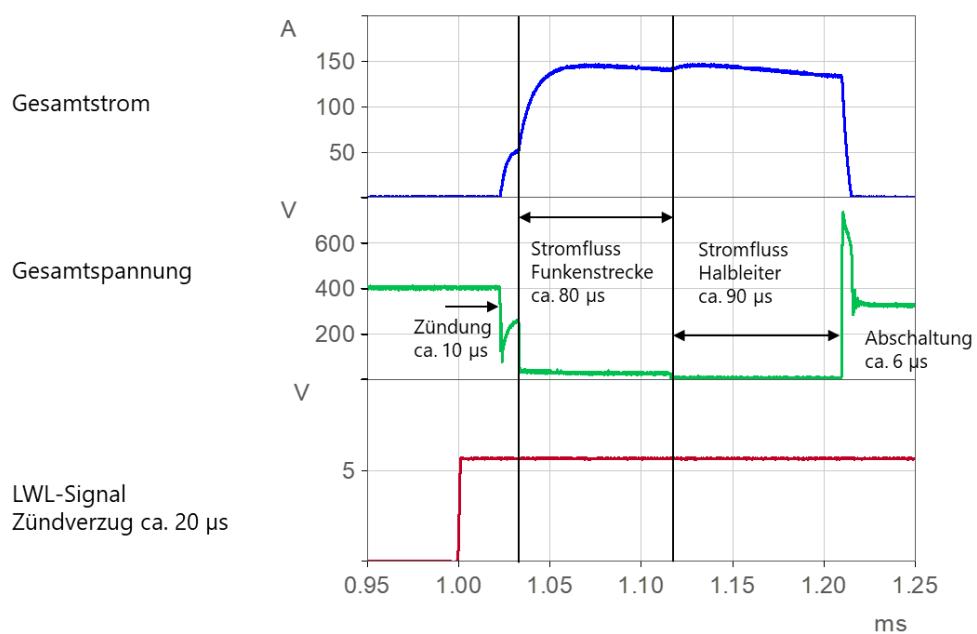


Abbildung 2.18: Versuchsaufbau zur Zündung des Modellschalters mit LWL-Signal und anschließendem Folgestrom (Modellschalter mit Hybridkreis)

Zündung ohne Impulsgenerator (LWL-Signal)



Zündung, Kommutierung und Abschaltung zeitgesteuert

Abbildung 2.19: Messverlauf bei LWL-Zündung des Modellschalters und Abschaltung durch Hybridkreis

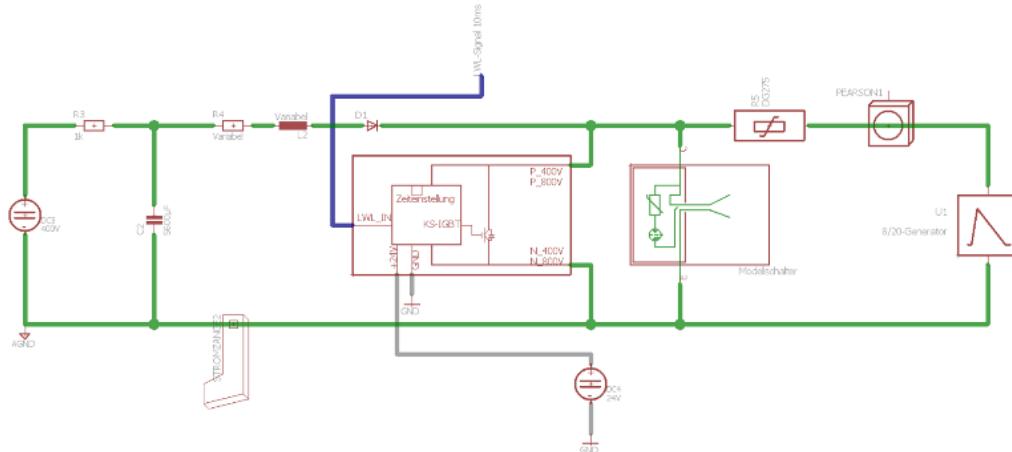
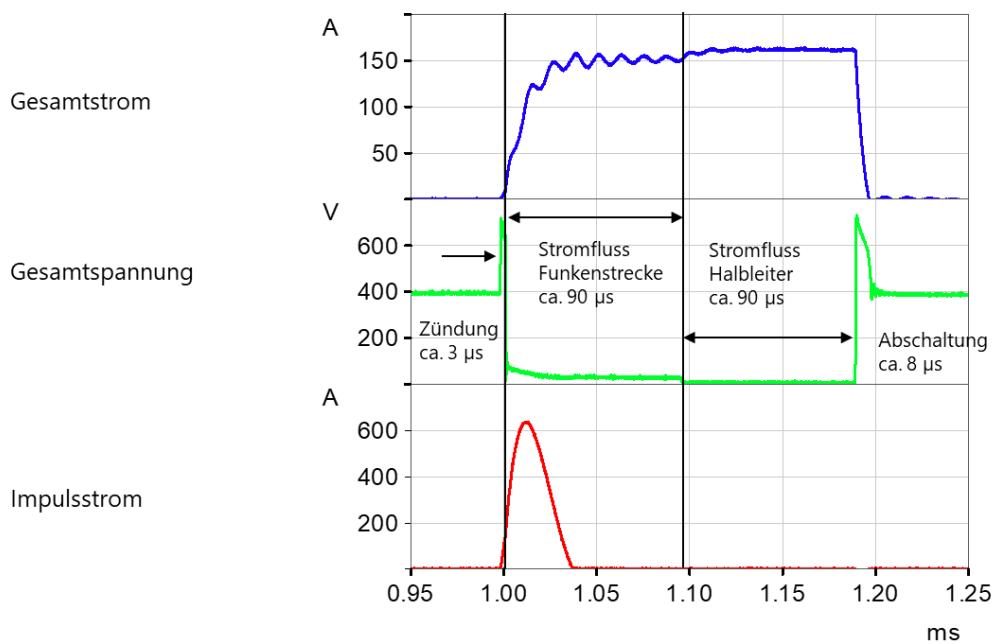


Abbildung 2.20: Versuchsaufbau zur Zündung des Modellschalters mit 8/20- μ s-Impuls und anschließendem Folgestrom (Modellschalter mit Hybridkreis)

Zündung mit Impulsgenerator



Zündung, Kommutierung und Abschaltung zeitgesteuert

Abbildung 2.21: Messverlauf bei 8/20μs-Zündung des Modellschalters und Abschaltung durch Hybridkreis

In beiden Versuchsaufbauten wird das Kommutierungs-IGBT-Modul nach der eingestellten Lichtbogenbrenndauer angesteuert und der Lichtbogen gelöscht. Nach der lichtbogenfreien Zeit sperrt das IGBT-Modul wieder. Parallel geschaltete Varistoren schützen den IGBT hierbei vor Überspannungen.

2.2.4 INP

Zielstellung des Arbeitspakets

Ausgehend von den elektrischen Zielgrößen zur Energieverteilung auf Gleichspannungs-Bussystemen mit Nennspannungen bis 850 V für Industrienetze war das Ziel des Arbeitspakets 2 (AP2) die Konstruktion einer Modellschaltkammer, die eine optische Untersuchung des Lichtbogenverhaltens, der Plasmarestgasverteilung und der Elektrodentemperatur unter praxisnahen Bedingungen ermöglichen sollte. Es wurde dabei ein modularer Aufbau angestrebt, welcher den Test unterschiedlicher Elektrodenformen und -materialien sowie ein Interface zum Testen von Funktionsmustern der Hybridelektronik ermöglichen sollte. Für das Teilvorhaben des INP waren zur Analyse des Lichtbogens, des Restplasmagases und des Wiederverfestigungs-verhaltens der Kontaktstrecke sowohl elektrischen Messungen als auch insbesondere die Zugänglichkeit für optische Erfassungssysteme (High-Speed Kameras, Spektrometer) von grundlegender Bedeutung.

Zuordnung zu den APs der anderen Projektpartner

Im Anbetracht der Unterschiede bei den vorhandenen Kontaktssystemen beider Industriepartner (E-T-A bzw. Dehn) wurde beim konzeptionellen Aufbau besonderes Augenmerk auf die Zugänglichkeit und Adaptierbarkeit der optischen Erfassungstechnik gelegt. Daraus entstanden zwei modulare Anordnungen, welche mit einem mechanischen Antrieb über einen Linearmotors bzw. mit durch Projektpartner fertiggestellte Prüflinge- und Zündvorrichtung bei fester Elektrodenstrecke die Lichtbögen-Zündung realisieren lassen. Für die Kommutierung des Strompfades wird die durch Projektpartner E-T-A entwickelte Steuerungselektronik mit Leistungshalbleitern eingebaut. Siehe hierzu die jeweiligen Teilberichte.

In den folgenden Abschnitten wird über die Unterarbeitspakete AP 2.1.1 bis 2.1.4 berichtet.

Parameterbereich und Anforderungen an die Modellschaltkammer:

Um den für die spektroskopische Analyse von Lichtbogen, Restplasmagas und Kontaktobерflächen notwendigen optischen Zugang zu gewährleisten, wurde am INP eine speziell für diese Zwecke ausgelegter Modellschalter aufgebaut.

Die Anforderungen für die Entwicklung des Modellschalters beruhen auf in der Vorhabenbeschreibung sowie beim ersten Projekttreffen vereinbarten Richtgrößen mit einer Nennspannung von ca. 850 VDC (Doppelkontakteinsystem) sowie einem Nennstrom von 300 A. Weiterhin wurden folgende Richtgrößen definiert:

- Elektrodenstrecke bzw. realisierbare Elektrodenabstände: 1, 2 und 3 mm

- Kontaktkraft = 7.5 N
- Öffnungsgeschwindigkeit in Größenordnung des aktuellen Relais bzw. ca. 1m/s.
- Für Schaltgeräte mit festem Elektrodenabstände wurden 0,8, 1,6 und 3,2 mm definiert.

Darüber hinaus sollte der Modellschalter die sonstigen mechanischen Funktionen eines realen Schalters in allen relevanten Einzelheiten möglichst getreu nachbilden. Es sollte außerdem den modularen Austausch von Elektroden unterschiedlicher Materialien und Formen sowie die Ankopplung von Mustern der Hybridelektronik ermöglichen.

Materialien und Geometrie:

Entsprechend der durch den Projektpartner vordefinierten Materialien und Geometrien kamen für den Modellschalter eine Doppel- bzw. Einfachkontakteunterbrechung mit linearer Bewegung bzw. einem festen Elektrodenabstand und Lichtbogenzündung mit Hilfselektronik in Frage. Als Materialien für die elektrischen Kontaktstücke wurden Ag/SnOx (E-T-A) bzw. Kupfer, Wolfram/Kupfer sowie Eisen (Dehn) definiert.

Belastungsgrößen und Konzeptionelle Messtechnik:

Entsprechend der Projektausrichtung auf industrielle DC-Netze bis 850 V wurden in Abstimmung mit den Projektpartnern folgende Belastungsgrößen sowie notwendige Messtechnik definiert.

- Spannung bis 850 VDC für Doppelkontakte bzw. 425 V DC für Einzelkontakte
- Nennstrom 300 A
- Maximalstrom 1.2 kA
- Zeitkonstante des Stromkreises: 1 ms (max. 5 ms)
- Öffnungsgeschwindigkeit: ca. 1 m/s
- Kontaktstücke: AgSnOx-Kontaktniete mit 5 mm Kontaktflächendurchmesser. Der Modellschalter sollte jedoch die Verwendung weitere Kontaktstückarten ermöglichen.
- Kommutierungszeit (nach vorläufige Messungen, bezeichnend auch für die Lichtbogendauer) ca. 20 μ s
- Spannungsmessung: kommerziell erhaltende Spannungstastköpfe bzw. differentielle-Spannungstastköpfe mit einer Festigkeit bis 5 kV (10 kV).
- Durch den Projektpartner PTB wird darüber hinaus zur Spannungsmessung eine spezielle Messsonde entwickelt und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt (siehe Teilbericht AP6).
- Strommessung: Entsprechend der notwendigen Kommutierungspfade (Abbildung 2.34) werden hierbei unterschiedliche Anforderungen für die Strommessung erforderlich (Tabelle 2.8):

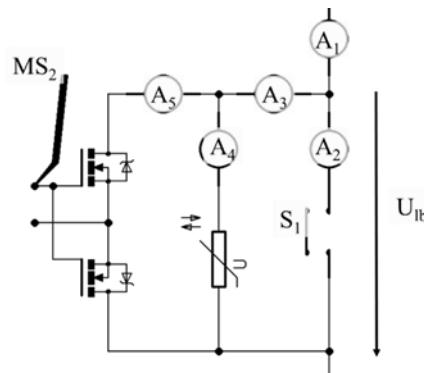


Abbildung 2.22: Schematische Darstellung der Hybridschaltertopologie und resultierende Strompfade (Quelle E-T-A)

Optische und spektroskopische Erfassungstechnik: Die hierzu notwendige Technik soll insbesondere den Kommutierungszeitpunkt optisch/spektroskopisch erfassen. Die dabei zu erwartenden Herausforderungen liegen in der sehr kurzen Bogenphasen (einige 10 µs bis einige 100µs) sowie in der in dieser Phase erfolgenden geringen Kontaktöffnung (< einige 10 µm bis einige 100 µm) bei den angestrebten Öffnungsgeschwindigkeiten in diesem Zeitraum (1 m/s). Daraus wurden insbesondere eine spezielle Präparierung der Kontaktstücke zur Umgehung der geringen Tiefenschärfe und die Verwendung mehrere Geräte und Techniken erforderlich. Siehe hierzu Kapitel III.6.

Tabelle 2.3: Zu messende Ströme und Anforderungen an die Messtechnik.

Strom	Amplitude/ Zeit	Mögliche Erfassungssonde	Notwendige Bandbreite
Gesamtstrom: A1	300 A (max. 1.2kA) / ms ... s	Hall-Sensor; Shunt; Stromwandler	kHz
Kontaktstrom: A2	0 ... 300 A / µs ... ms ... s	Zu erfassender Bereich umfasst mehrere Größenordnungen. Unterschiedliche Messsonden müssen hierbei verwendet werden.	MHz
Abzweigstrom: A3	300 A (max. 1.2kA) / ms ... s	Hall-Sensor; Shunt; Stromwandler	kHz
Varistor-Strom: A4	300 A (max. 1.2kA) / ms ... s	Hall-Sensor; Shunt; Stromwandler	kHz
IGBT-Strom: A5	300 A (max. 1.2kA) / ms ... s	Hall-Sensor; Shunt; Stromwandler	kHz

Steuerungstechnisches System, Anbindungs möglichkeiten und sicherheitsrelevante Aspekte:

Für die zeitliche Ansteuerungsfolge der unterschiedlichen zusammenwirkenden Geräte und Instrumente werden Signalgeneratoren sowie übergeordnete Ablaufsteuerungen auf Micro-Controller-Basis verwendet.

Der aufgebaute Schalter soll die entsprechenden Sicherheitsvorrichtungen (Personenschutz) aufweisen sowie in den übergeordneten Not-Aus-Kreis der Labore anschließbar sein.

AP 2.2 Modellschaltkammer (INP)

Im folgenden Abschnitt wird über die Unterarbeitspakete AP 2.2.1 bis AP 2.2.9 berichtet.

Konzeption einer modulareren Konstruktion:

Grundsatz für die Konstruktion der Modellschaltkammer war eine möglichst große Anlehnung an den realen Geräten der Projektpartner, damit sowohl die Ergebnisse denen vom realen Schalter entsprechen als auch eine möglichst schnelle Überführung in die Geräteentwicklung gewährleistet werden kann. Dementsprechend lag das Hauptaugenmerk der Konstruktion auf die Nutzung des aktuellen Kontaktsystems sowie seine Geometrie.

Da die eigenen Geräte der Projektpartner 2 verschiedene Philosophien zur Schaltlichtbogenbildung verfolgen und umsetzen, gab es demzufolge 2 mögliche Geometrien: Bewegliche Kontakte und Lichtbogenzündung bei der Kontakt trennung einerseits bzw. feste Kontaktschienensystem und Lichtbogenzündung durch vorhergehenden Hochspannungs-durchschlag andererseits.

Die Konstruktion besteht aus drei unterschiedlichen Modulen (Siehe nächste Abbildung), welche entsprechend angepasst bzw. umgetauscht werden können.

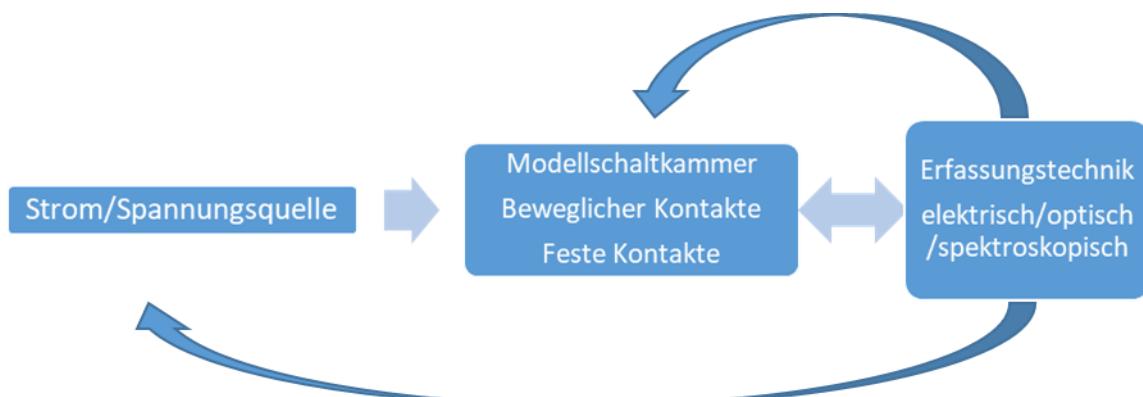


Abbildung 2.23:

Definition Messtechnik und sensitiven Bereich der optischen Erfassungstechnik:

Auslegung, Entwurf und Modelbildung CAD + elektrischen Stromkreis:

Ausgangsbasis für die Definition der Kontaktgeometrie war die aktuelle Geometrie des HVR-Relais vom Projektpartner E-T-A (Abbildung 2.36, Abbildung 2.37).

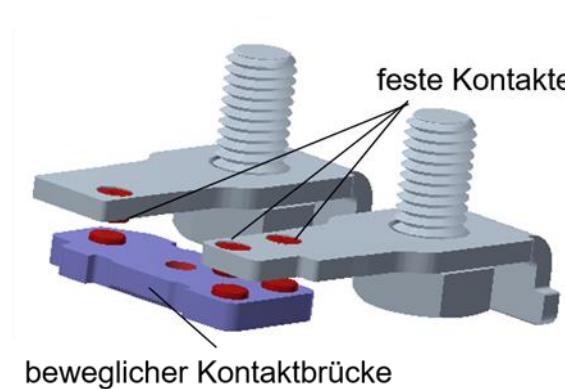


Abbildung 2.24: CAD-Darstellung der Kontaktgeometrie eines HVR-Relais

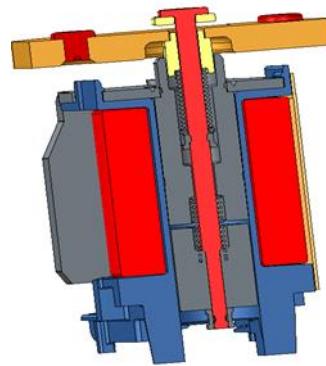


Abbildung 2.25: CAD-Schnittdarstellung des beweglichen Kontaktsystems eines HVR-Relais

Darüber hinaus wurden die sonstigen Komponenten des HVR-Relais bezüglich Geometrie, Abmaßen, Gewicht sowie Materialien als Ausgangsinformation vorgenommen. Ein CAD-Schnittdarstellung ist im Abbildung 2.37 dargestellt. Die gesamte bewegliche Masse wurde auf ca. 50 g beziffert und bei der Auslegung der beweglichen Teile vom Modellschalter einschließlich des ausgewählten Antriebes verwendet.

Zunächst entstand eine erste Alternative für den Modellschalter, welche viele Teile des aktuellen Relais verwendet (Abbildung 2.38).

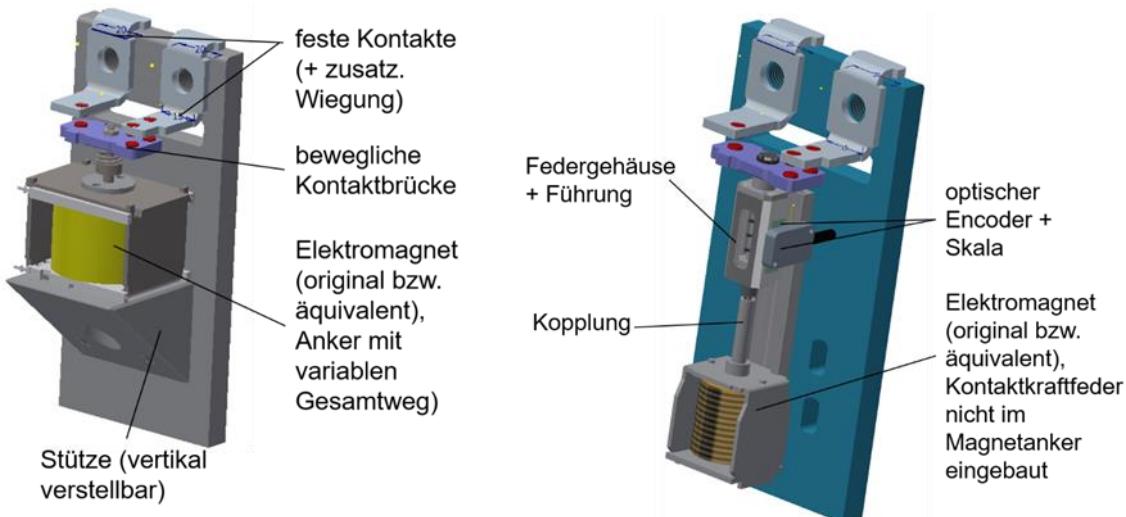


Abbildung 2.26: CAD-Darstellung einer ersten Alternative für den Modellschalter des INP

Abbildung 2.27: CAD-Darstellung der überarbeiteten Variante

Nachteile dieses Aufbaus bestanden darin, dass abgesehen vom verbesserten optischen Zugang keine Möglichkeiten bestehen zur Justierung und dem Austausch von Kontakten, Öffnungsstrecke, Geschwindigkeit oder Weg-Zeit-Erfassung. Daher wurde eine verbesserte Alternative entworfen (Abbildung 2.39). Hierbei war die Entkopplung zwischen Antrieb und Kontaktssystem möglich. Weitere Vorteile der überarbeitete Variante waren:

- Kontaktkraft / Feder, einfacher einstellbar bzw. austauschbar
- Federgehäuse + Führung aus Hochleistungskunststoff
- Geführter Bewegungsablauf
- Erfassung der Kontaktbewegung
- Verwendung der aktuellen Kontaktbrücke ohne zusätzliche Modifikationen
- Umstellung auf einzelnen Kontakt ohne starken Umbau
- unabhängig von der Antriebsart

Für den Modellschalter mit beweglichen Kontakten bildet das Abbildung 2.39 die grundlegende Basis, auf der schrittweise weitergearbeitet wurde.

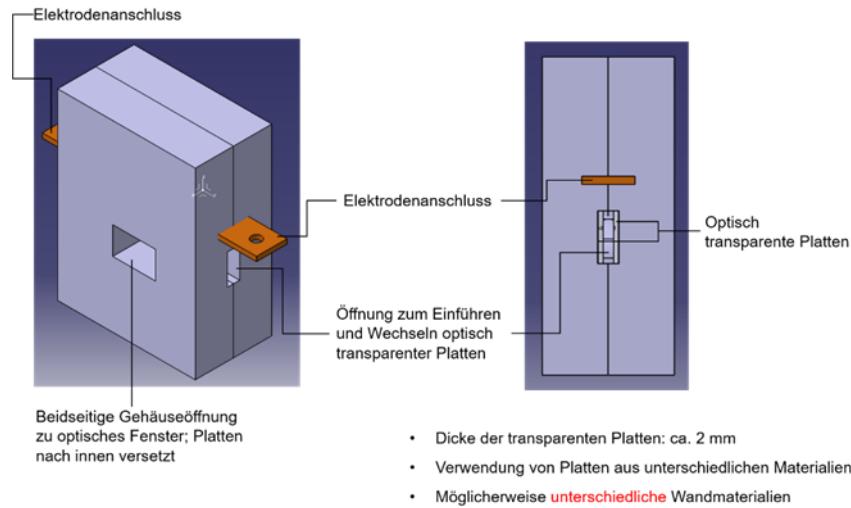


Abbildung 2.28: CAD Darstellung der Modellschaltkammer mit festen Kontakten

Die Modellschaltkammer mit festen Kontakten (Abbildung 2.40) hat gegenüber den Modellschaltern mit beweglichen Kontakten große Vorteile. Nach Fertigstellung verschiedener Muster durch den Projektpartner Dehn wurde eine spezielle Stromquelle unter Anleitung von Dehn gebaut und für experimentelle Untersuchungen im Betrieb genommen.

Im Folgenden wird weiterhin detailliert über den Modellschalter mit beweglichen Kontakten berichtet, der am INP gebaut wurde.

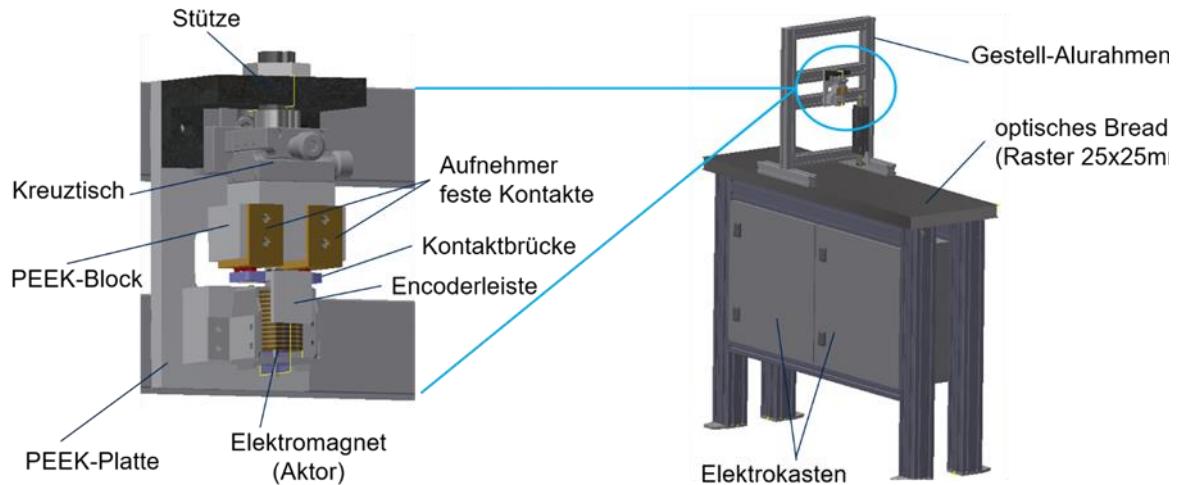


Abbildung 2.29: -Darstellung des zunächst umgesetzten Modellschalters entsprechend Abbildung 4.

Im Abbildung 2.41 wird die fertig aufgebaute Variante dargestellt. Abbildung 2.42 zeigt darüber hinaus den ersten Schritt in der Überarbeitung nach Abbildung 2.39

unter Verwendung eines Linearmotors zur Verrichtung der Öffnung und Schließung der Kontaktstrecke.

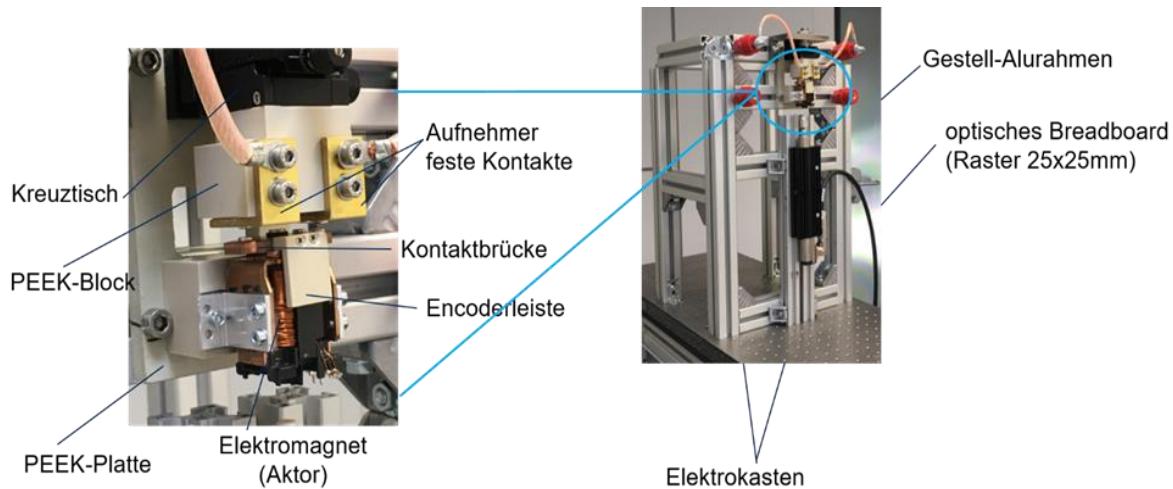


Abbildung 2.30: Foto des überarbeiteten Modellschalters

Abbildung 2.43 zeigt die überarbeitete Aufbaustufe des Modellschalters. Hierbei wurde der Elektromagnet durch den Linearmotor sowie das Doppelkontaktsystem durch eine einfache Unterbrechung ersetzt. Darüber hinaus wurde die gesamte Steuerungstechnik in Elektroschränken im Tischgestell untergebracht. Sowohl das Kontaktssystem als auch der Antrieb wurden in einem separaten Gestell verbaut, das in senkrechter sowie waagerechter Position fixiert werden kann. Dieses Gestell wird auf einem optischen Tisch (Breadboard) platziert, welches die Fixierung optischer Elemente sowie Kameras ermöglicht. Durch die ausgewählte Konstruktion mit separaten Kontaktssystemen wurde einer Rundumsicht vom Kontaktstückraum gewährleistet.

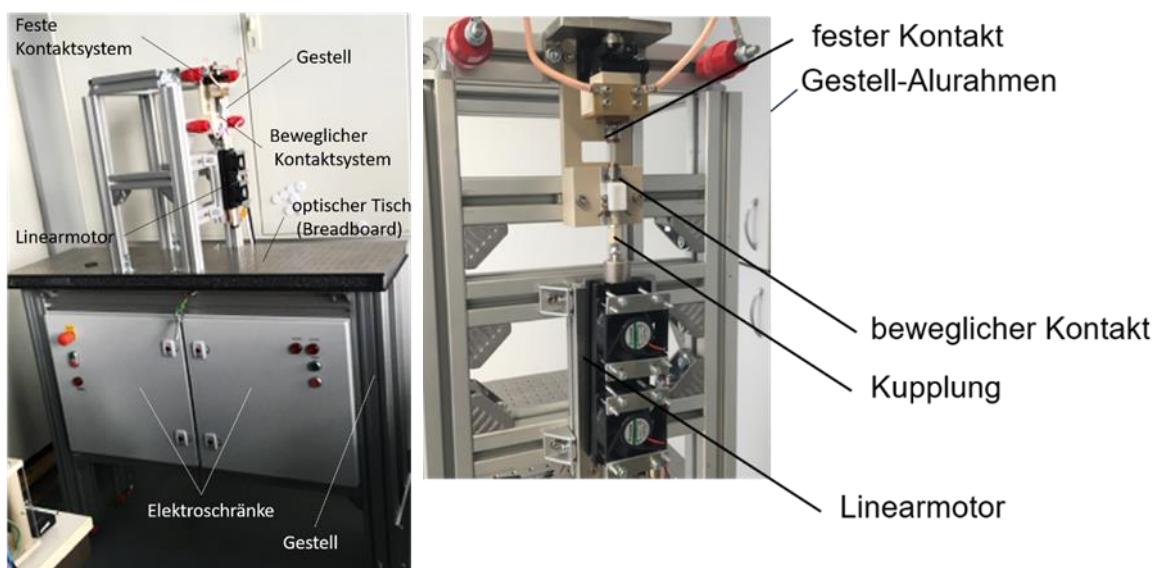


Abbildung 2.31: Links, Aufnahme vom gesamten Modellschalter inklusive Gestell und Elektroschränken für die Ansteuerungselektronik. Rechts, Details des Kontaktsystems und Linearmotor-Antriebs

Zur Realisierung der Kontaktbewegung wurden zunächst eine Reihe potentiell infrage kommender Antriebssysteme bewertet. Darunter fielen sowohl direkte Antriebe wie Linearmotoren, Voice-Coil-Motoren, Piezoelektrischer Antrieb, Druckluftzylinder als auch indirekte Antriebe wie Spindeln. Diese wurden evaluiert und nach den jeweiligen Vor- und Nachteile kategorisiert. Die Kategorisierung wurde entsprechend Abbildung 2.44 durchgeführt [1].

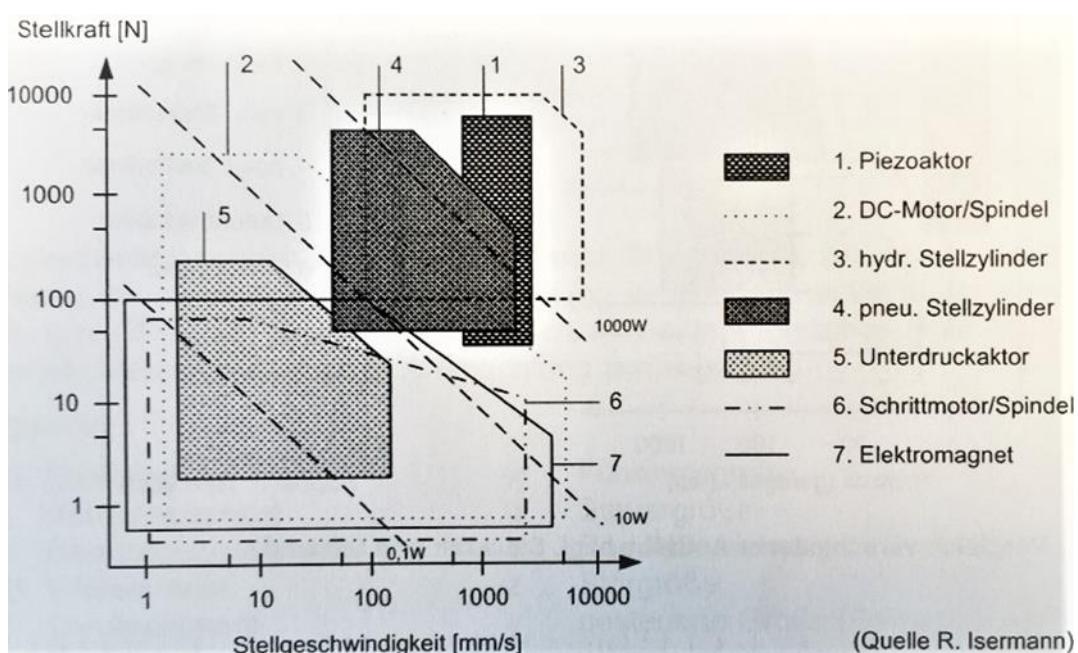


Abbildung 2.32: Vergleich verschiedene Antriebssysteme bezüglich Stellkraft und Geschwindigkeit [19]

Aus Abbildung 2.44 ist ersichtlich, dass für die Verrichtung der Kontaktbewegung mit Geschwindigkeiten um die 1m/s (1000 mm/s) und Kräfte um die 100 N im Prinzip nur Piezoaktoren, DC-Linearmotoren, sowie pneumatische Zylinder in Frage kommen. Da Piezoaktoren aufgrund der relativ kurzen Stellwege nicht die gewünschte Flexibilität ermöglichen, kamen vorwiegend Linearmotoren sowie pneumatische Zylinder in die weitere Auswahl. Entsprechend der Anforderungen (Ziel: 3 mm Hub in <1 ms, d.h. >3 m/s) wurden folgende Antriebsarten ausgewählt:

- Linearmotor Model: LinMot 01-23 HP mit maximaler Beschleunigung $a_{max} = 600 \text{ m/s}^2$ bei 50 g Last (payload) und einer maximalen Geschwindigkeit von $v_{max} = 1 \text{ m/s}$
- Pneumatischer Antrieb kurzer Hub: $a_{max} = 2800 \text{ m/s}^2$ (50 g payload), $v_{max} = \text{ca. } 2 \text{ m/s}$
- Thomson Coil: Richtwert ca. 1 N / 1 A: für 5 m/s erforderlich ca. $a_{max} = 8300 \text{ m/s}^2$ (100 g payload), $F \geq 500 \text{ N}$

Durch die einfachere Integrierbarkeit sowie Steuerungsmöglichkeiten wurde zunächst der Linearmotor samt notwendiger Kontroll- und Versorgungseinheiten ausgewählt und beschafft. In einer weiteren Projektstufe wäre es möglich einen pneumatischen Zylinder bzw. eine Thomson Coil als Antrieb zu verwenden, ohne große strukturelle Änderungen im Modellschalter realisieren zu müssen.

Bezüglich der technischen Erfassung des Lichtbogens insbesondere während der Stromabklingphase sowie nach Strom-Null (Post-Arc) wurden aufgrund der zu erwartenden nachfolgenden lichtschwachen Kommutierungslichtbögen eine Erweiterung der Mess- und Erfassungstechnik notwendig.

Anpassung vorhandene optischen Systeme zur Diagnostik des zu erwartendem Plasma / heißem Gas:

In Vorbereitung auf die experimentellen Messreihen wurden folgende optische Geräte und Verfahren in Erwägung gezogen:

- Kameraaufnahmen:
 - Hochgeschwindigkeits-Videokameras (bis 100 kfps) bzw. intensivierte CCD/ Framingkamera
 - Kombination von Hochgeschwindigkeitskameras mit einer spektralen Filterung zur Bestimmung räumlicher Verteilungen einzelner Spezies
 - Abbildung mit 1:1 Objektiven (ca. 10-fache Vergrößerung, Ortsauflösung)
- Für die Optische Emissionsspektroskopie (OES) werden Übersichtsspektren ohne zeitliche und räumliche Auflösung mit Kompaktspektrometer realisiert (Einkopplung in Glasfaser, 300-1000 nm, bei Bedarf Erweiterung im NIR-Bereich bis 1.6 µm oder 2.4 µm). Für ortsaufgelöste Spektroskopie werden 0.5 m- bzw. 0.75 m-Spektrographen und Kamera, wahlweise mit Videokamera (arbiträre Entladungen) oder mit intensivierter Kamera für Einzelspektren mit hoher Empfindlichkeit und sehr kurzer Belichtungszeit.
- Unter Umständen ist die Verwendung Optischer Absorptionsspektroskopie (OAS) notwendig, um schwach oder nicht emittierenden Spezies, insbesondere um und nach Stromnull ermitteln zu können. Hierbei wird als Hintergrundbeleuchtung eine intensive Breitbandlichtquelle z.B. Xe-Blitzlampe dienen.

2.2.4.1 Zusammenfassung

Dieser Berichtteil fasst die verschiedenen Schritte zusammen, die für die Konzeption, Konstruktion und Fertigstellung des Modellschalters von INP und z.T. der Modellschaltkammer von Partner Dehn unternommen wurden. Diese ordnen

sich entsprechend den im Gesamtantrag sowie Teilverhabenbeschreibung unter AP2 Teilaufgaben vorgesehen wurden.

Insgesamt wurden am INP für 2 verschiedene Varianten für das Kontaktssystem (doppelte sowie einzelne Unterbrechung). Im experimentellen Teil des Projekts AP3 wurden am INP der Modellschalter mit einzelne Unterbrechung sowie die Modeschaltkammer der Funkenstrecke von Partner Dehn eingesetzt.

Der Modellschalter mit beweglichen Kontakten ermöglicht die in realen Schaltgeräten erfolgende Prozesse für das hybride Schalten in gute Näherung zu verrichten. Hierbei sind Unterschiede aufgrund der räumlich bedingte geometrische Gegebenheiten für das Modell (räumliche und optische Zugänglichkeit) unvermeidbar. Im Allgemeinen erlaubt jedoch der Modellschalter identische physikalische Phänomene im Labor nachzubilden, do dass sich diese für die geplanten Untersuchungen gut geeignet hat.

2.3 AP 3 - Charakterisierung des Lichtbogens, des Restplasmagases und der Wiederverfestigung

2.3.1 E-T-A

E-T-A stellt die experimentellen Ergebnisse des Demonstrators zur Verfügung stellen, um in **AP. 3.3.2** das in Abhängigkeit von Stromamplitude, Zeit und Material festgestellte Wiederverfestigungsverhalten der Elektrodenstrecke und die entsprechenden strom- und zeitabhängige Kennfelder für die Schaltzeitpunkte der Hybridelektronik zu verifizieren.

2.3.2 DEHN

Validierung der Messergebnisse anhand gezielter Experimente und Prüfung der gemessenen Eigenschaften auf Verallgemeinerung

Im AP 3.2 wurden am INP anhand der unter AP 2.3 erstellten Musterschalter optische Untersuchungen zur Erfassung von bezüglich der Wiederverfestigung relevanter Emissionen und Absorptionen durchgeführt. Hierbei wurde insbesondere auf die Erfassung der Plasmaeigenschaften, der Zusammensetzung und der Temperaturentwicklung vor und nach Stromnull Wert gelegt.

Für die Untersuchungen nach Stromnull wurde hierbei ein Kommutierungskreis mit einem leistungsfähigen Thyristor aufgebaut, wodurch eine reproduzierbare schnelle Kommutierung bei niedriger Restspannung ermöglicht werden könnte.

Bei den Untersuchungen konnten an den Modellschaltern mit feststehenden Elektroden insbesondere Kupferlinien ermittelt werden, welche auch nach Stromnull einen Rückschluss auf die abklingende Plasmatemperatur gestatten.

Für die weiteren Untersuchungen bezüglich der Nutzung dieser Linien bei höheren Belastungen wurde für die Untersuchungen im Prüflabor bei DEHN ein Aufbau erstellt, welcher in effizienter Weise in gemeinsamen Messungen mit INP einen nahezu analogen Aufbau bei zahlreichen Mustern und Belastungsvariationen ermöglicht.

Neben der ursprünglich geplanten Integration eines leistungsfähigen IGBT's für die Versuche wurde daher auch die Integration eines Thyristors und dessen Ansteuerung durch die Ablaufsteuerung zusätzlich vorgesehen, so dass für die optischen Untersuchungen von INP die Kommutierung in analoger Weise durchgeführt werden konnte. Zum besseren Vergleich der Untersuchungen beim INP in Greifswald und bei DEHN wurden im Versuchsprogramm bei DEHN auch

leistungsärmere Belastungen analog zu den Messungen beim INP für Vergleichszwecke durchgeführt.

Diese Messungen sollten zeigen, inwieweit die Ergebnisse eine hinreichende Aussagekraft haben, welche eine Verallgemeinerung erlauben.

Konzeptionserstellung, Aufbau und Inbetriebnahme einer Versuchsanordnung

Es soll ein Versuchsaufbau erstellt werden, der einen DC-Folgestrom von 1 kA bei einer Zeitkonstante von 1 ms mittels Hybridkreis abschalten kann. Neben der Zündung des Lichtbogens im Modellschalter ohne Impulsstrom soll auch eine Impulszündung mit einem 8/20-Impuls möglich sein (3 kA). Hierfür wurde in AP 3.3.3 ein Konzept für eine elektrische Versuchsanordnung erstellt. Dabei wurden zwei Untersuchungsmöglichkeiten in Betracht gezogen. In einer ersten Möglichkeit soll der Modellschalter mit einem Thyristor kurzgeschlossen werden und im Anschluss der Strom durch den Thyristor mit einem vorgesetzten IGBT-Schalter abgeschaltet werden. Durch diese Möglichkeit soll eine Untersuchung des Restplasmagases ohne eine Spannungsüberhöhung an der Schaltstrecke möglich sein. In der zweiten Möglichkeit wird der Hybridkreis bestehend aus Modellschalter und parallelem IGBT-Schalter untersucht, sodass die Wiederzündspannung durch Abschalten des IGBT-Schalters und anschließender Spannungsüberhöhung an der Schaltstrecke untersucht werden kann. Bei beiden Aufbauten soll der restliche Aufbau identisch sein. Dieser besteht aus einem Folgestrom-Kreis und einem optionalen Kreis, der die Möglichkeit der Impulszündung des Modellschalters ermöglicht. Das elektrische Schaltbild des Versuchsaufbaus ist in Abbildung 2.33 zu sehen.

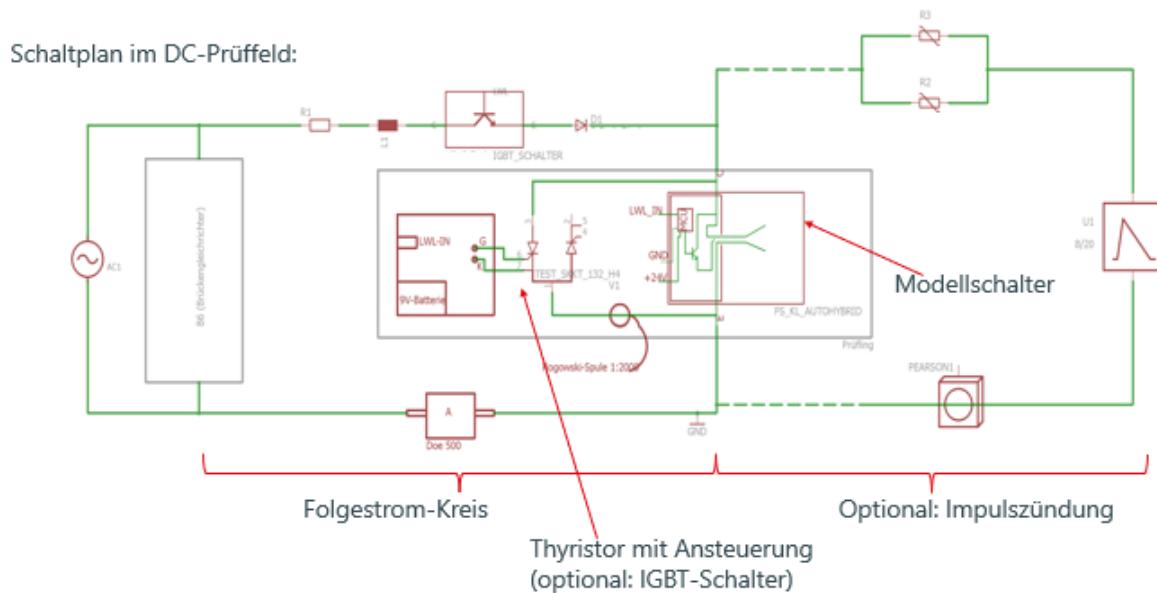


Abbildung 2.33: Schaltplan des Versuchsaufbaus

Für den zuvor beschriebenen Versuchsaufbau mussten in AP 3.3.4 verschiedene Bauteile gefertigt bzw. angeschafft werden. Diese waren neben dem Modellschalter aus AP 2.3, ein leistungsstarker IGBT-Schalter, der zusammen mit dem Modellschalter einen Hybridschalter zum Abschalten eines Stroms in der Schaltstrecke des Modellschalters bildet, sowie ein Thyristor-Schalter mit niedrigem Bahnwiderstand zum spannungsfreien Abschalten des Modellschalters, um den Versuchsbedingungen für die bisherigen optischen Untersuchungen beim INP weitestgehend zu entsprechen. Außerdem musste Messtechnik in den Versuchsaufbau integriert werden. Neben der üblichen Messtechnik zum Messen der großen Impuls- und Folgeströme lag hierbei das Augenmerk besonders auf der näherungsweisen Abschätzung von Stromnull im Modellschalter, also dem Messen von Strömen im mA-Bereich bei vorangegangenen Folgestrom-Belastungen von bis zu 1 kA.

Zum Thyristor-Schalter:

Als Thyristor wurde das Modul SKKT 132 H4 verwendet. Dieses ist über eine einfache Ansteuermimik mittels eines Lichtwellensignals in die Ablaufsteuerung integrierbar. Ergänzt wurde das Thyristor-Modul durch einen parallelen Überspannungsschutz zum Begrenzen von Überspannungen, die beim Zünden des Modellschalters entstehen können, und zum Dämpfen der Spannungsanstiegsgeschwindigkeit dU/dt vor dem Zünden des Modellschalters.

Zum IGBT-Schalter:

Als IGBT wurde das Modul FF600R12KE4P verwendet. Dieses wird vor Überspannungen beim eigenen Abschalten des Stroms durch parallele Varistoren geschützt (siehe AP 4.3). Dabei kommen je nach Stromhöhe bis zu drei parallele Varistoren zum Einsatz. Der IGBT-Schalter ist ebenso über ein Lichtwellensignal ansteuerbar. Bei dem Schalter ist die Zeit, bis der Schalter einschalten soll (Lichtbogenbrenndauer im Modellschalter), und die Zeit, die der IGBT-Schalter eingeschaltet bleiben soll (lichtbogenfreie Zeit im Modellschalter), separat über die erstellte Ablaufsteuerung und eine zusätzliche Regelung auf der Steuerplatine des IGBT-Schalters leicht ein- und umstellbar. Im Anschluss an die eingestellte lichtbogenfreie Zeit schaltet der IGBT-Schalter ab und die entstehende Überspannung wird, wenn der Modellschalter wieder spannungsfest ist, vollständig über die parallelen Varistoren abgebaut. Alternativ kann es zum Wiederzünden des Modellschalters kommen.

Bei den Untersuchungen zum Wiederzünden kann mit Hilfe der Ablaufsteuerung ein weiterer IGBT im Längszweig des Hauptkreises angesteuert werden, welcher die erneute Lichtbogenstromdauer im Falle des Wiederzündens im Modellschalter begrenzt.

Zur Messtechnik:

Anspruchsvoll war die Feststellung von „Stromnull“ im Modellschalter aufgrund der Tatsache, dass zuvor ein Strom von bis zu 1 kA durch diesen fliest. Nach mehreren Tests wurde sich auf die Verwendung von Messshunts mit dem Widerstand 100 mΩ festgelegt. Verwendet wurde ein Typ der Firma Hilo sowie ein weiterer Shunt der Firma E-T-A, der im Rahmen dieses Projekts entwickelt wurde. Beide Messshunts werden ausschließlich mit einer Abschneidediode und parallelen Überspannungsschutz betrieben.

In AP 3.3.5 wurde der mobile Prüfaufbau erstellt. Hierfür wurde in Absprache mit INP ein Messtisch entworfen, der so gestaltet ist, dass sowohl der elektrische Versuchsaufbau als auch die zum Einsatz kommende optische Messtechnik sinnvoll auf diesem und kompakt um diesen herum platziert werden kann.

Im nächsten Schritt wurde ein Konzept überlegt, wie der Messtisch in Kombination mit der INP-Messtechnik räumlich im Prüffeld angeordnet werden kann. Dieses Konzept ist in Abbildung 2.34 und Abbildung 2.35 dargestellt. Dabei ist in beiden Abbildungen auf der rechten Seite der 8/20-Generator und die DC-Quelle des Prüffelds zu sehen. Von beiden Generatoren werden die Zuleitungen zum Tisch aus Arbeitsschutzgründen über die Decke herangeführt. Auf der linken Seite des Tisches soll das optische Messsystem von INP, starr mit dem Messtisch verbunden, platziert werden. Der Messtisch selbst soll so gestaltet sein, dass der el. Aufbau und weitere Messtechnik von INP auf bzw. auch unter ihm Platz finden. Alle wichtigen Bestandteile des Konzepts sind in Abbildung 2.34 und Abbildung 2.35 beschrieben.

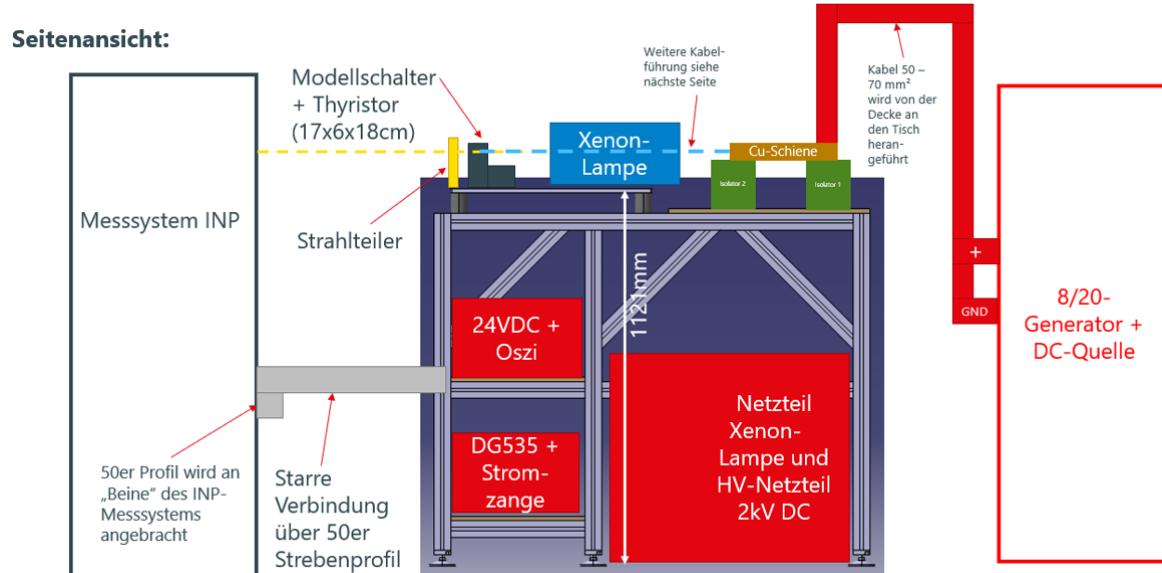


Abbildung 2.34: Seitenansicht des Konzepts Prüfaufbau im Prüffeld

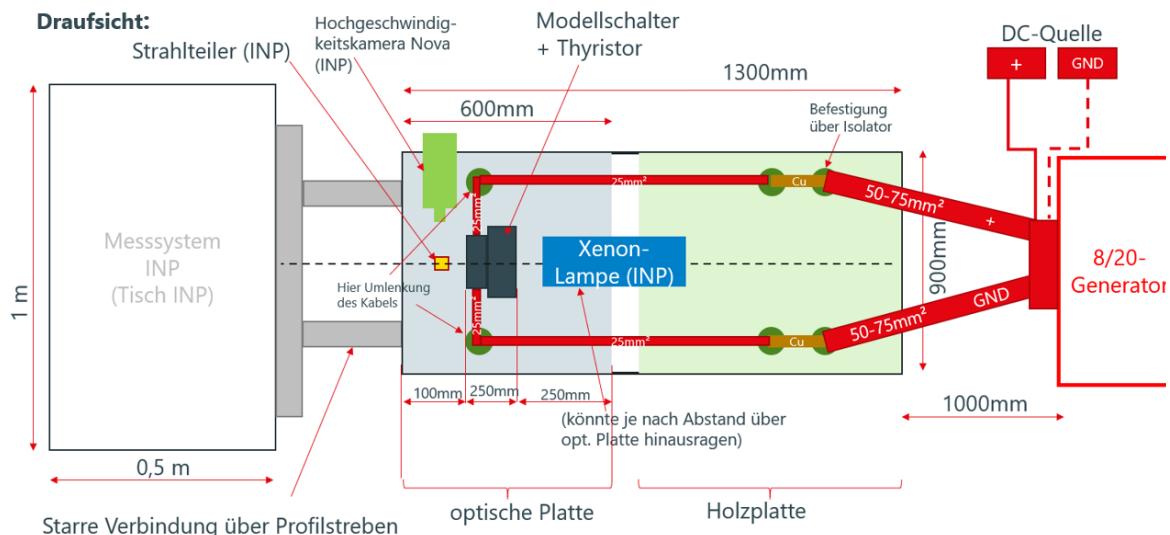


Abbildung 2.35: Draufsicht des Konzepts Prüfaufbau im Prüffeld

Für die optischen Untersuchungen wurden seitens des INP eine Hochgeschwindigkeitskamera der Baureihe FASTCAM NOVA S von Photron und ein am INP gebautes mobiles Spektroskopiesystem auf Basis eines 0.5m-Spektrographen eingesetzt. Als Detektor standen hierbei entweder eine intensivierte CCD-Kamera (PIMAX 4, Princeton Instruments) oder die bereits erwähnte Nova-Videokamera zur Verfügung, deren Empfindlichkeit durch einen zwischengeschalteten Bildverstärker (C10880, Hamamatsu) erhöht wurde, um im Bereich nach Stromnull ausreichend empfindlich messen zu können. Die Untersuchungen zur optischen Emissionsspektroskopie wurden durch optische Absorptionsspektroskopie ergänzt, um das zeitliche Abklingen der Metalldampfdichte einschätzen zu können. Hierfür wurde eine gepulste Xenon-Lampe als Hintergrundlichtquelle (Eigenbau INP) verwendet. Die zeitliche Ansteuerung erfolgte mit einem mehrkanaligen Verzögerungsgenerator (DG535, BNC).

Zusätzlich zum Konzept des Prüfaufbaus wurde in AP 3.3.5 noch die Ablaufsteuerung entwickelt. Mit dieser ist es möglich, die Ansteuerung des vorgelagerten IGBTs, des Modellschalters, des Thyristor-Schalters oder IGBT-Schalters parallel zum Modellschalter und des INP-Messsystems zu synchronisieren. Außerdem kann optional der 8/20-Generator, je nach gewünschter Zündvariante, mit in die Ablaufsteuerung aufgenommen werden.

Alle zwischen Ablaufsteuerungseinheit, Stromquelle, Oszilloskop, Xenon-Lampe und Spektrograph ausgetauschten Signale wurden optisch übertragen, um Potentiale klar zu trennen und Erdschleifen zu minimieren.

Der beschriebene Aufbau wurde gemeinsam mit INP im Labor von DEHN für zahlreiche Emissions- und Absorptionsmessungen am Modellschalter bei

verschiedenen Belastungen (Variation: Stromhöhe, Elektrodenabstand, Lichtbogendauer, Elektrodenmaterial und Fenstermaterial) genutzt.

Außerdem in Betrieb genommen wurde der IGBT-Schalter. Dabei wurde überprüft, ob dieser einen Strom von 1 kA tragen und erfolgreich abschalten kann. Die Zeitkonstante sollte hierbei bei bis zu 1 ms liegen. Der Versuch hierzu ist in Abbildung 2.36 zu sehen. Kanal 1 zeigt den Strom durch den Parallelzweig des IGBT-Schalters, Kanal 2 die Spannung über dem IGBT-Schalter, Kanal 3 den Gesamtstrom und Kanal 4 den berechneten Strom durch den IGBT-Schalter. Zum Zeitpunkt 1 ist zu sehen, dass der Strom vom Parallelzweig in den Zweig des IGBT-Schalters kommutiert (Kommutierungsdauer ~80 µs). Zu Zeitpunkt 2 schaltet der IGBT-Schalter ab und es entsteht eine Überspannung, die bis zum Zeitpunkt 3 vollständig von dem Überspannungsschutz (Varistoren) abgebaut ist. Zum Zeitpunkt des Abschaltens des IGBTs betrug der Strom ~1,1 kA bei einer Zeitkonstante von ~ 1,1 ms. Dementsprechend konnte die Funktion auch bei den angestrebten Grenzwerten nachgewiesen werden.

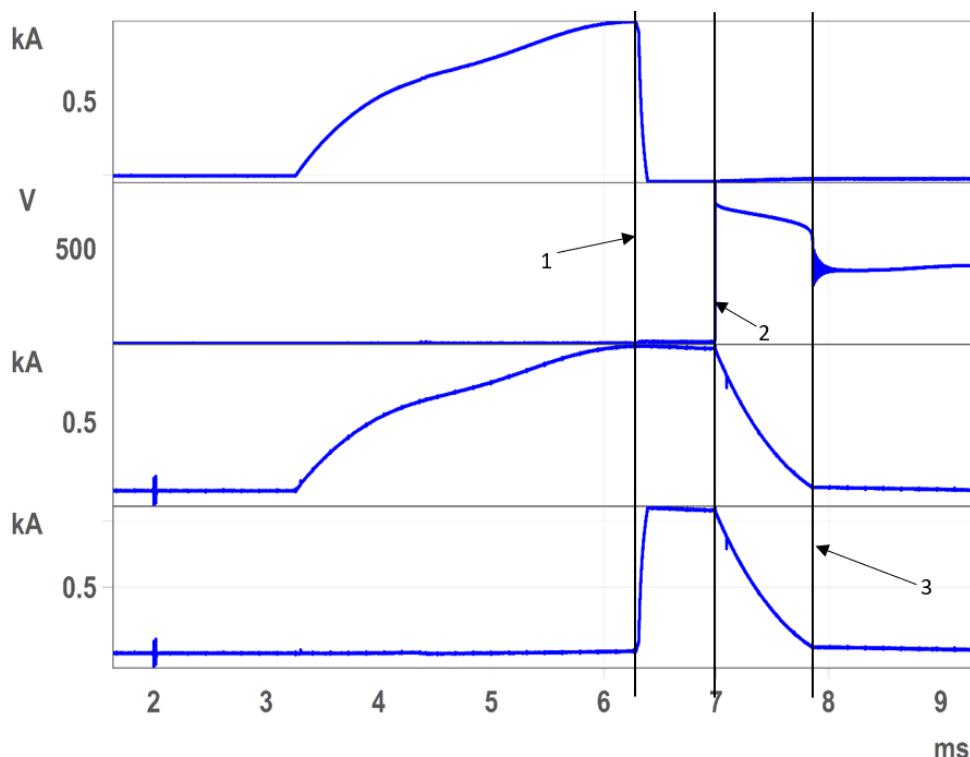


Abbildung 2.36: Schalten von 1 kA bei 1 tau

Experimentelle Untersuchungen der Wiederzündspannung

In AP 3.3.7 wurde die Wiederzündspannung experimentell untersucht. Dies geschah mit dem oben vorgestellten Versuchsaufbau, wobei parallel zum Modellschalter der IGBT-Schalter geschaltet wird, um den Lichtbogen im Modellschalter zu löschen und im Anschluss den Strom abzuschalten. Im Anschluss an das Abschalten kann bewertet werden, ob die Schaltstrecke im Modellschalter die entstandene Überspannung hält oder wiederzündet.

Für diese Tests wurden sowohl verschiedene Schaltervarianten als auch die Ströme, die Zündvariante und die Zeitkonstante variiert. Alle Versuche fanden bei einer Spannung von 400 VDC statt. Die Muster und die Belastungseinstellungen wurden auf Basis der bei den gemeinsamen Messungen vorab durchgeföhrten orientierenden Auswertung bzgl. Nachweisgrenzen der Kupferlinien ausgewählt.

- Bei den verschiedenen Schaltervarianten können das Fenstermaterial, das Elektrodenmaterial und der Elektrodenabstand variiert werden. Es wurden nachfolgende Schaltertypen verwendet:
 - Schalter 1: Quarz-Fenster, Cu-Elektroden, 0.8mm Abstand
 - Schalter 2: Makrolon-Fenster, Cu-Elektroden, 0.8mm Abstand
 - Schalter 3: Quarz-Fenster, Cu-Elektroden, 1.6mm Abstand
 - Schalter 4: Quarz-Fenster, Cu-Elektroden, 2.4mm Abstand
 - Schalter 5: Quarz-Fenster, WCu-Elektroden, 1.6mm Abstand
 - Schalter 6: Quarz-Fenster, WCu-Elektroden, 2.4mm Abstand

Des Weiteren wurden variiert:

- nominaler Folgestrom: 250A, 500A, 1000A
- Zeitkonstante: 0ms, 0.5ms
- Triggerart: LWL, 3kA 8/20
- nom. Lichtbogenbrenndauer: 350µs, 650µs, 850µs
- lichtbogenfreie Zeit: 50µs, 100µs, 200µs, 300µs, 400µs, 500µs

Zum nominalen Folgestrom:

Der max. vom Prüfaufbau zulässige Folgestrom. Dieser wird bedingt durch die Induktivität des Prüfaufbaus zumeist nicht erreicht, deshalb ist für die Auswertung der Kommutierungsstrom (Strom zum Zeitpunkt der Kommutierung vom Modellschalter auf den parallelen Halbleiter) relevant. Wie der Kommutierungsstrom bestimmt wird, zeigen Abbildung 2.37 und Abbildung 2.38.

Zur Zeitkonstante:

Wenn von 0 ms Zeitkonstante oder ohmscher Versuchsaufbau gesprochen wird, heißt dies, dass keine zusätzliche Induktivität in den Prüfaufbau integriert wurde und nur die Induktivität des Prüfaufbaus vorliegt. Bei einer Zeitkonstante von 0.5 ms liegt die Induktivität des Prüfaufbaus plus einer zusätzlichen Induktivität, die eine Zeitkonstante von 0.5 ms ergibt, vor.

Zur Zündart:

Bei Zündart LWL wird ein Spannungsimpuls auf eine Hilfselektrode gegeben, so dass ein Triggerplasma initiiert wird. Bei der Zündart 3 kA 8/20 wird der Schalter durch einen 8/20-Impuls mit einer Amplitude von 3 kA gezündet. Die interne Steuereinheit bleibt inaktiv.

Zur nominalen Lichtbogenbrenndauer:

Die nominale Lichtbogenbrenndauer kann über den parallelen Hybridkreis zum Abschalten des Modellschalters eingestellt werden. Die Einstellungsmöglichkeiten sind zuvor erklärt. In der Realität ist die Lichtbogenbrenndauer abweichend von der eingestellten nominalen Lichtbogenbrenndauer, da der Zündvorgang vom ersten Zündfunken bis zum vollständigen Lichtbogen zwischen beiden Elektroden stets unterschiedlich lange dauert. Deshalb wird nachfolgend nur die Lichtbogenbrenndauer verwendet, die ab dem ersten Zeitpunkt des Stehens des Lichtbogens zwischen den Elektroden gemessen wird. (siehe Abbildung 2.37 und Abbildung 2.38)

Zur lichtbogenfreien Zeit:

Auch die lichtbogenfreie Zeit kann über den parallelen Hybridkreis eingestellt werden. Die Einstellungsmöglichkeiten können wieder der vorangegangenen Erklärung entnommen werden. Da die lichtbogenfreie Zeit durch keine variierenden Parameter bestimmt wird, ist diese mit einem Fehler von weniger als 3 μ s als konstant anzusehen.

Die in den Versuchen eingestellte kleinste lichtbogenfreie Zeit beträgt 50 μ s. Dieser Wert wurde anhand der Messungen von INP in AP 3.1.4 festgelegt. Die Ergebnisse dieses Versuchs besagen, dass die Temperatur nach Strom-Null innerhalb von ca. 30 μ s auf Werte < 6000 K sinkt. Bei Werten von > 3-4 TK ist bei den relevanten Spannungsbelastungen > 800 V ein thermisches Wiederzünden wahrscheinlich. Um den Verschleiß und die Anzahl der Muster zu begrenzen, wurden sehr kurze Erholungszeiten < 50 μ s nicht untersucht. Bei Abschaltung des IGBTs nach dieser Zeit (50 μ s) konnten nur bei Mustern mit sehr geringen Belastungen eine hinreichende Spannungsfestigkeit ermittelt werden. Bei stärkeren Belastungen traten auch bei deutlich längeren Erholzeiten noch Wiederzündungen auf.

Bei den in den nachfolgenden Arbeitspunkten durchgeführten Versuchen handelte es sich stets um eine Annäherung an die Wiederzündspannung, indem die lichtbogenfreie Zeit beginnend von einem Wert, bei dem keine Wiederzündung zu erwarten ist, abgesenkt wird, bis es zum Wiederzünden kommt. Dabei kann es zu zwei Versuchsergebnissen kommen, dem Versuch mit und ohne Wiederzünden. Die Begrifflichkeiten und Messwerte, die nachfolgend dargestellt sind und diese beiden Ergebnismöglichkeiten betreffen, können nachfolgend aus Abbildung 2.37 und Abbildung 2.38 entnommen werden.

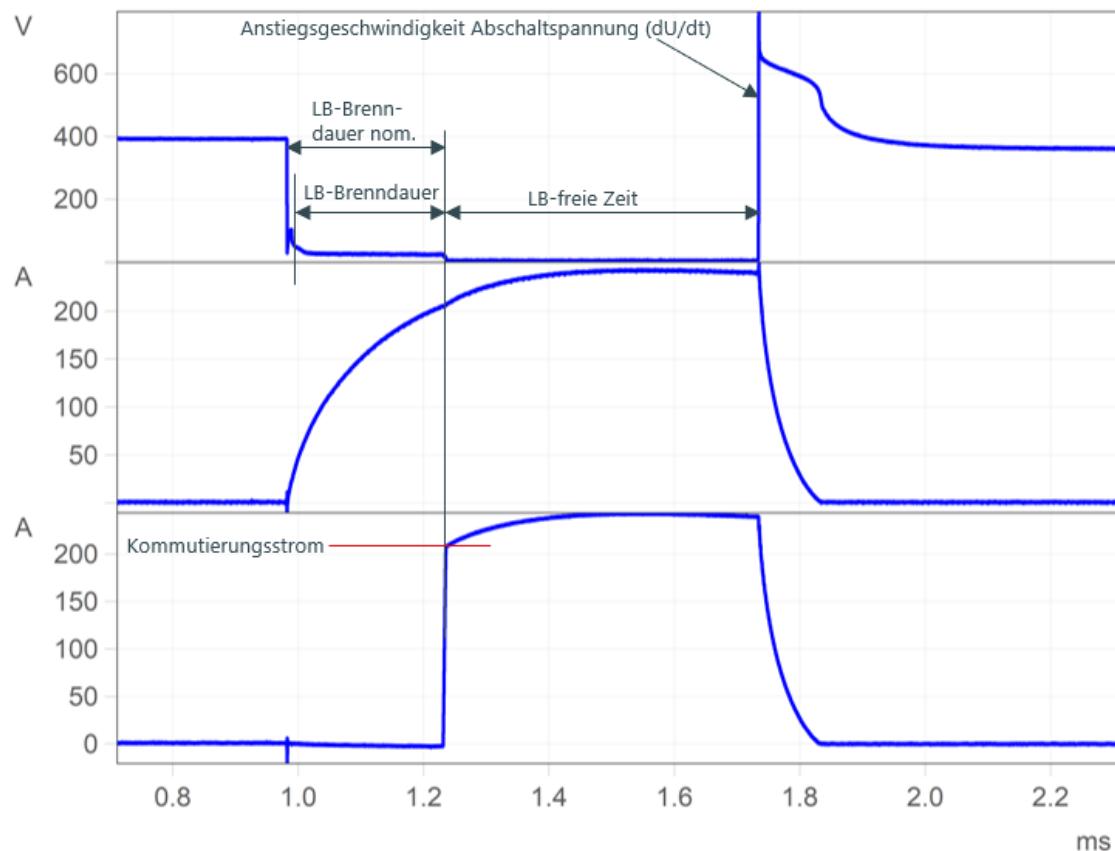


Abbildung 2.37: Versuch ohne Wiederzünden

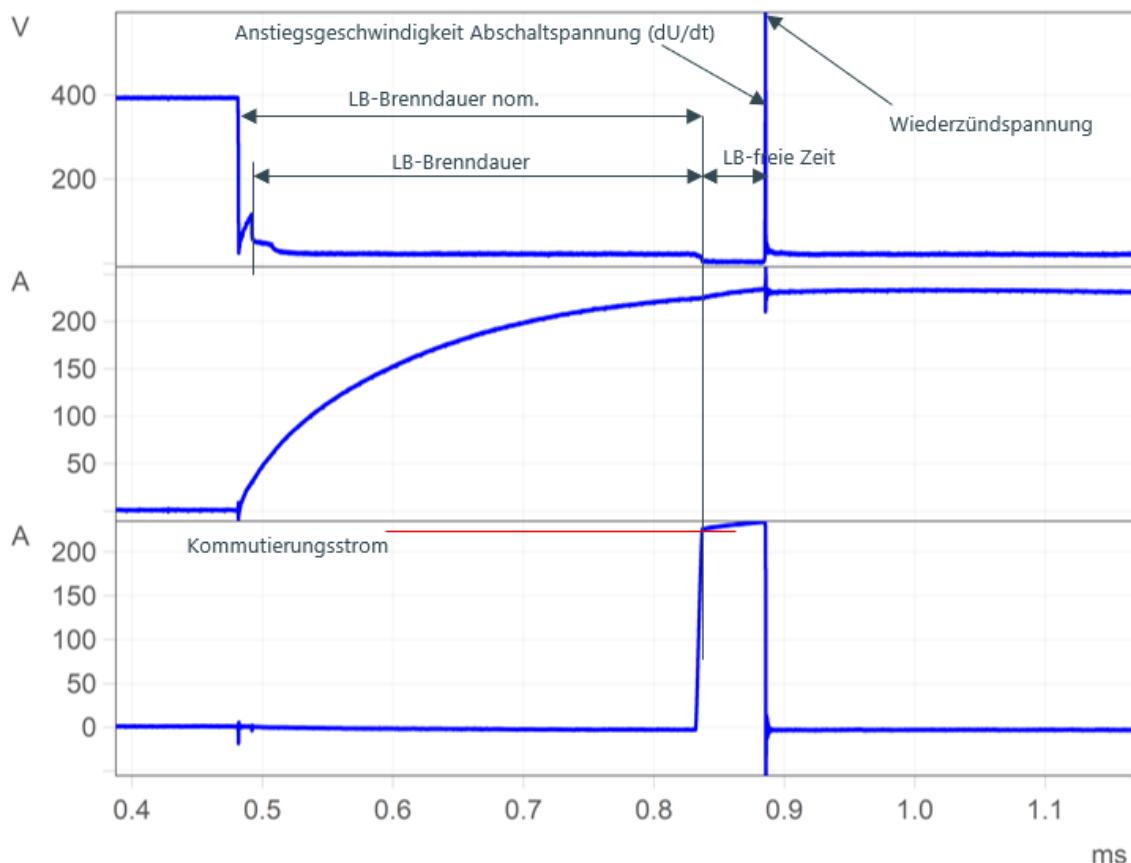


Abbildung 2.38: Versuch mit Wiederzünden

Ergebnis:

Ein Einfluss war erkennbar bei nachfolgenden Eigenschaften:

- Elektrodenabstand: mit zunehmenden Elektrodenabstand nimmt die benötigte Ruhezeit zu
- Elektrodenmaterial bei großem Strom ($I_{\text{nom}} = 1000 \text{ A}$): WCu benötigt eine längere Ruhezeit als Cu
- Fenstermaterial ab einer größeren LB-Brenndauer ($>650 \mu\text{s}$): Bei einem Lichtbogen $>650 \mu\text{s}$ ist das Makrolon soweit graphitiert, dass es bereits bei $<400 \text{ V}$ zum Wiederzünden kommt.
- Zeitkonstante: Bei größerer Zeitkonstante nimmt die benötigte Ruhezeit zu

Kein direkter Einfluss war bei nachfolgenden Eigenschaften erkennbar:

- Triggerart
- Stromhöhe
- Lichtbogenbrenndauer
- Elektrodenmaterial bei kleinem Strom
- Fenstermaterial bei kurzer LB-Brenndauer

2.3.3 INP

Zielstellung des Arbeitspakets

Die Charakterisierung des Lichtbogens, des Restplasmagases und der Kontakte sowie die Bestimmung des Wiederverfestigungsverhaltens der Schaltstrecke bildet das Ziel dieses Arbeitspaketes. Diese Aufgabe wurde überwiegend von INP durchgeführt und liefert grundlegende Informationen für die Durchführung der AP4 und AP7 durch die anderen Projektpartner.

Zuordnung zu den APs der anderen Projektpartner

Ergebnisse dieses AP wurden in Zusammenarbeit mit Partner Dehn im Zuge des vorgesehenen AP3.3.1 hinsichtlich der Validierung der Messergebnisse anhand gezielte Experimente und Prüfung der gemessene Eigenschaften auf Verallgemeinbarkeit.

AP 3. Charakterisierung des Lichtbogens, des Restplasmagases, der Kontakte und der Wiederverfestigung der Schaltstrecke

In diesem Arbeitspaket wurde der hybride Schaltvorgang experimentell untersucht. Hierbei wurden die in AP2 aufgebauten Modellschaltervorrichtungen (mit beweglichen Kontakten bzw. mit festem Kontaktabstand) an entsprechenden Stromquellen angeschlossen und unter Verwendung elektrische sowie optische Messtechnik den hybriden Schaltvorgang während der Bogenphase sowie in der Nachstromphase (post-arc) erfasst und analysiert.

Ziel hierbei war, anhand der gemessenen Signalen Lichtbogen, das Restplasmagas sowie das Wiederverfestigungsverhalten der Schaltstrecke zu bestimmen und zu charakterisieren. Nachfolgend werden die Ergebnisse entsprechend im Projektplan vordefinierten Teilaufgaben dargestellt.

Abschnitt A: Orientierungsmessungen an beweglichen Kontakten

Zunächst wurden zur Orientierung reale Schalter (HVR10 bereitgestellt vom Projektpartner E-T-A) als Testobjekte genutzt, um während der Konzeptions- und Konstruktionsphasen der Modellschalter Erfahrungen zu sammeln. Zur Gewährleistung einen optischen Zugang erfolgte eine leichte Modifizierung (Abbildung 2.55).

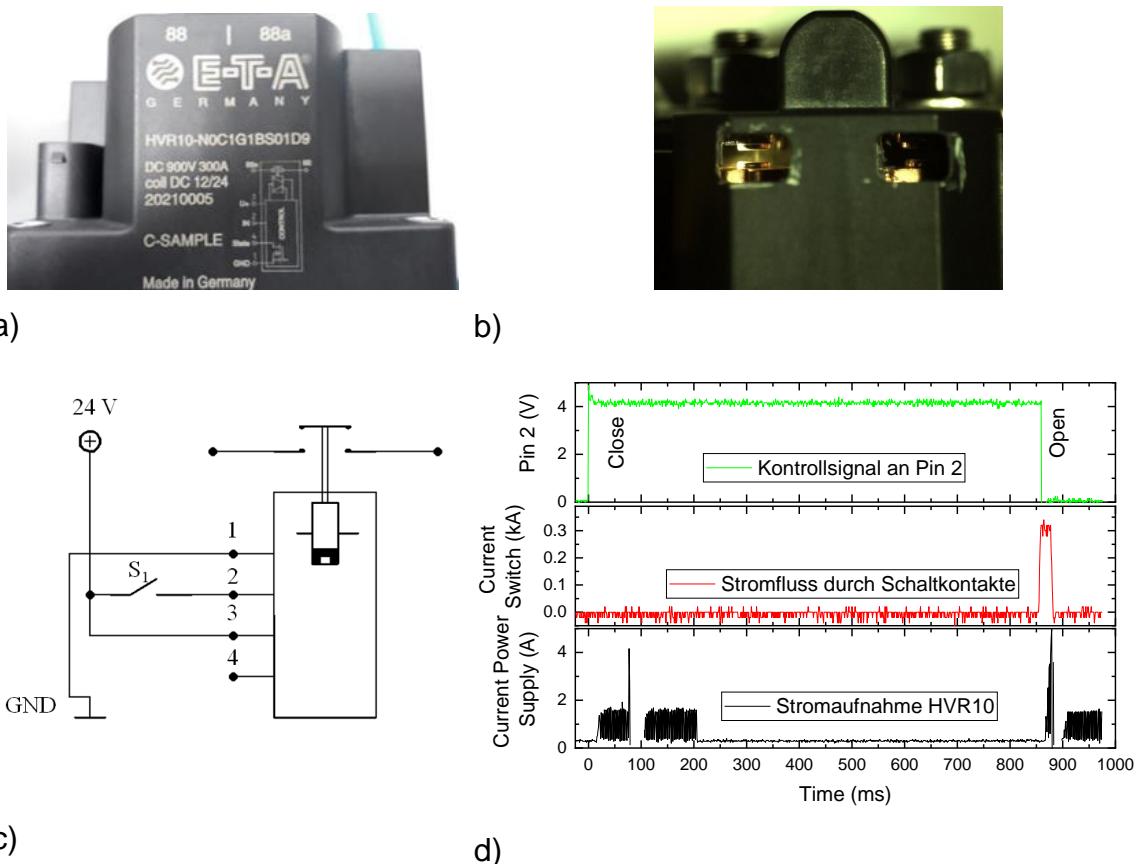


Abbildung 2.39: a) Frontaufnahme des HVR10 in originalem Zustand. b) Modifizierter HVR mit Blick auf das Doppelkontakt-Unterbrechungssystem. c) Pinbelegung für die Ansteuerung. d) Zeitliche Verläufe von Steuersignal, Laststrom und Spulenstrom des HVR bei einem Schaltversuch.

Belastet wurde der HVR mit einem DC-Puls von 20 ms Dauer, der mit einer Stromquelle des INP-Lichtbogenlabors erzeugt werden konnte. Entsprechend der Leistungsparameter des HVR wurden Stromamplituden zwischen 20 A und 300 A durch Variierung der Ladespannung der Kondensatoren der Stromquelle eingestellt. Das Zeitverhalten der beiden Kontaktpaare bei der Öffnung sowie die Entwicklung der jeweiligen Schaltlichtbögen wurden parallel mittels Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen (siehe Beispieldfoto in Abbildung 2.56).

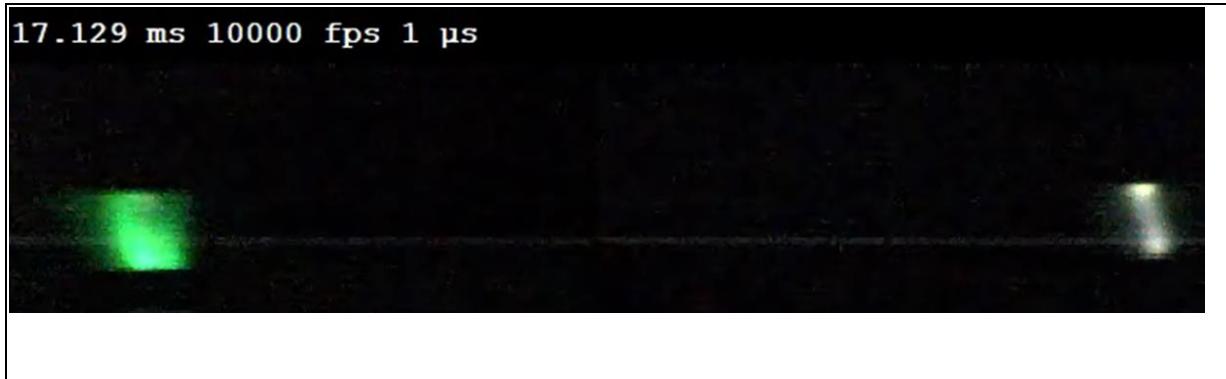


Abbildung 2.40: Kameraaufnahme eines 50 A Bogens zwischen den Kontakten des HVRs durch die optischen Zugänge nach Abbildung 1b). Belichtungszeit 1 μ s, Abtastrate 10 000 fps. Hierbei weisen die Farbunterschiede auf die Zusammensetzung des Plasmas hin.

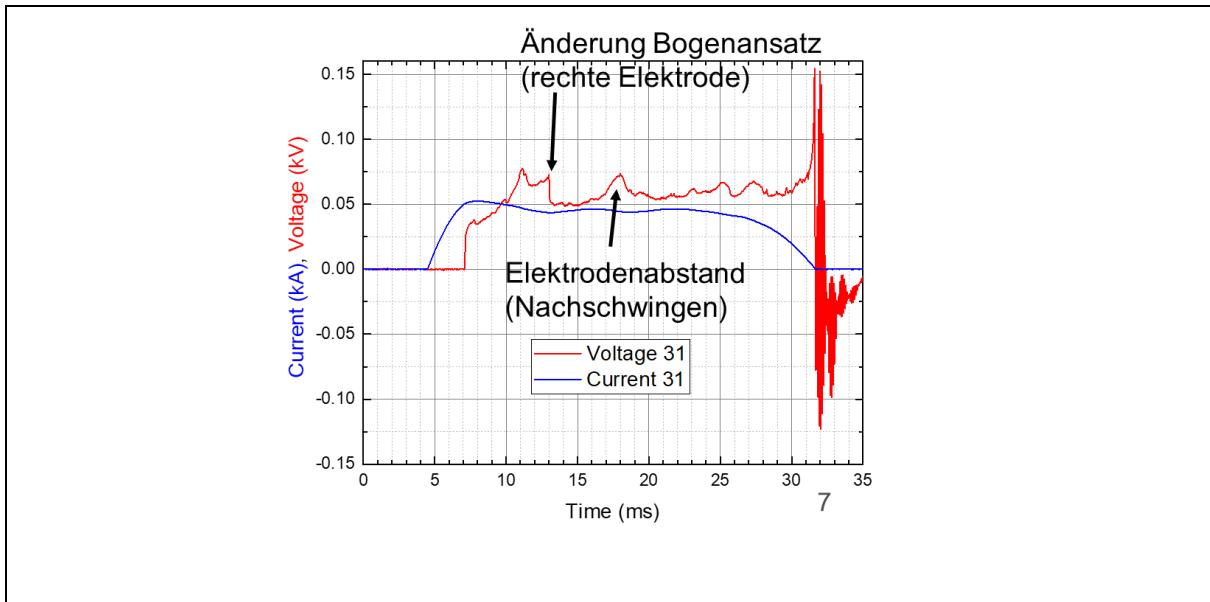


Abbildung 2.41: Zeitliche Verläufe von Strom und Spannung bei einem Schaltvorgang (nicht hybrid).

Abbildung 2.57 zeigt die zugehörigen zeitlichen Verläufe von Strom und Spannung (gesamte Spannung) während des Schaltvorgangs. Bedingt durch die Stromquelle ist bei geschlossenen Kontakten zunächst ein Einschwingen auf den Gleichstromwert (ca. 3 ms, 50 A) zu beobachten. Nach einigen ms Belastung wurde der Ausschaltvorgang eingeleitet, erkennbar am sprungartigen Spannungsanstieg bei Kontaktöffnung. Beim nicht-hybriden Schaltvorgang wie in Abbildung 2.57 ergibt sich eine längere Bogenphase mit Spannungsvariation durch Veränderung des Elektrodenabstands, zunächst beim sich öffnenden Kontakt und im weiteren Verlauf durch mechanisches Nachschwingen der Elektroden. Am Ende des Strompulses kommt es zum Spannungsanstieg wegen sinkender Temperatur und Leitfähigkeit des Bogenplasmas, sowie hoher Wiederkehrspannungen nach Stromnull. Meßreihen mit identischer Zeiteinstellung ergaben einen gut reproduzierbaren Zeitpunkt der mechanischen Öffnung des HVR10 zwischen 17.0 ms und 17.3 ms

nach dem Steuersignal (Triggerimpuls). Dies deutet auf einen Jitter von wenigen 100 μ s hin, was sehr gute Voraussetzung für die Untersuchung eines schnellen Löschvorgangs bietet und gibt erste Zielgrößen für die Auslegung der notwendigen Modellschalter. Der Zeitverlauf eines hybriden Schaltvorgangs ist im Abbildung 2.58 dargestellt. Dabei ist der geringe Spannungsanstieg bei der Kontaktöffnung durch einen grünen Pfeil gekennzeichnet. Etwa 2.2 ms später wird der Stromfluss elektronisch unterbrochen (roter Pfeil). Diese Phase ist im rechten Teilbild herausgestellt für zwei Beispiele.

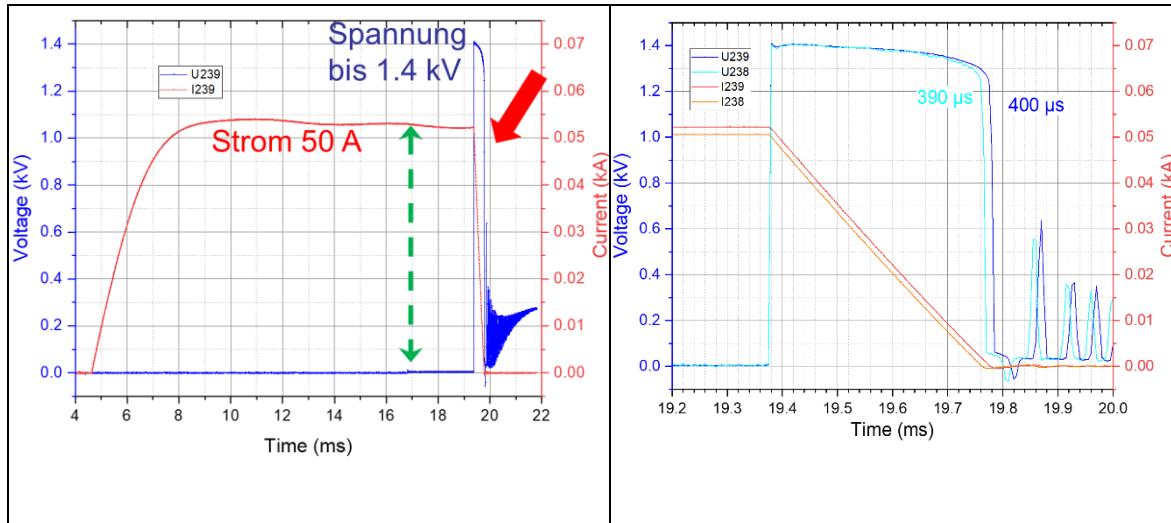


Abbildung 2.42: Links: Strom- und Spannungsverlauf eines Ausschaltvorgangs (50 A, Übersicht). Rechts: Bereich der Stromabschaltung, welche das Verhalten von Strom und Spannung während der Kommutierung von der Kontaktstrecke zum parallelgeschalteten IGBT verdeutlichen, sowie Wiederholung des Schaltvorgangs.

Hierbei zeigt sich, dass die Stromabnahme nahezu linear bis auf Stromnull innerhalb etwa 400 μ s erfolgt. Diese Dauer hat sich als bei gleicher Stromamplitude gut reproduzierbar erwiesen, die zeitliche Variation der Entladungen (Jitter) beträgt ca. 200 μ s. Während der Stromabschaltung wurde ein Spannungsmaximum von ca. 1.4 kV gemessen, welche auf den ebenso parallelgeschalteten Varistor fällt. Obwohl bei hybrider Schalten die Stromkommutierung von den Hauptkontakte zum IGBT innerhalb wenige μ s erfolgt und die Abschaltung des IGBT in hunderten ns bis wenige μ s realisiert werden kann, verbleibt im elektrischen Kreis magnetische Energie gespeichert die über den Varistor abgebaut werden muss. Die Gesamtdauer der Stromabschaltung wird demzufolge vom Varistor und Stromamplitude bestimmt, wie in Abbildung 2.59 links beispielhaft an den Zeitverläufen für 60 A und 110 A dargestellt und systematischer in der Tabelle aufgelistet wird.

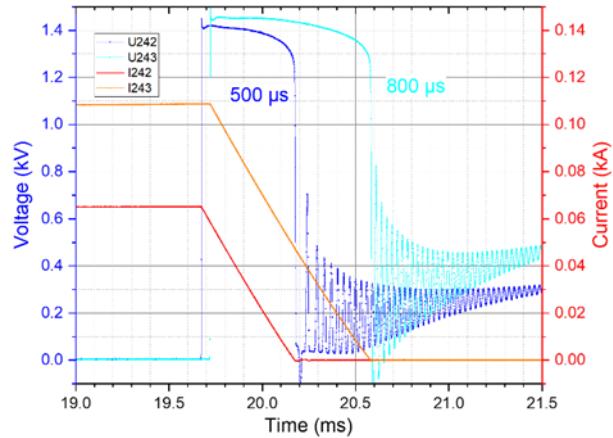


Abbildung 2.43: Strom- und Spannungsverläufe im Bereich der Ausschaltung für 60 bzw. 110 A und Zusammenfassung für Stromamplituden von 50 bis 110 A.

Tabelle 2.4: Beispiele zeitliche Verläufe von Strom- und Spannung bei hybrid Schalten mit HVR10

Schuss	Strom	Dauer	Spannung
#	A	μs	kV
7238	51	390	1.4
7239	52	400	1.4
7242	65	500	1.41
7234	65	500	
7236	64	500	
7237	64	500	
7243	110	860	1.45

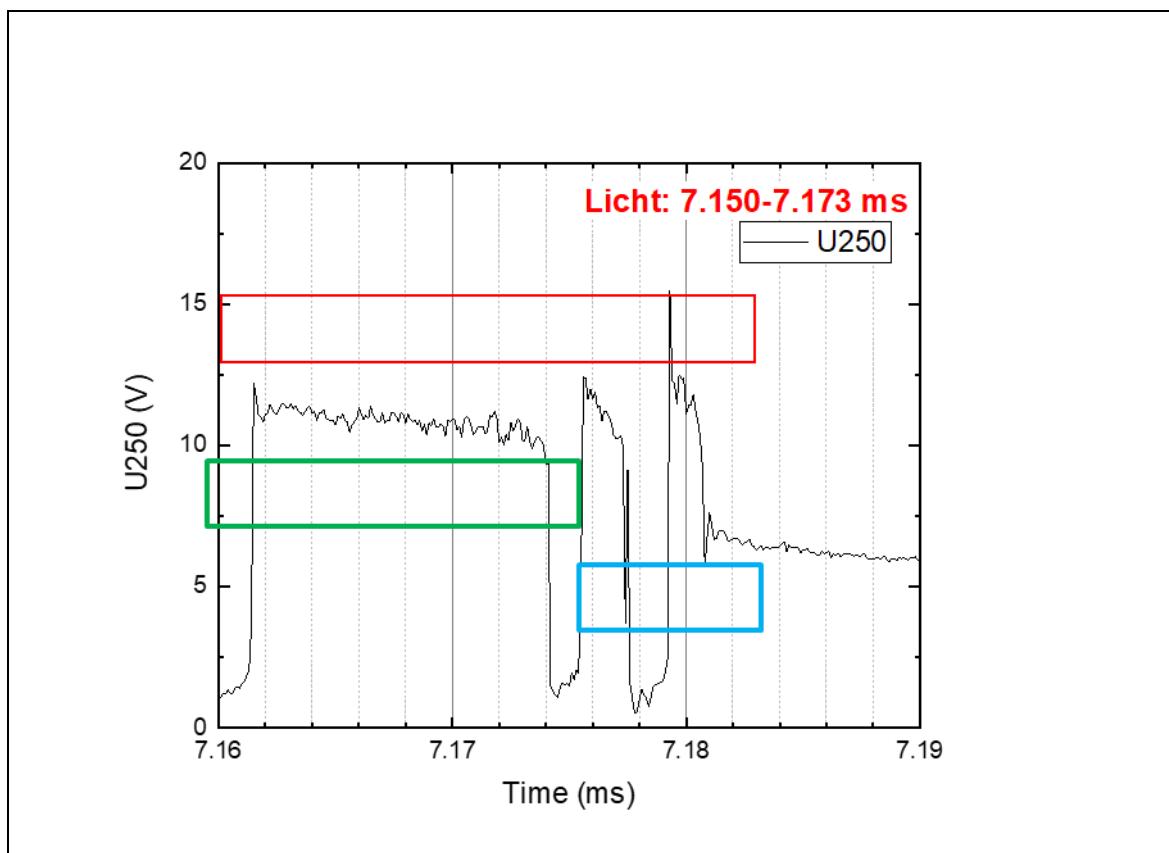
Bei der Spannungsmessung ist die hohe Spitze beim Ausschalten zu berücksichtigen, die durch den Varistor auf 1.4 kV begrenzt wird. Es wurde ein 40 kV-Tastkopf verwendet. Die bisher gezeigten Spannungsverläufe lassen daher wenig Rückschlüsse auf die Vorgänge beim Übergang vom Stromfluss durch die geschlossenen Kontakte hin zum vom IGBT getragenen Stromfluss erkennen. Diese Phase beinhaltet die Bogenentladung und damit Materialerosion an den

Kontakten und ist für die Konzeption eines hybriden Schalters in mehrfacher Hinsicht entscheidend. Einerseits sollte möglichst die Bogenentladung nicht zu lang andauern, um geringen Elektrodenabtrag und eine lange Lebensdauer der Kontakte zu erzielen. Andererseits sollte auch die Belastung des Halbleiterorschalters möglichst minimal sein, um preiswertere Typen einsetzen und auf eine aufwändige Kühlung weitgehend verzichten zu können. Jedoch lassen sich die Kommutationszeiten nicht beliebig verkürzen, da parallel die mechanische Öffnung der Kontaktstrecke erfolgen muss und das elektronische Abschalten erst erfolgen darf, wenn diese bereits ausreichend wiederverfestigt ist, um mindestens die Varistorspannung tragen zu können.

Aufgrund der Elektrodengeometrie und der doppelten Kontaktunterbrechung, des Ohmschen Widerstands sowohl der Halbleiterstrecke als auch des Kontaktwiderstands vor Beginn der Entladung ergeben sich während des hybriden Schaltvorgangs eine Reihe von Einflüssen auf die Kontaktspannung, welche Rückschlüsse auf die entstehende Bogenentladung und den Kommutationsprozess ermöglichen. Die nachfolgenden Untersuchungen wurden mit einer verbesserten Spannungsmessung mit höherer Auflösung deutlich besser als 100 mV durchgeführt, um entsprechende Details erkennen zu können. Die Strommessung erfolgte mit einem koaxialen $10\text{ m}\Omega$ -Shunt für den Gesamtstrom durch den Schalter. Ergänzend dazu wurde im Projektverlauf ein HVR vom Partner E-T-A so adaptiert, dass zusätzlich auch der anteilige Stromfluss durch den IGBT mittels eines kleinen SMD-Shunts bestimmt werden konnte, wobei trotz Verwendung von Koaxialkabeln bauartbedingt relativ große Störeinflüsse aus der Umgebung in Kauf genommen werden mussten. Die optischen Untersuchungen erfolgten mit Hochgeschwindigkeitskameras der Nova-S-Baureihe von Photron, wobei die Wiederholraten je nach Vergrößerung und Bildausschnitt zwischen 20 und 500 Bildern je ms (500 000 fps) lagen. Eine Verwendung optischer Filter zur Selektion der Linienstrahlung einzelner Elemente ergab keine zusätzlichen Erkenntnisse; wegen der starken Einschränkung der Intensität wurde daher auf Filter verzichtet. Spektroskopische Untersuchung der Entladung konnte im Rahmen des Projekts ebenfalls nicht an den HVR realisiert werden, erfolgten jedoch am Modellschalter des INP.

Die Strombelastung des Schalters wurde auf einige ms Dauer bei 400 A erhöht. Abbildung 6 zeigt die Spannungscharakteristik eines hybriden Schaltvorgangs während der Bogenphase und die einige Kamerabilder der Emission an den Kontaktstücken. Die Halbleiterstrecke wird beim HVR10 einige ms vor Kontaktseparation eingeschaltet, um eine möglichst geringe Kontaktersion durch kurzzeitige Bogenentladung zu erzielen. Der Spannungssprung auf typischerweise 10-15 V kennzeichnet den Beginn der Bogenentladung, deren Gesamtdauer durch

ein rotes Rechteck markiert ist. Auf die etwa $12 \mu\text{s}$ lange erste Bogenphase (11-12 V, grün markiert) folgt eine kurze Unterbrechung mit sehr geringer Spannung (1-2 V, $< 2 \mu\text{s}$) sowie zwei weitere Bogenphasen bei ebenfalls über 10 V (blau markiert). Die entsprechende Sequenz der Kameraeinzelbilder ist im unteren Bereich von Abbildung 2.60 dargestellt (links als Graubild wie im Original, rechts in Falschfarbendarstellung nach Bildbearbeitung). Die Abfolge und Zeitdauer der Lichtemission korrelieren sehr gut mit dem gemessenen Spannungsverlauf, wenn ein geringer Zeitversatz bedingt durch unterschiedliche elektro-optische Wandlung der Triggersignale für Kamera und Oszilloskop berücksichtigt wird. Wie in den Kameraaufnahmen erkennbar ist, erfolgt zunächst eine Elektrodenöffnung links, welche nach $\sim 15 \mu\text{s}$ abklingt bzw. auf den Kontakt rechts übergeht. Die zwischenzeitliche beidseitige Schließung der Kontaktbrücke wird aufgrund begrenzter Zeitauflösung der Videokamera nur im Spannungsverlauf detektiert. Die Gesamtdauer der Bogenentladung beträgt etwa $20 \mu\text{s}$.



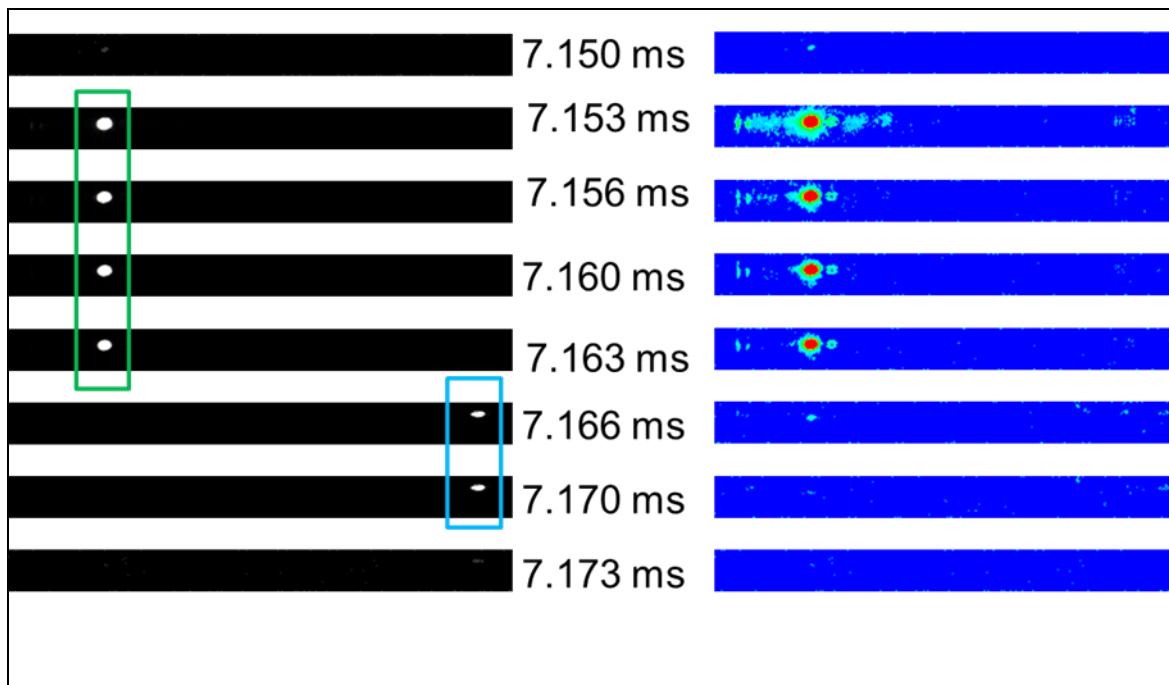


Abbildung 2.44: Oben: Zeitlicher Verlauf der Spannung für einen hybriden Schaltvorgang bei 400 A. Die farbigen Rechtecke kennzeichnen Zeitbereiche der Bildaufnahmen. Unten links: Originalaufnahmen der Hochgeschwindigkeitskamera und Kennzeichnung der Bereiche im Spannungsverlauf. Bildwiederholungsrate 300 kfps, Belichtungszeit 2 μ s. Unten rechts: Aufbereitete Kamerabilder mit Falschfarbendarstellung zur Kontrastverbesserung. Nach dem Ende der Bogenphase fällt die Kontaktspannung auf 7-8 V. Es kann davon ausgegangen werden, dass der gesamte Strom von 400 A nun durch den Halbleiter fließt, dessen Widerstand somit etwa $20 \text{ m}\Omega$ beträgt. Die Öffnungsgeschwindigkeit der Kontaktstrecke wurde mittels Videokamera für stromlose Öffnung zu etwa 0.7 m/s bestimmt. Unter der Annahme, dass die Bewegung nahezu gleichförmig ist, ergeben sich für typische Bogenphasen von 10-30 μ s Dauer Kontaktabstände im Bereich um 100-200 μm bei einem Kontaktdurchmesser von 5 mm (Verhältnis von Durchmesser zu Abstand von 50). Wird berücksichtigt, dass es sich um eine Kontaktbrücke mit zwei Seiten (und drei Kontaktpaaren) handelt, die auch mal auf der einen Seite aufreißen und auf der anderen Seite geschlossen werden kann, wird klar, dass die beobachtete Lichtemission nicht aus einer zwischen zwei planaren Platten geformten Lücke entstammt. Insbesondere bei relativ weichen Kontaktmaterialien wie Cu, Ag, AgSnO etc. dürfte die Oberflächenrauigkeit eine enorme Rolle spielen. Beim HVR ist die Phase der Stromflusses über den IGBT, also bis zum Abschalten und der Übernahme durch den Varistor mit 1.4 kV Kontaktspannung, auf ca. 2 ms eingestellt. Erst nach dieser Zeit muss das Restgas soweit abgekühlt und abtransportiert sein, dass die mechanische Strecke ausreichend spannungsfest ist (wiederverfestigt). Da sich in dieser Zeit bereits ein Kontaktabstand von etwa 1.5 mm eingestellt hat,

reduziert sich der Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit der Kontakte auf die Wiederverfestigung entsprechend.

Weitere Experimente mit dem HVR beim hybriden Schalten weisen darauf hin, dass durch die kurze Bogendauer und ebenso kurze Öffnung der Kontaktstrecke grundsätzlich Sequenzen mit stark variierender und im Mittel mäßiger Intensität zu erwarten sind. Durch die weitere Bildbearbeitung und Falschfarbendarstellung kann eine Visualisierung von Details ermöglicht werden. Dies ist für die spätere Bestimmung der Strahlungsintensität insbesondere in der Nachstromphase von Bedeutung. Abbildung 2.61 zeigt ein Beispiel mit Bildbearbeitung für eine Kontaktseite der doppelte Kontaktbrücke. Der Ortsausschnitt wurde reduziert, um bessere Zeitauflösung zu erreichen (Bildwiederholrate 200000 fps, d.h. Abstand 5 μ s). Während hier die gesamte Bogenphase detektiert werden konnte, gibt es eine Reihe anderer Entladungen, bei denen keine Lichtemission beobachtet wurde, weil sich der anhand des Spannungsverlauf eindeutig detektierte Bogen entweder im hinteren, geometrisch abgeschirmten Teil des untersuchten Kontaktpaares oder im nicht untersuchten Kontaktpaar befand. Die geringe Elektrodenöffnung bewirkt möglicherweise hier, dass die horizontale Form der Entladung unterbrochen wird, was auf eine Abdeckung durch die Kontaktstruktur (Rauigkeit) hinweist.

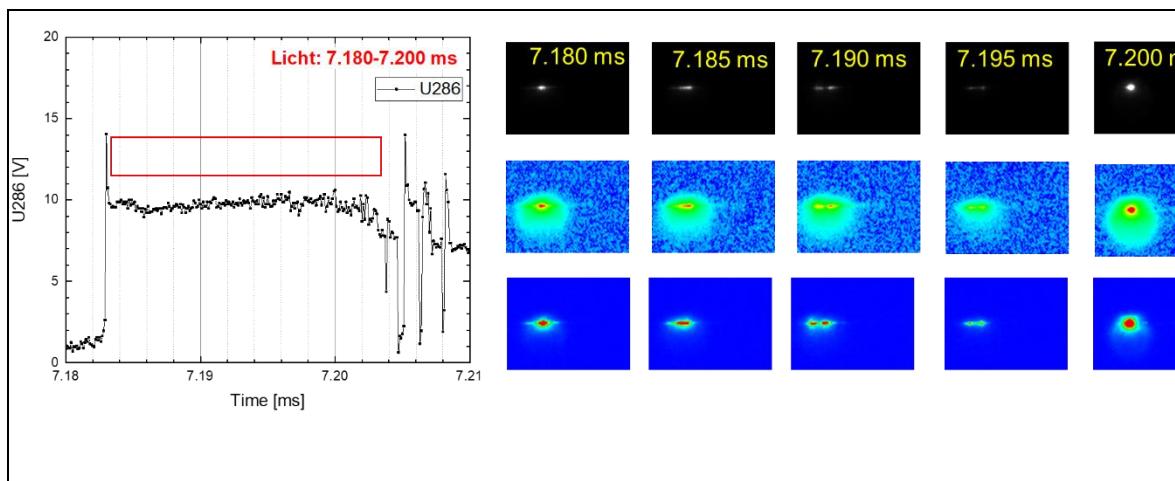


Abbildung 2.45: Links: Spannungsverlauf. Rechts Videosequenz und Detailvisualisierung durch Nutzung von Falschfarben und Änderung der Bildtiefestufung.

Die oben erwähnte Messung des Teilstroms durch den IGBT mittels SMD-Shunts bestätigt die gewonnenen Erkenntnisse und liefert zusätzliche Informationen über den Kommutationsprozess, wie in Abbildung 2.62 dargestellt. Im Spannungsverlauf ist neben dem bereits beschriebenen Sprung auf 10-12 V als Zeichen für eine Kontaktöffnung und Bogenentladung hier noch ein weiterer Sprung auf rund 20 V zu erkennen, der bei beidseitiger Öffnung der Kontaktpaare verbunden mit zwei Bogenentladungen in Reihenschaltung auftritt. Dieser Fall ist relativ selten. Das liegt zum einen an der schnellen Übernahme durch den IGBT innerhalb weniger 10 μ s bzw. bei Kontaktabständen von wenigen 100 μ m und erfordert eine sehr

symmetrische Bewegung der Kontaktbrücke. Zum anderen wurde der verwendete HVR mehrfach auseinander- und wieder zusammengebaut, was sich möglicherweise negativ auf die Symmetrie des Antriebs auswirkte. Weiterhin sind die Kontaktkräfte auf die Kontakte im geschlossenen Zustand und der bei 400 A bereits spürbaren magnetische Lorentzkraft im Betrieb zu berücksichtigen, die bei einseitigem Abriss eine Asymmetrie bewirken können. Während der Doppelbogenphase nimmt der Stromfluss durch den IGBT zu und die (doppelte) Bogenspannung sinkt um einige Volt. Nach der doppelten Bogenphase von ca. 5 μ s Dauer folgt eine ebensolange Phase der (Wieder-)Kontaktierung, sichtbar am fehlenden IGBT-Teilstrom.

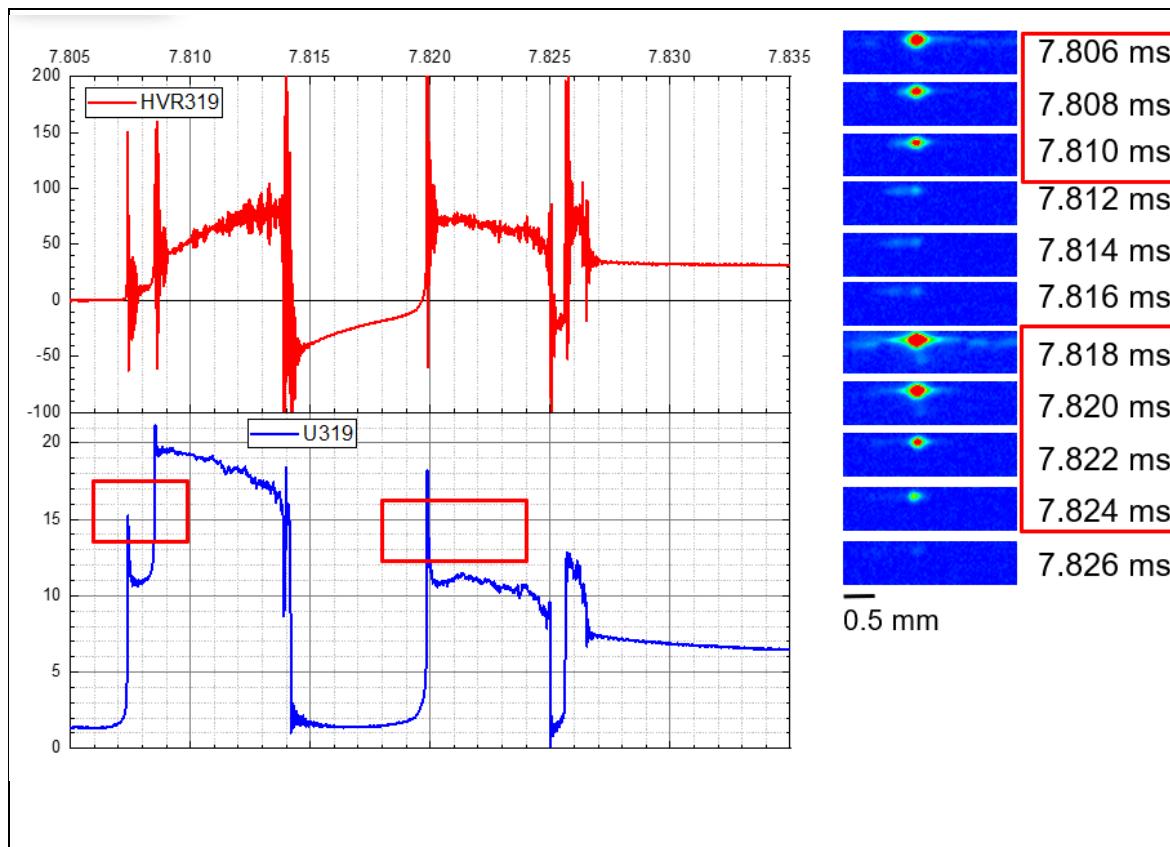


Abbildung 2.46: Links: Spannungsverlauf. Rechts Videosequenz und Detailvisualisierung durch Nutzung von Falschfarben und Änderung der Bildtiefestufung.

Zusammenfassend lassen sich aus den orientierenden Messungen mit dem HVR eine Reihe von Erkenntnissen gewinnen und Schlussfolgerungen für weitere Untersuchungen an Hybridschaltern mit öffnenden Kontakten ziehen:

- Eine Messung an den einzelnen Strompfaden (mechanisch / Bogen, IGBT, evtl. Varistor) ist für die Zuordnung der mit optischen Aufnahmen sowie elektrischen Signalen erfassten Vorgänge notwendig.
- Für die Spannungsmessung ist ein angepasstes Teilverhältnis zu gewährleisten, welche eine möglich hohe Ausnutzung des Oszilloskop-Messbereichs ermöglicht.

- Höhere Zeitauflösung der optischen Beobachtung mittels schnellerer Kamera ist notwendig.
- Bei der Brückenexplosion steigt die Spannung sprunghaft auf 10-11 V und korreliert mit intensiver Lichtemission an den Kontakten. Spannungen um 20 V weisen auf zwei Lichtbögen in Reihe hin, d.h. auf beiden Seiten. Der zu erstellende Modellschalter sollte nur ein Kontakt paar aufweisen, um besser reproduzierbare Bedingungen zu erzielen.

Abschnitt B: Orientierungsmessungen an festen Kontakten (INP+Dehn)

Für die Untersuchungen des hybriden Schaltens von durch Überspannung eingeleiteten Fehlerströmen (Überspannungsschutz) wird zunächst durch einen externen Spannungsimpuls auf eine Triggerelektrode gegeben und dadurch ein Triggerplasma in der Funkenstrecke gezündet. Der dadurch initiierte Lichtbogen brennt zwischen Elektroden mit einem festen Abstand. Da es sich um einen Fehlerstrom handelt, muss hier ein möglichst rasches Ausschalten innerhalb von wenigen μ s erfolgen. Abweichend von herkömmlichen Schaltlichtbogenprinzipien (beispielsweise unter Verwendung von Laufschielen, Löschblechen, gasenden Kunststoffen, magnetischer Beblasung) kann das auch mit Hilfe von Halbleitern realisiert werden.

Für die experimentelle Erfassung des hybriden Schaltverhalten bei Überspannungsschutz wurde eine Versuchsanordnung vom Partner Dehn aufgebaut. Aufgrund der limitierten Anzahl an möglichen Versuchen pro Vorrichtung hat Dehn mehrere Testkammern gefertigt. Diese variieren in Absprache mit dem INP in ihrem Abstand zwischen den Schienen (0.8, 1.6 und 2.4 mm) und deren Materialien (Kupfer, Eisen, Wolframkupfer) sowie bezüglich des Materials der optischen Zugangsfenster (Makrolon bzw. Quarzglas).

Abbildung 2.63 zeigt eine Versuchskammer und im unteren Teil den elektrischen Mess- und Steuerkreis schematisch. Die Polarität der Elektroden ist durch die Buchstaben K für Katode und A für Anode gekennzeichnet. Für die Versorgung bzw. Nachbildung des Fehlerstromes am INP wurde unter Vorgaben des Partners Dehn ein Stromkreis gebaut, welcher auf einer Kondensatorbank mit relativ hoher Kapazität (5 mF) basiert und Stromamplituden in der Größenordnung von ca. 100 A über mehrere ms liefern kann. Für höhere bzw. anwendungsnähere Stromamplituden wurden Messkampagnen beim Partner Dehn geplant und später durchgeführt.

Die Strombegrenzung erfolgte über einen Widerstand, für die Abschaltung wurde ein Thyristor parallelgeschaltet. Die Ansteuerung erfolgte mit einem kommerziellen

Delay-Generator und galvanisch getrennt mittels elektro-optischer Signalwandlung und Übertragung durch Lichtwellenleiter.

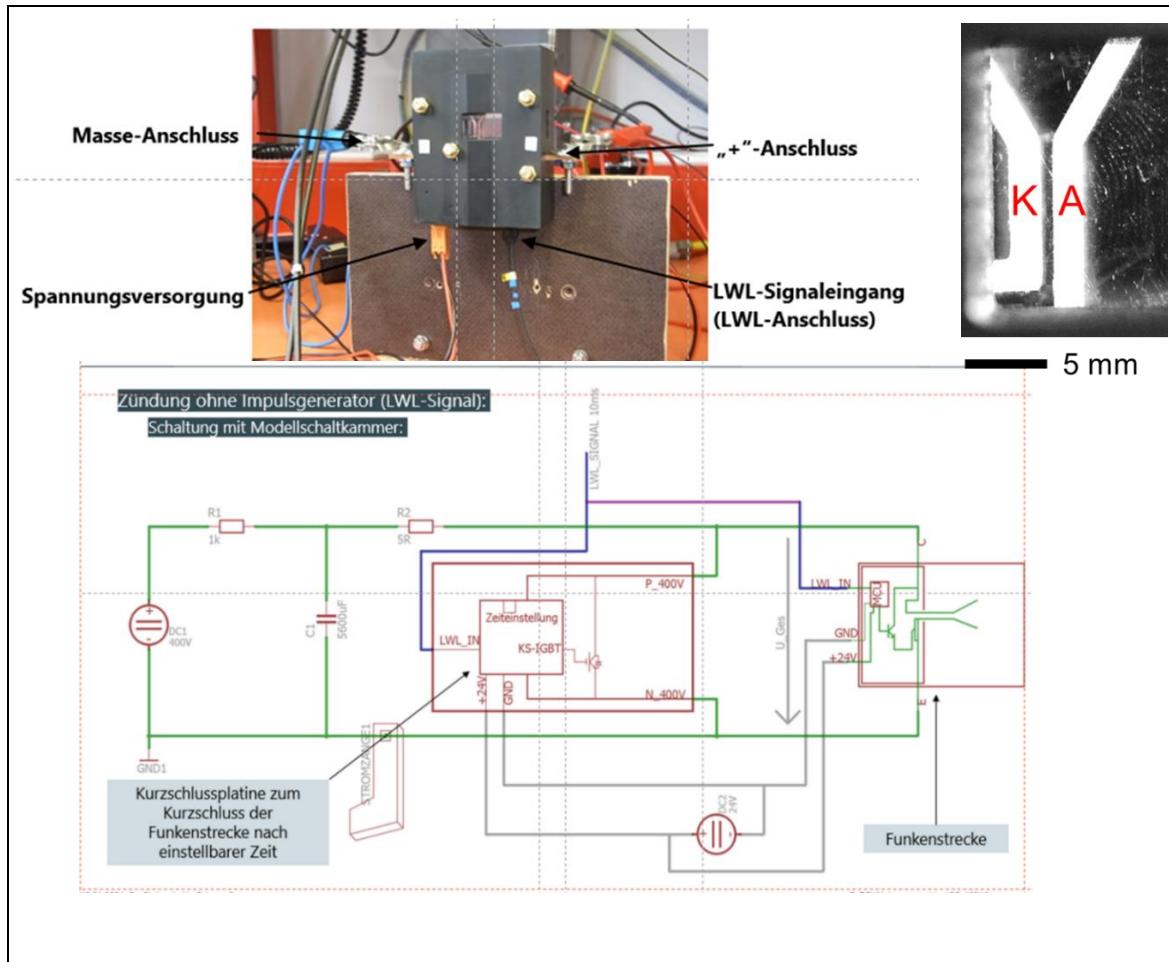


Abbildung 2.47: Versuchsanordnung zur Untersuchung hybriden Schaltens an Überspannungsschutz-Funkenstrecken, Geometrie der Funkenstrecke sowie Schema des Mess- und Steuerkreises.

Im linken Teil von Abbildung 2.64 ist der Zeitverlauf von Strom (rot) und Bogenspannung (blau) an der Versuchsfunkenstrecke sowie die Steuerimpulse für die Zündung und Unterbrechung (grau) dargestellt. Durch die limitierte Ladespannung der Kondensatoren von 400 V und eingebauten Lastwiderstand von 5Ω beträgt der maximale Stromamplitude ca. 70 A (DC-Strom). Bei einem Elektrodenabstand von 0.8 mm liegt die Bogenspannung bei ca. 25 V. Die zeitliche Verzögerung zwischen Auslösung des elektrischen Triggerimpulses (grau) und Beginn der Bogenentladung (erkennbar am Spannungsabfall in der blauen Kurve bzw. steigenden Stromfluss in der roten Kurve) beträgt etwa 50 μ s. Wie sich bei Wiederholung für eine Reihe von Entladungen zeigte, ist dieser Zeitpunkt nicht sehr exakt; es tritt ein Jitter von etwa 10 μ s auf. Im vorliegenden Fall einer mehr als 1 ms langen Entladung spielt dies keine Rolle, bei späteren Versuchen mit deutlich kürzerer Bogenphase war dies hingegen zu berücksichtigen.

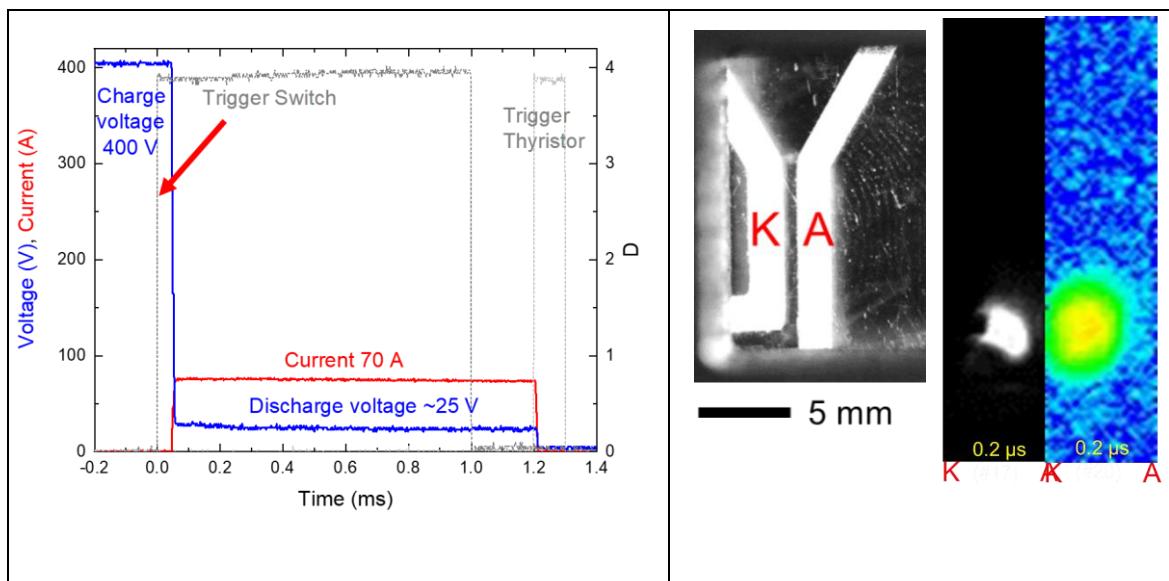


Abbildung 2.48: Links: Zeitverlauf der elektrischen Signale. Rechts: Foto sowie Kameraaufnahmen der Funkenstrecke im Betrieb unter Verwendung von Filtern mit Transmission im Bereich des Sauerstofftriplets 777 nm (Graubild) bzw. der Kupferlinie 515 nm (Falschfarbendarstellung).

Parallel wurden Videos mit einer Abtastrate von 50000 fps (alle 20 μ s) und unter Verwendung von Metallinterferenzfiltern (MIF) aufgenommen (Abbildung 10 rechts). Die Entladung zündet nahe der Triggerelektrode im unteren Bereich und läuft innerhalb \sim 100 μ s um mehrere mm aufwärts bis zur „finalen“ Position (bei langsamer Auf- und Abwärtsbewegung um \sim 1 mm). Mit dem MIF bei O I 777 nm ergibt sich selbst bei minimaler Belichtungszeit von 0.2 μ s und kleinster Objektivblende eine Übersteuerung der Kamera, das Maximum befindet sich in der Mitte des Spalts zwischen den Elektroden. Mit dem Filter bei Cu I 515 nm sind auch bei 1.1 μ s nur wenige Aufnahmen während der Zündphase überbelichtet; die Intensität ist insgesamt deutlich schwächer und weist Maxima in der Nähe der Elektrodenoberfläche auf (Materialabtrag).

Die insgesamt viel intensivere Emission der Sauerstoff-Atomlinien bei 777 nm im Vergleich zur Cu-Atomlinie bei 515 nm legt erfahrungsgemäß die Vermutung nahe, dass das Plasma von den Luftkomponenten O und N dominiert wird. Selbstverständlich würde eine finale Aussage die quantitative Analyse der jeweiligen Partialdichten erfordern, wofür nicht nur die Linienintensitäten und der Übergangswahrscheinlichkeiten, sondern auch die Temperatur benötigt würde.

Zusammenfassend: Die Ergebnisse der orientierenden Experimente sowohl bei beweglichen Kontakten (HVR, später Modellschalter INP) als auch mit Elektroden bei festem Abstand (Modellanordnung Dehn) zeigen einen grundlegenden Unterschied, welcher für das Wiederverfestigungsverhalten beim hybriden Schalten entscheidend ist. Hierbei spielt insbesondere die effektive Bogenlänge eine

bedeutende Rolle. Während die Elektrodenabstände beim hybriden Schalten mit beweglichen Kontakten im Mikrometer-Bereich liegen, werden bei festen Elektroden Abstände zwischen 0.8 und 2.4 mm verwendet. Dies führt dazu, dass eine Erfassung sowohl des Lichtbogens als auch des Plasmas in der Nachstromphase bei festen Elektroden technisch erheblich leichter zu realisieren ist. Dabei stehen sowohl für die Fotografie mit Hochgeschwindigkeits-Videokameras als auch für die Emissionsspektroskopie größere Untersuchungsbereiche mit entsprechend hoher Strahlungsintensität für die Charakterisierung zur Verfügung.

Im Gegenteil dazu sind beim hybriden Schalten mit beweglichen Elektroden die erreichten Elektrodenabstände und damit Lichtbogenlängen viel kürzer. Das räumlich eingeschränktere Plasma und die oft geringere Helligkeit insbesondere während der Nachstromphase sind bei der optischen Emissionsspektroskopie nur mit relativ langen Belichtungszeiten erfassbar (mehrere 100 μ s). Dies steht jedoch im Widerspruch zum angestrebten schnellen Schalten. Aufgrund dieser spezifischen Situation soll die Hochgeschwindigkeits-Fotografie möglichst gestärkt eingesetzt werden, wobei hierfür spezielle Filter mit Transmission im Bereich der spektroskopisch beobachteten Linien verwendet werden sollen (insbesondere für die Ag I Linien bei 520 sowie 547 nm).

Weiterhin deuteten die Messergebnisse auf die Notwendigkeit hin, möglich alle auftretenden Ströme und Spannungen gleichzeitig zu registrieren. Hierbei ergibt sich insbesondere für den Strom an den Kontakten die Schwierigkeit, dass sowohl hohe Ströme während der Durchfluss- und Stromphase (~ 100 A) als auch viel geringere Ströme in der Nachstromphase (mA) über den selben Pfad fließen, dass ihre Erfassung gleichzeitig mit zwei verschiedene Messsonden sowie die mögliche Übersteuerung einer dieser Sonden impliziert. Darüber hinaus ist die Erfassung der Spannung an evtl. eingesetzten Überspannungsschutzvaristoren (bis einige kV) sowie deren Strom (einige A) vorteilhaft.

Es ist zu beachten, dass die erforderlichen atomaren Kupfer-Resonanzlinien im UV-Bereich zwischen 320 und 330 nm liegen. Derartige Untersuchungen erfordern einerseits die Verwendung UV-transparenter Kammerwände, andererseits einen geeigneten spektroskopischen Aufbau. Eine intensive, breitbandige Quelle zur Erzeugung von UV-Strahlung stand mit einer speziellen Xe-Blitzlampe zur Verfügung.

Bestimmung des Wiederverfestigungsverhalten der Schaltstrecke (AP 3.2.1)

Das Arbeitspaket wurde anhand verschiedener Messkampagnen sowohl in den eigenen Laboren als auch beim Projektpartner Dehn abgearbeitet. Die Messkampagnen verteilen sich über der Projektdauer ab Juni 2021 bis Juli 2023. Ergebnisse der durchgeführten Experimente wurden in den entsprechenden

Projekttagen zeitnah vorgestellt sowie teilweise in den jeweiligen Veröffentlichungen publiziert [20], [21], [22].

Abschnitt C: Experimente mit Modellschalter des INP (bewegliche Elektroden)

Der im AP2.2 beschriebene Modellschalter des INP (Abbildung 2.65) wurde zur Durchführung verschiedener Experimente und für die Charakterisierung des hybriden Ausschaltverhalten genutzt. Dies wird im Folgenden näher erläutert.

C1- Messtechnische Aufzeichnung des Bewegungsablaufs bei Kontakttrennung

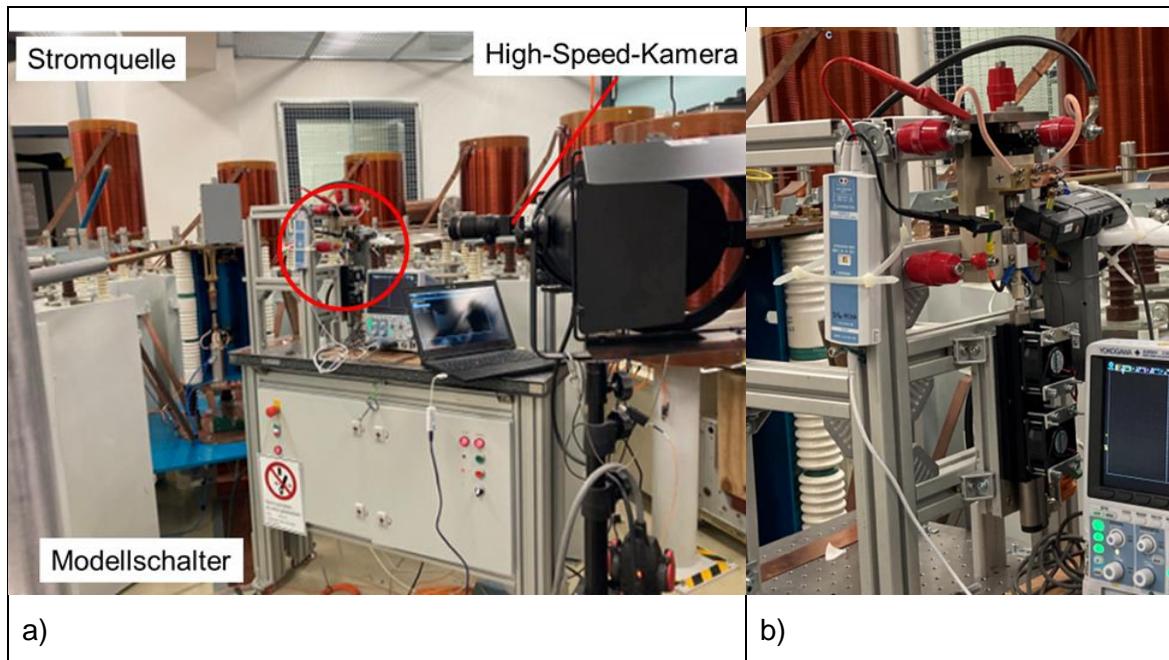


Abbildung 2.49: Modellschalter des INP. a) Fotografische Aufnahme des Modellschalters gekoppelt an den Hochstromgenerator (Stromquelle) und sonstige Aufzeichnungsgeräte im Labor des INP. b) Vergrößerung des Kontaktbereichs. Einige der Aufzeichnungssonden für Strom und Spannung sowie der Linearmotor mit Kühlkörper (unten) sind im Bild zu erkennen.

Konsolidierte Aufzeichnungen des Zeitverlaufs der Kontaktöffnung, der daraus berechneten Geschwindigkeit und Beschleunigung des beweglichen Kontakts sind in der Abbildung 2.50 dargestellt.

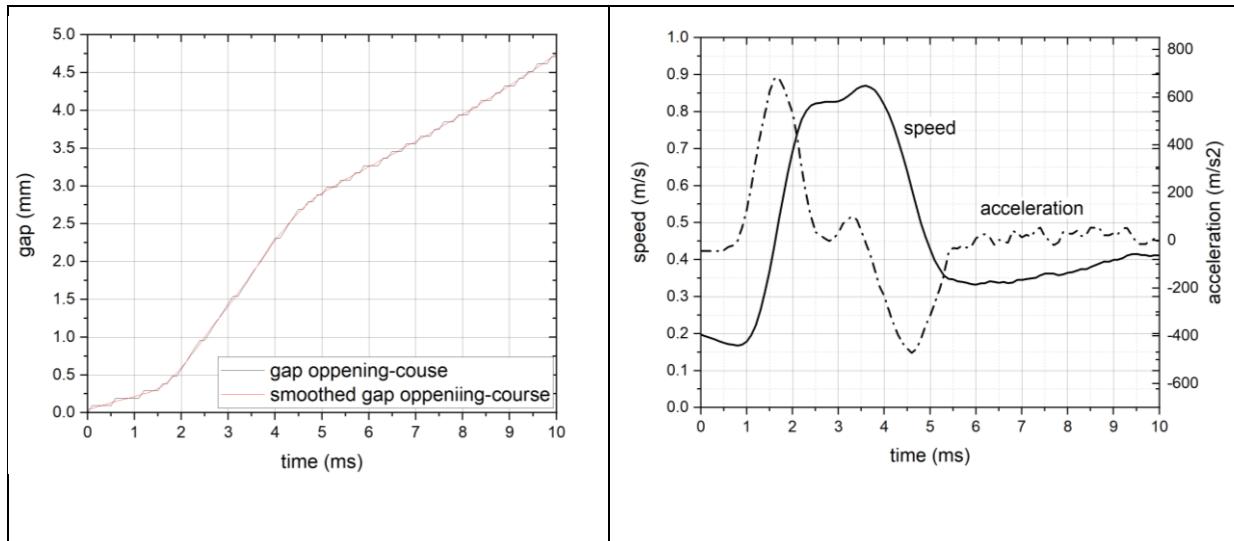


Abbildung 2.50: Links: aufgezeichnete Elektrodenabstand (gap). Rechts: resultierende Geschwindigkeit der Kontaktbewegung (gezogene Linie) und abgeleitete Beschleunigung der Kontaktbewegung bei maximaler dynamischer Kraft des Linearmotors (gestrichelte Linie).

Aus Abbildung 2.50 ist zu erkennen, dass während der ersten 2 ms eine maximale Geschwindigkeit von ca. 0.8 m/s erreicht wird. Die maximale Beschleunigung hierbei liegt an der oberen Grenze des Linearmotors (ausgenommen Sicherheitsausschaltung durch Überlastung). Die erreichte Geschwindigkeit liegt damit bei einem Kontaktabstand von ca. 500 µm im Bereich der bei realen Schaltern angestrebten Geschwindigkeit. Zwar könnten mit dem verwendeten Linearmotor prinzipiell noch deutlich höhere Geschwindigkeiten erreicht werden, es wäre dafür aber eine viel längere Bewegungsstrecke notwendig. Diese würde jedoch außerhalb der bei realen Hybrid-Schaltgeräten verwendeten Kontaktöffnungen liegen. Insgesamt erfüllt der Modellschalter in etwa die Öffnungszeiten für hybrides Schalten in der vorgesehenen Kategorie und konnte entsprechend für die weiteren Untersuchungen genutzt werden.

C2- Messtechnische Erfassung des hybriden Schaltverhaltens des Modellschalters

Für die Bestimmung des hybriden Schaltverhaltens wurden zunächst Experimente unter Verwendung des in Abbildung 2.51 dargestellten elektrischen Kreises und verschiedener optischer Mess- und Aufzeichnungsgeräte (Kamera, Spektrometer) durchgeführt.

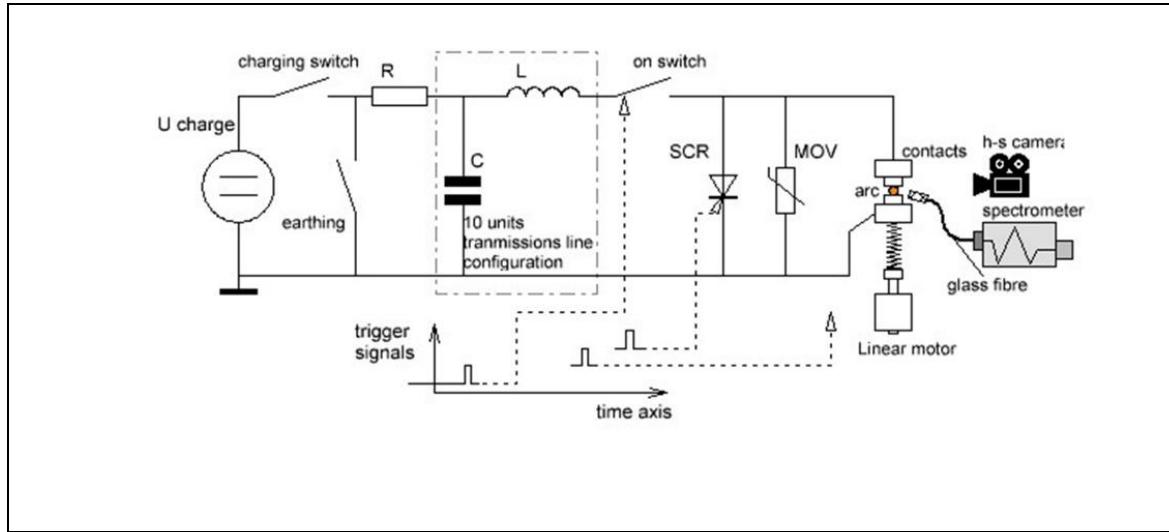


Abbildung 2.51: Stromkreis zur Untersuchung des hybriden Schaltverhalten am INP-Modellschalter [20].

Für die Erzeugung eines (gepulsten) Gleichstroms wurde ein Schwingkreisstromgenerator des INP in der Kettenleiter-Konfiguration genutzt. Dieser Generator kann rechteckförmige DC-Strompulse unterschiedlicher Dauer liefern, die Stromamplitude kann grundsätzlich über die Ladespannung der Kondensatoren eingestellt werden. Da im Projekt eine Spannungsebene bis 850 V DC bei doppelter Kontaktunterbrechung vorgesehen war, wurde die maximale Ladespannung der Kondensatoren für den INP-Modellschalter auf 500 V begrenzt. Um trotzdem verschiedene Stromamplituden zu erreichen, wurde der Generator jeweils neu konfiguriert. Es könnten Strompulse von 20 ms, 10 ms und 5 ms geliefert werden, welche bei einer Ladespannung von 400 V respektive maximale Stromamplituden von 80 A, 160 A und 300 A erreichen. Ströme höher als 300 A wurden später bei ausgewählten Experimenten durch höhere Ladespannungen bis 600 V geliefert. Ein Beispiel der resultierenden Strom- und Spannungscharakteristiken bei hybrider Schaltung mit dem INP-Modellschalter ist in Abbildung 2.52 gezeigt.

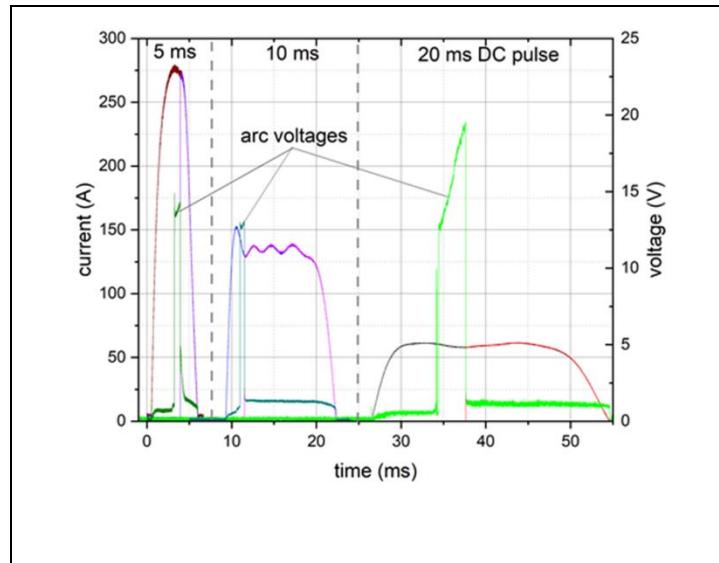


Abbildung 2.52: Charakteristische Verläufe vom Generator - DC-Strompulse bei konstanter Ladespannung in den drei verschiedenen Konfigurationen.

Für das hybride Schalten wurde parallel zur Schaltstrecke ein Hochstromthyristor eingebaut, der zu einem beliebigen Zeitpunkt vor bzw. während des Öffnungsvorgangs getriggert werden kann. Dadurch ist eine Stromkommutierung auf den Halbleiter verbunden mit dem Abschalten des Strompfades über die bogenbehaftete Kontaktstrecke zu erwarten.

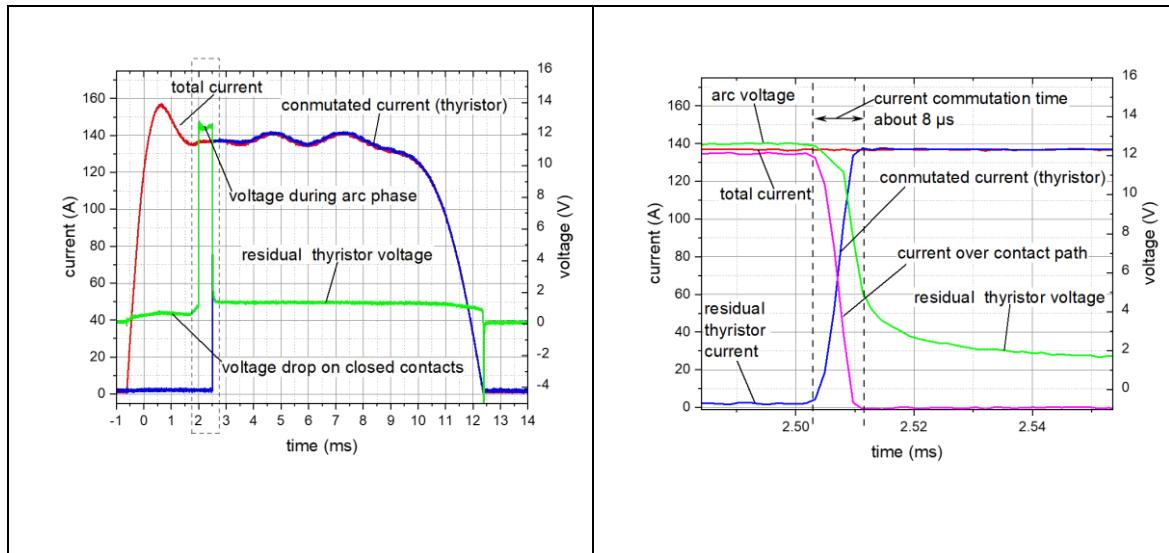


Abbildung 2.53: Beispiel der gemessenen Strom- und Spannungsverläufe beim hybriden Schalten mit dem INP-Modellschalter. Links: Gesamtstrom (rot), Spannung über der Schaltstrecke (grün), über den Thyristor kommutierter Strom (blau). Die Bogenphase wird im gestrichelten Kasten hervorgehoben. Rechts: Vergrößerung des Kommutierungsbereiches. Hierbei können die Vorgänge bei der Kommutierung durch die Verringerung des Stromes durch die Kontakte (Magenta) und den zunehmenden Strom über den Thyristor (blau) zum Spannungsverlauf (grün) zugeordnet werden.

Um etwaige Überspannungen im Kreis aufzufangen, z.B. infolge Stromabriß bei Bogenlöschung oder Versagen des Thyristorzweigs, wurde ein Metall-Oxid-Varistor

(MOV) parallel zur Kontaktstrecke angeschlossen. Abbildung 2.53 zeigt ein Beispiel der charakteristischen Strom- und Spannungsverläufe sowie des Kommutierungsvorgangs. Die Dauer des Kommutierungsvorgangs liegt im Bereich vom 8 µs und wird überwiegend durch die parasitäre Induktivität der Stromzuführung bestimmt. Industriell gefertigte Schalter erreichen kleinere Werte, sind aber erheblich kompakter und bieten weniger optischen und elektrischen Zugriff für Untersuchungen.

C3- Optische und Spektroskopische Charakterisierung des Bogens beim hybriden Schalten

Das Erscheinungsbild der Bogenphase beim hybriden Schalten ist in Abbildung 2.54 anhand von Videoaufnahmen und der zugehörigen Strom- und Spannungsverläufe dargestellt. Anhand des im Abbildung 2.50 dargestellten Öffnungsvorgangs ist ersichtlich, dass bei einer Bogenphase von 1 ms (oder kürzer) höchstens Kontaktabstände im Bereich von 100 µm erreicht werden können. Dies beschränkt den optischen Zugang zur Entladung erheblich, sowohl für Kameraaufnahmen aber insbesondere für die Durchführung spektroskopischer Messungen.

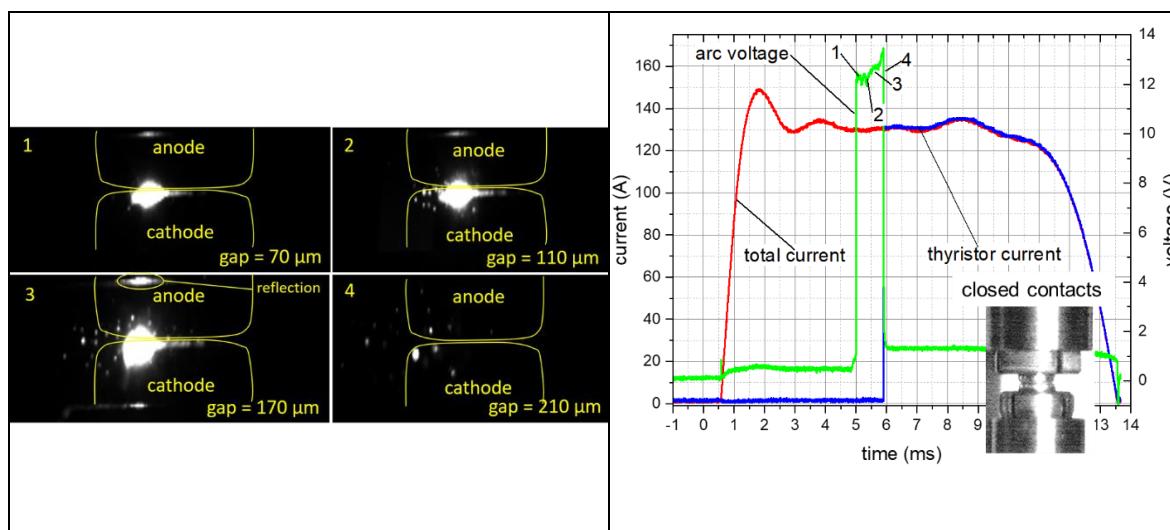


Abbildung 2.54: Links: Zusammenstellung von 4 Bildern (200 ns Belichtungszeit) während eines hybriden Schaltvorgangs mit dem Modellschalter, aufgenommen zu den Zeitpunkten 1 bis 4. Rechts: Zugehörige Verläufe von Strom (rot), Spannung (grün), Kommutierungsstrom (blau) sowie die Aufnahmezeitpunkte 1-4 und eine Aufnahme des geschlossenen Kontaktpaars.

Unter Verwendung verschiedener Spektrometer wurde der Lichtbogen charakterisiert. Hierbei wurden schrittweise sowohl kompakte Glasfaser-Spektrometer ohne Ortsabbildung als auch abbildende Spektrometer eingesetzt. Abbildung 2.55 zeigt ein Beispiel des charakteristischen Spektrums während der Bogenphase aufgenommen mit einem Kompaktspektrometer.

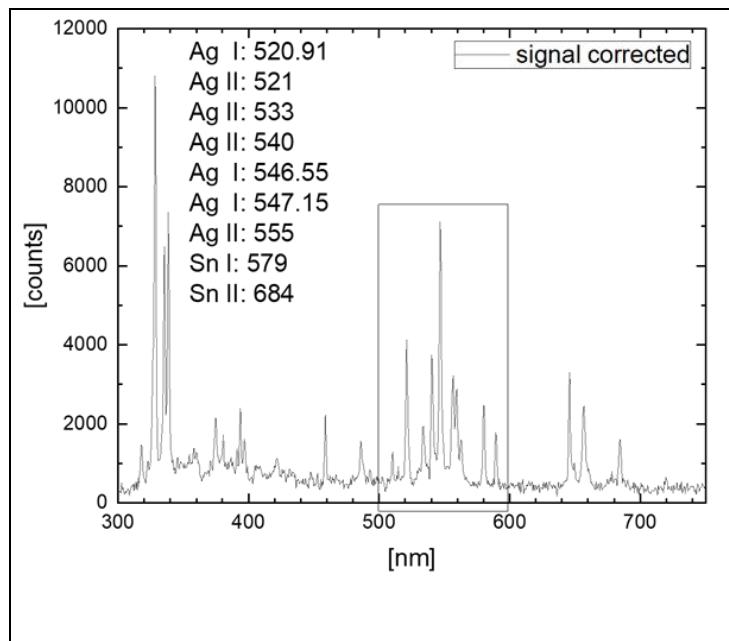


Abbildung 2.55: Spektrale Verteilung der Bogenstrahlung beim hybriden Schalten während und nach der Bogenphase für bewegliche AgSnO-basierte Kontakte.

Das Spektrum umfasst sowohl die Strahlung während der Bogenphase (150 A, 1 ms Dauer) als auch in der Kommentierung- und Nachstromphase (Restplasmagas) bis zum Ende des Stromflusses nach ca. 8 ms. Charakteristische Linien von Silber (Ag) sowie Zinn (Sn) wurden beobachtet und anhand der NIST-Datenbank [23] zugeordnet. Dieses qualitative Ergebnis ermöglichte die Abschätzung der dominierenden Plasmakomponenten (bei Berücksichtigung von Übergangswahrscheinlichkeiten und Energieniveaus der Linien). Da die dominierenden Spezies auf die Elektrodenmaterialien zurückgeführt werden können und nur vergleichsweise geringe Intensitäten von Komponenten der Umgebung (Luft) beobachtet wurden, kann von einem rein metallischen Plasma ausgegangen werden. Dies ist eine Konsequenz des sehr kleinen Kontaktabstands während der Bogenphase beim hybriden Schalten.

Kürzere Belichtungszeiten in μs -Bereich ermöglichen es bei weiteren Untersuchungen, nur die Strahlung während der Bogenphase bzw. nur während der Kommutierungsphase und nach Stromnull zu erfassen. Dafür wurde ein abbildender 0.5 m Spektrometer ausgerüstet mit einer ICCD-Kamera (PI-MAX 4) angewendet, welcher jedoch am optischen Strahlgang mit einer Glasfaser samt Kollimationsoptik ausgerüstet wurde. Diese ermöglichte durch die vorhandenen Gitter eine viel feinere Auflösung des ausgewählten Spektralbereiches. Hierbei ergaben die gewonnenen Verläufe ähnliches Speziesmuster, jedoch mit stärkerem Rauschanteil insbesondere für die Kommutierungsphase bzw. nach Stromnull. Abbildung 2.56 zeigt einige Beispiele für den Spektralbereich zwischen 520 und 560 nm, welcher in Abbildung 2.55 durch ein Rechteck markiert ist.

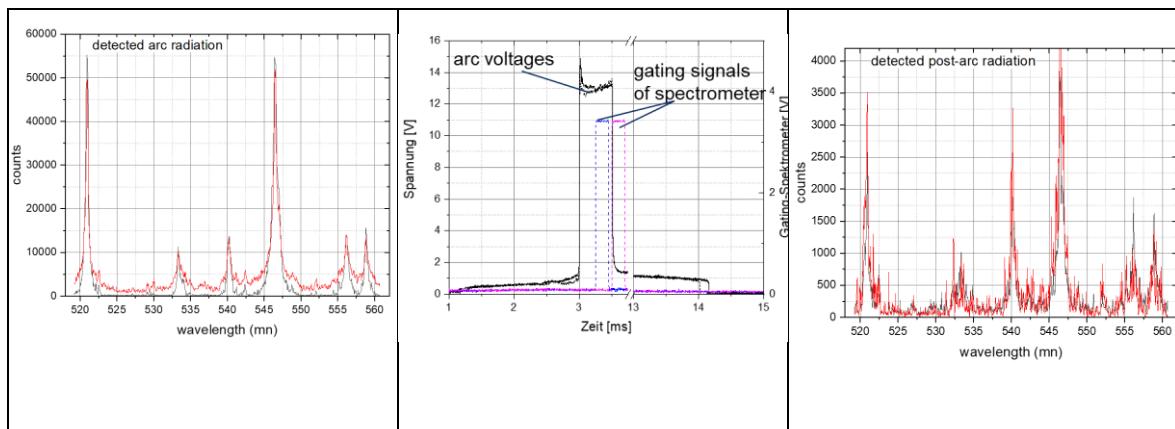


Abbildung 2.56: Spektren hybrider Schaltlichtbögen (Bogendauer 300 μ s, Strom 150 A, Belichtungszeit der ICCD-Kamera 100 μ s). Links: Spektren der Lichtbogenphase. Rechts: Spektren während der Kommutierungs- und Nachstromphase. Bild-Mitte: Spannungsverläufe und zugehörige Belichtungszeit der Spektrometerkamera (gestrichelte blaue und Magenta Linien).

Ergebnisse verschiedener Tests haben gezeigt, dass mit dem vorhandenen Gerät ein auswertbares Spektrum nach der Bogenphase nur während des Stromabklingens bei der Kommutierung zu detektieren war. Dies weist auf ein starkes Abklingen der Temperatur vom Rest-Plasmagas hin, welches eine experimentelle Bestimmung seine Eigenschaften erschwert. Hierbei sollen nebst den auswertbaren Ergebnissen während der Stromabklingphase auch theoretische Ansätze zur Dateninterpretation und zu Bestimmung der Eigenschaften des Rest-Plasmagas angewendet werden.

Weitere spektroskopische Messungen wurden mit einem abbildenden 0.5 m-Spektrometer samt ICCD-Kamera (PIMAX2) und abbildende Strahlungsoptik durchgeführt. Unter Verwendung verschiedener Gitter wurden der Wellenlängenbereich zwischen 380 und 900 nm untersucht. Abbildung 2.57 links zeigt 3 Spektren mit unterschiedlicher spektraler Auflösung (unter Verwendung von Gittern mit 150, 600 und 1200 Linien je mm). Es wurde insbesondere der Bereich zwischen 510 und 560 nm mit sehr hoher Auflösung erfasst. Um genügend Signalintensität zu erhalten, waren mindestens 100 μ s Belichtungszeit notwendig, so dass im Prinzip die Strahlung während der Bogenphase detektiert wurde.

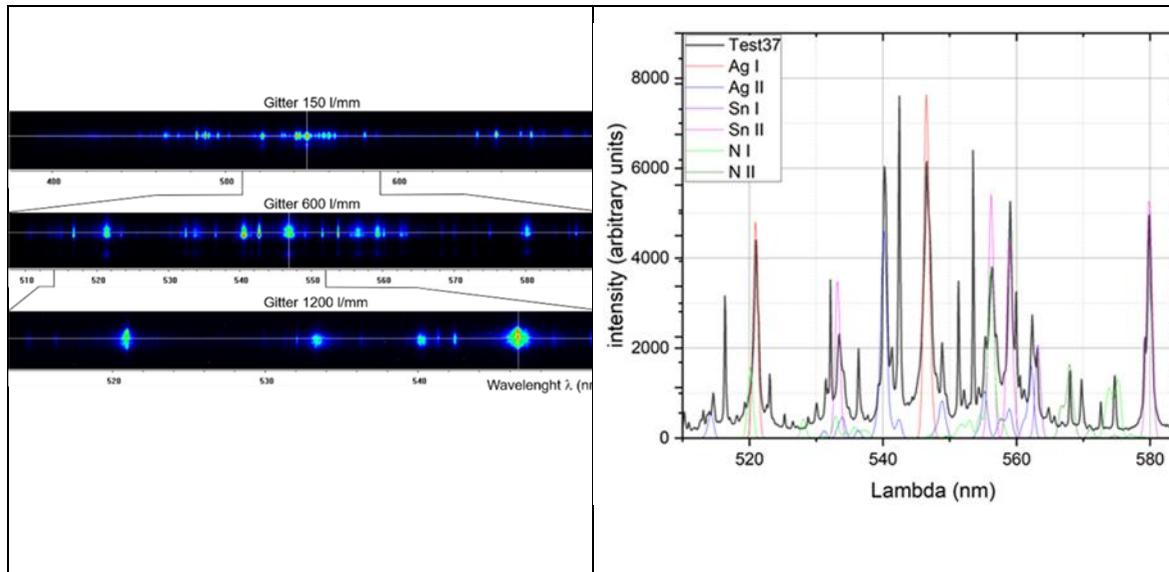


Abbildung 2.57: Links: Bogenspektren bei 300 A mit verschiedenen Gittern (150, 600 und 1200 l/mm) bei Belichtungszeiten von 75 µs, 200 µs und 500 µs. Die gesamte Bogendauer betrug jeweils 500 µs. Rechts: Vergleich eines mit dem 600 l/mm-Gitter gemessenen Spektrum mit dem errechneten Spektrum unter Verwendung des LIBS-Simulationstools des NIST [23].

Wie die spektroskopischen Messungen aufweisen, lässt sich für die Bogenphase ein Metalldampfplasma überwiegend aus Silber annehmen. Zur Temperaturabschätzung wurde demzufolge ein Spektrensimsationswerkzeug des National Institute for Standards and Technologie (NIST) angewandt, dass für LIBS bzw. laser-induced breakdown spectroscopy entwickelt wurde. Für ein Metalldampfplasma bestehend aus Ag 96 %, Sn2 % und Luft 2 %, ergeben sich bei Verwendung des LIBS-Tool Werte für die Elektronentemperatur von $Te=1.35$ eV (äquivalent zu etwa 14 800 K) und für die Elektronendichte von $Ne=1.1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Diese können als ein ungefährer Ausgangspunkt für den weiteren zeitlichen Temperaturverlauf während der Kommutierungs- und Nachstromphase angesehen werden. Dies ist für die Bestimmung des Verhaltens der elektrischen Leitfähigkeit der Kontaktstrecke maßgeblich.

C4: Erfassung des Wiederverfestigungsverhalts der Kontaktstrecke unter Verwendung einer Nebenstromquelle

Zur Erfassung des Wiederverfestigungsverhalts der Kontaktstrecke wurde eine DC-Spannungsnebenquelle (bis 1000 V) verwendet, welche einen Messstrom im mA-Bereich in die Kontaktstrecke einspeist. Abbildung 2.58 zeigt schematisch den nun ergänzten elektrischen Kreis. Das Vorgehen beruht auf Arbeiten von [24]. Die hochohmige Nebenquelle hat die Aufgabe, das Restgas mit einem kleinen und nahezu konstanten Strom zu beladen, so dass der Widerstand der Strecke in der Nachstromphase ermittelt werden kann. Der hochohmige Charakter der Quelle mit 100 kΩ Widerstand begrenzt den Maximalstrom und verhindern eine Wiederzündung des Bogens zwischen den Kontakten.

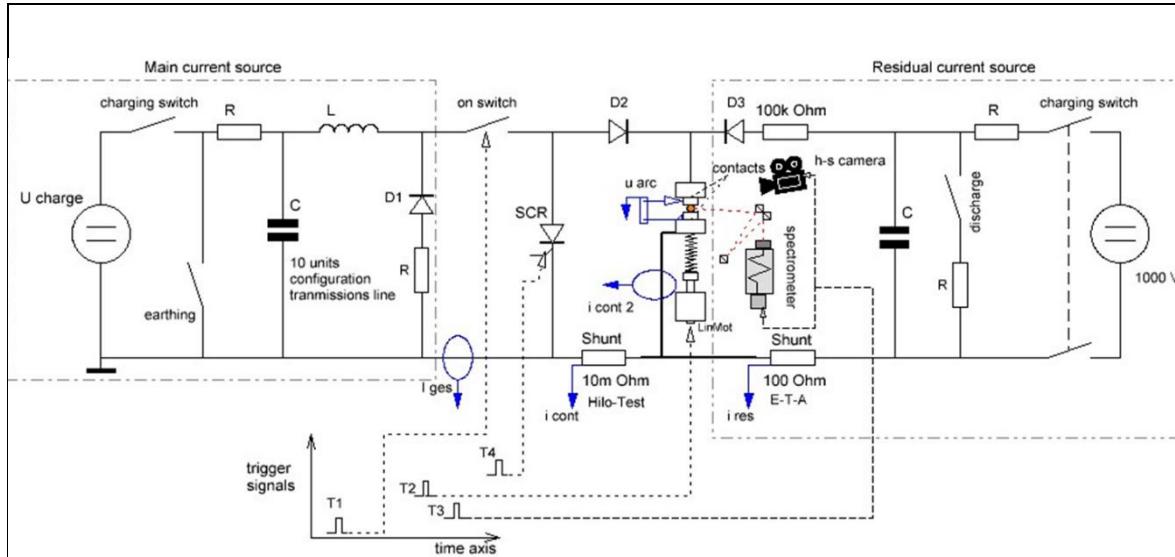


Abbildung 2.58: Schematische Darstellung des elektrischen Kreises beim hybriden Schalten mit dem Nebenkreis zur Einspeisung eines Messstroms (rechter Schaltungsteil).

Zur Erfassung der Ströme an verschiedenen Zweigen des elektrischen Kreises wurden zusätzliche Strom- sowie Spannungssonden angebracht.

Ein Beispiel der gemessenen Ströme und Spannungen ist in Abbildung 2.59 dargestellt, die entsprechende Zuordnung der Messgrößen wird in Abbildung 2.60 verdeutlicht.

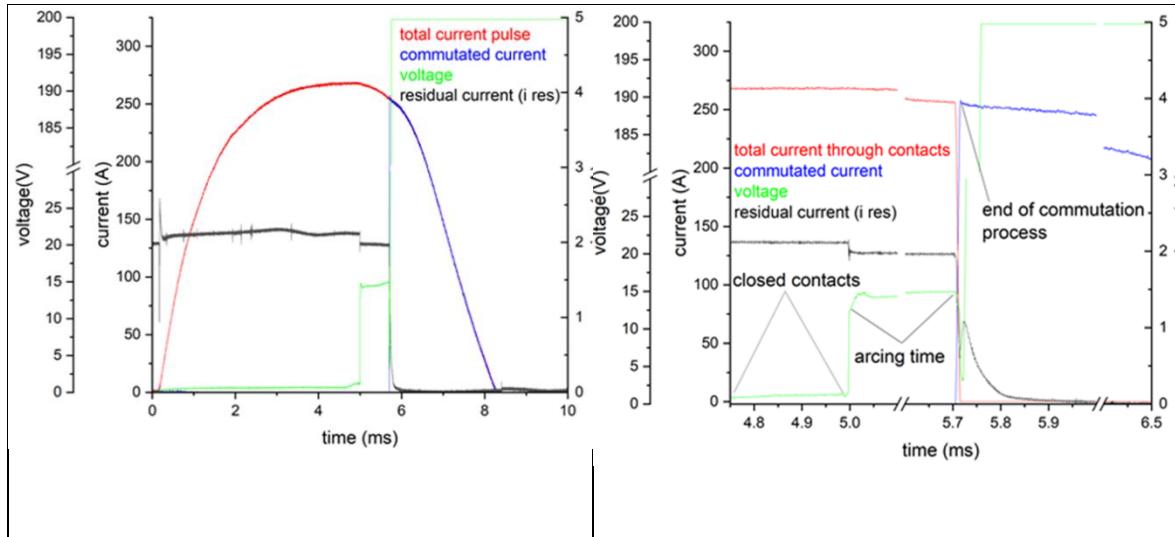


Abbildung 59: Spannungs- und Stromverläufe eines hybriden Schaltvorgangs für 270 A Bogenstrom bei 200 VDC Nebenkreisspannung sowie 2 mA Messstrom. Gesamtverlauf (links) sowie Ausschnitte während der Bogenphase und der post-arc Phase zur Verdeutlichung der Charakteristiken von Spannung und Messstrom (rechts).

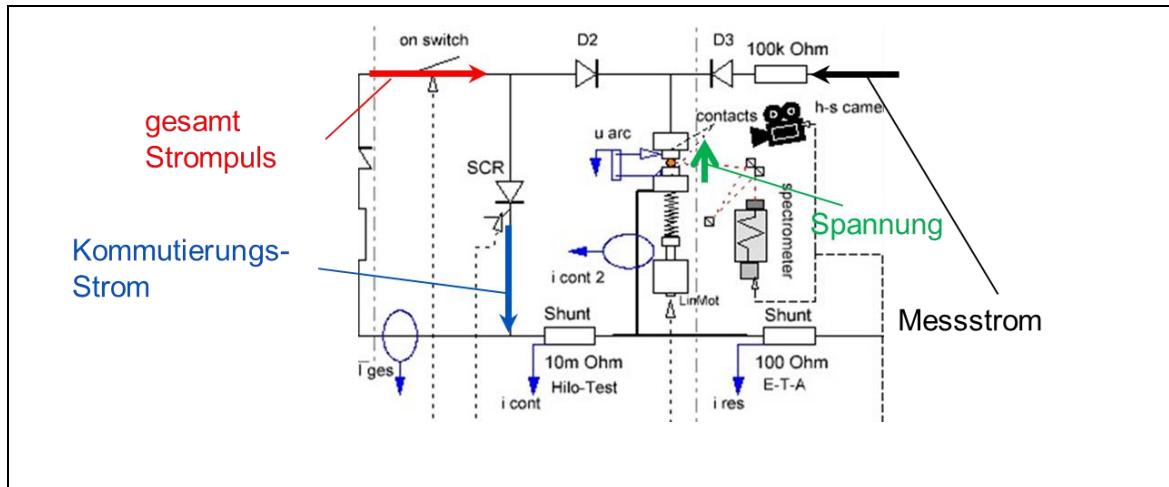


Abbildung 2.60: Verdeutlichung der gemessenen Ströme und Spannungen beim hybriden Schalten mit einer Nebenquelle zur Einspeisung eines Messstroms.

Anhand der Verläufe beim Ausschalten eines 350 A Bogens werden in der Abbildung 2.61 die entsprechende Darstellung vom Kommutierungsbereich und der dazugehörigen Charakteristik des Widerstandes von der Elektrodenstrecke exemplarisch gezeigt.

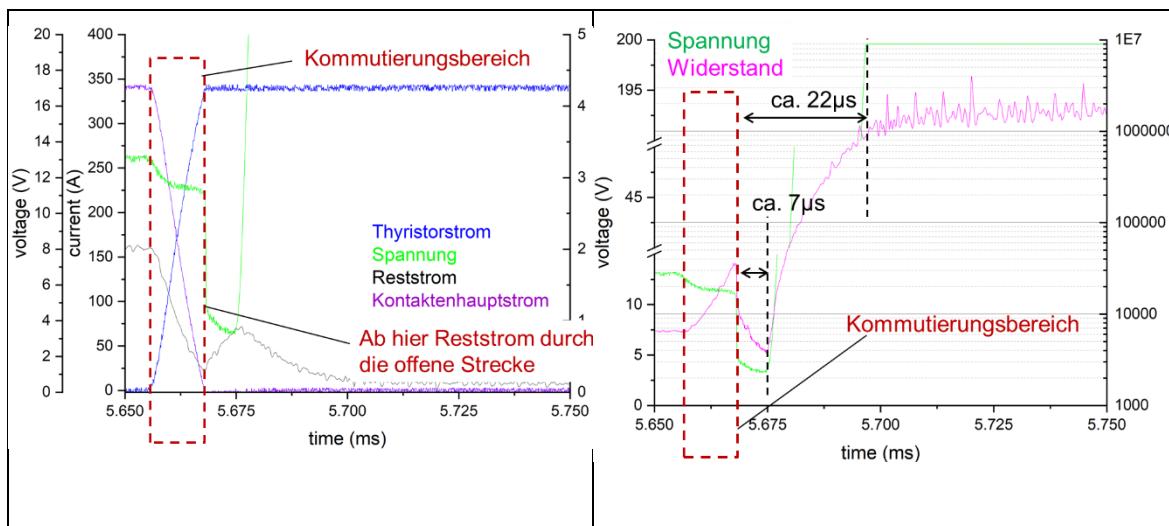


Abbildung 2.61: Links: Vergrößerung der elektrischen Verläufe um und nach Kommutierungsbereich. Rechts: Errechneter Widerstandsverlauf (gap resistance) um und nach dem Kommutierungsbereich in Bezug zur gemessenen Spannung.

Für den betrachteten Strombereich zwischen 200 A und 350 A ist zu erwarten, dass die vorherrschenden Plasmaeigenschaften nahezu gleich sind, so dass sich auch die Ausgangsbedingungen für die Nachstromphase nicht signifikant unterscheiden. Dies wurde durch Ergebnisse weiterer Untersuchungen bei Variation verschiedener Parameter bestätigt.

Einen eindeutigen Zusammenhang zwischen der Dauer der Bogenphase und dem Widerstandsverhalten konnte mit den Messungen nicht eindeutig festgestellt werden. Es konnte jedoch festgestellt werden, dass je länger die Bogenphase dauert, desto schneller erreicht der Widerstand Werte oberhalb von 100 k Ω .

Abschnitt D: Experimente mit Versuchskammer von Dehn (feste Elektroden)

Die allgemeinen Eigenschaften der Entladung wurden stets mit einer Hochgeschwindigkeits-Videokamera untersucht. Der Zündpunkt an der unteren Kante der linken Elektrode, die Bewegung des sich etablierenden Lichtbogens auf die parallelen Schienen hin zu einer mehr oder weniger stabilen vertikalen Position und die Plasmposition während der einige hundert Mikrosekunden andauernden Bogenentladung wurden beobachtet. Die mittlere Geschwindigkeit der Aufwärtsbewegung des Bogens beträgt etwa 2 m/s. Die Vergleichbarkeit aufeinanderfolgender Entladungen bei gleichen Bedingungen erscheint ausreichend. Unter Verwendung einer Spezialoptik, die den Strahlengang aufspaltet und beide Teilpfade auf den Kamerachip abbildet, lassen sich Bilder mit zwei unterschiedlichen Filtern gleichzeitig aufnehmen, wie sie in Abbildung 2.62 für zwei unterschiedliche Zeiten dargestellt sind (Falschfarbendarstellung, Kathode links und Anode rechts sind durch gestrichelte Linien markiert). Dabei ist jeweils das linke Teilbild empfindlich für die Emission der atomaren Kupferlinie Cu I bei 515 nm und das rechte für das atomare Sauerstoff-Triplett bei 777 nm.

Die Emission der Sauerstofflinien weist eine großflächige örtliche Verteilung auf und hat ihr Maximum in der Mitte zwischen den Elektroden. Im Gegensatz dazu ist die Emission der atomaren Kupferlinien viel stärker lokalisiert, wobei mehrere Maxima auftreten können die sich sehr nahe an der Anode befinden, ähnlich einem Anodenspot oder Jet ($\sim 100 \mu\text{m}$). Der intensivere Spot im rechten Teilbild ist der obere, der untere Anodenspot ist deutlich schwächer. Die Emission auf der Kathodenseite ist deutlich schwächer, ausgeprägte Kathodenfußpunkte werden nicht beobachtet.

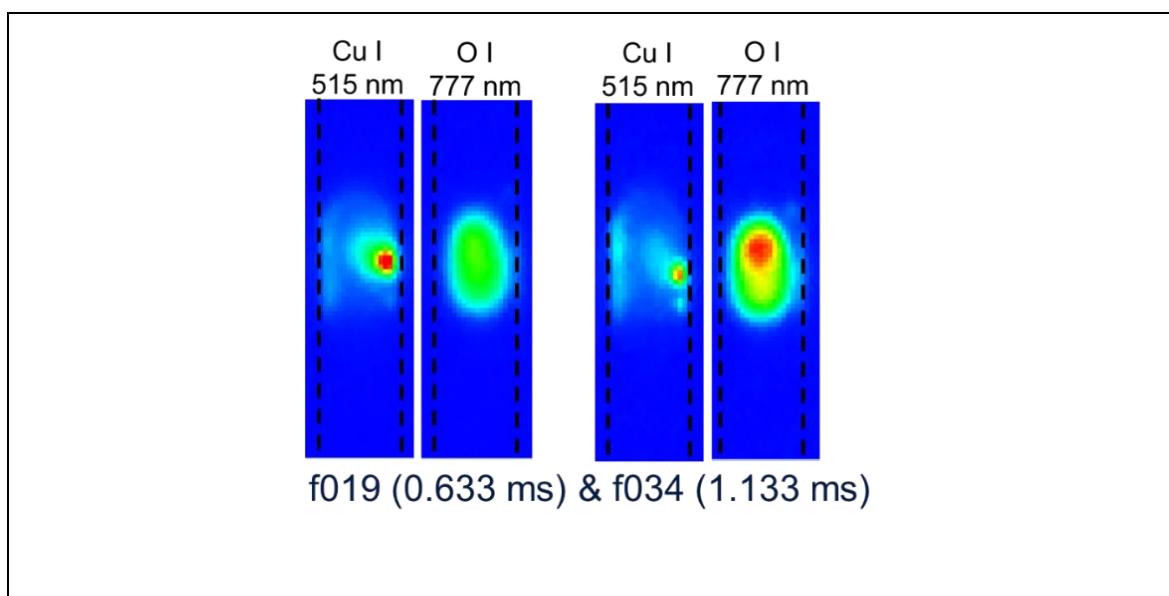


Abbildung 2.62: Ausschnitte einer Videosequenz mit Doppelbildern und paralleler Filterung der beiden Teilbilder für zwei Wellenlängenbereiche (Falschfarbendarstellung).

Zur Untersuchung der Plasmaeigenschaften wurde ortsabbildende Emissionsspektroskopie angewandt. Die Modellkammern können bei einem DC-Strom von 70 A über wenige 100 μ s maximal für wenige Dutzend Entladungen belastet werden. Die Modellkammern sind wahlweise mit Fenstern aus Polycarbonat oder Quarzglas ausgestattet. Bei Verwendung von Polycarbonat ist mit zunehmender Stromstärke und Bogendauer ein Wandabtrag zu erwarten.

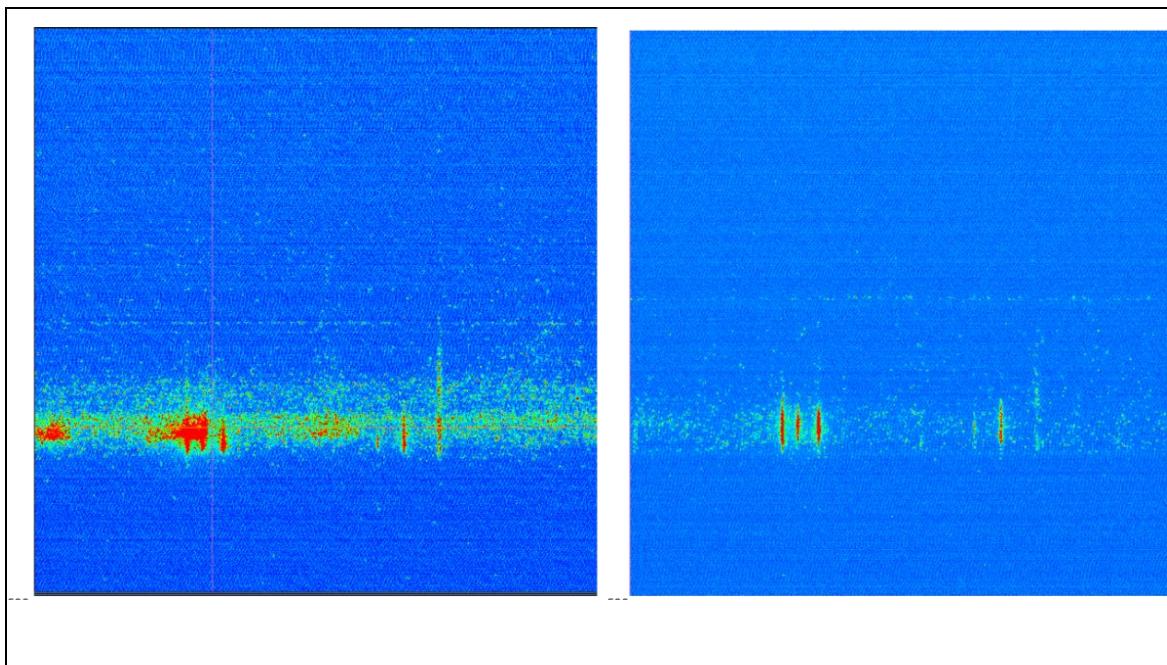


Abbildung 2.63: 2D-Übersichtsspektren für Entladungen in Modellkammern mit Polycarbonat-Fenstern und 1.6 mm Abstand zwischen Cu-Elektroden.

In Abbildung 2.65 sind Beispelspektren für Entladungen in Modellkammern mit Polycarbonat-Fenstern und 1.6 mm Abstand zwischen Cu-Elektroden dargestellt.

Entsprechende Beispelspektren kurz vor dem Beginn der Stromkommutierung und unmittelbar nach Stromnull (current zero) sind im linken Teil von Abbildung 2.66 für den Fall mit 1.6 mm Abstand dargestellt. Die beobachtete Linienstrahlung lässt sich im wesentlichen Atomlinien der Hauptkomponenten des Plasmas zuordnen. Neben den Luftbestandteilen Sauerstoff (Triplet O I 777 nm), Stickstoff (N I 742, 744, 746 nm) sowie dem Elektrodenmaterial Kupfer (Cu I u.a. 465, 510, 515, 522, 529, 570, 579, 793 nm) wird auch die Balmer-Serie von Wasserstoff (H I 656, 486, 434, 410 nm) beobachtet, jedoch keine Ionenlinien, was bereits auf nicht zu hohe Plasmatemperaturen hindeutet.

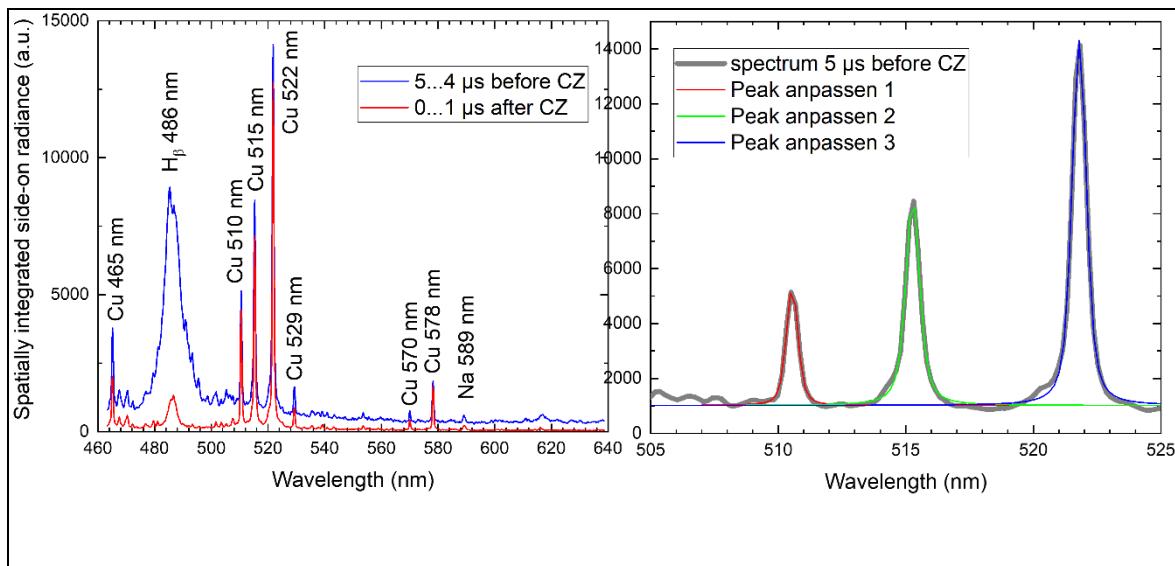


Abbildung 2.64: Links: Übersichtsspektrum unter Verwendung von Quarzfenstern kurz vor Beginn des Abschaltens (blau) und nach Stromnull (current zero, rot). Während die Intensität der Cu-Linien um 520 nm gering ist, verschwindet die Wasserstofflinie bei 486 nm fast vollständig. Rechts: Ausschnitt mit den für die Auswertung verwendeten Cu-Linien und angepasste Voigt-Profile. [25]

Zwei potentielle Quellen kommen für den Wasserstoff-Anteil im Plasma infrage: Die Restfeuchtigkeit in Luft sowie die Gefäßwand. Im Falle einer Dissoziation von Wasserdampf sollte die Emission von Beginn an vorhanden sein und die Intensität sollte während Entladungsdauer abnehmen. Wenn es sich um ein Abbrandprodukt des Fenstermaterials Polcarbonat handelt, sollte die Emission hingegen anfangs noch nicht vorhanden sein und die Intensität mit der Zeit zunehmen. Aufgrund der kurzen Entladungsdauer ist das anhand der vorliegenden Spektren nicht eindeutig zu klären. Ergänzende Videoaufnahmen mit H_α-Filter (656 nm) an Modellschaltern mit und ohne Quarzfenster zeigten aber eindeutig, dass das Wandmaterial hier keine Rolle spielt. Die in Abbildung 2.66 ebenfalls gekennzeichneten Linien Na I 589 nm und Li I 571 nm sind bei solchen Entladungen häufig zu beobachten und können als Spurenelemente für die weitere Untersuchung vernachlässigt werden.

Obwohl ein relativ großer Wellenlängenbereich gewählt wurde (460-640 nm), genügt die spektrale Auflösung der relevanten Linien für die nachfolgende Auswertung. Die Intensitätsverteilung und Plasma-Zusammensetzung variieren zeitlich und von Schuss zu Schuss; es lassen sich jedoch eine Reihe von Aussagen treffen, die sehr gut reproduzierbar sind. Das betrifft beispielsweise den viel stärkeren Intensitätsabfall der Wasserstoff-Balmerlinie H_β bei 486 nm (oberes Energieniveau 12.7 eV) im Vergleich der Spektren vor und nach Stromnull als bei Kupfer-Atomlinien, deren Anregungsenergie deutlich niedriger liegen (3.8 – 7.7 eV). Die variierende Relation der Cu-Linien ermöglicht eine Temperaturbestimmung. Eine Linienanpassung mit Voigt-Profil zur Bestimmung der Intensitäten (Fläche unter Kurve) ist im rechten Teil von Abbildung 28 für drei Cu I-Peaks dargestellt.

Aufgrund unterschiedlicher oberer Energieniveaus der Linie Cu I 510.55 nm von 3.82 eV gegenüber den 6.19 eV der Linien bei 515.32 nm und 521.82 / 522.01 nm (lassen sich zusammenfassen) ist anhand des Intensitätsverhältnisses eine einfache Temperaturbestimmung möglich (2-Linienmethode, ein Spezialfall des Boltzmann-Plots). Für das dargestellte Beispiespektrum 5 µm vor Stromnull (CZ) ergeben sich je nach verwendetem Liniene paar 10 000 K (510:515 nm) bzw. 10 700 K (%10:522 nm). Für das Spektrum unmittelbar nach Stromnull (blaue Kurve im linken Teilbild) ergeben sich jeweils ca. 700 K weniger.

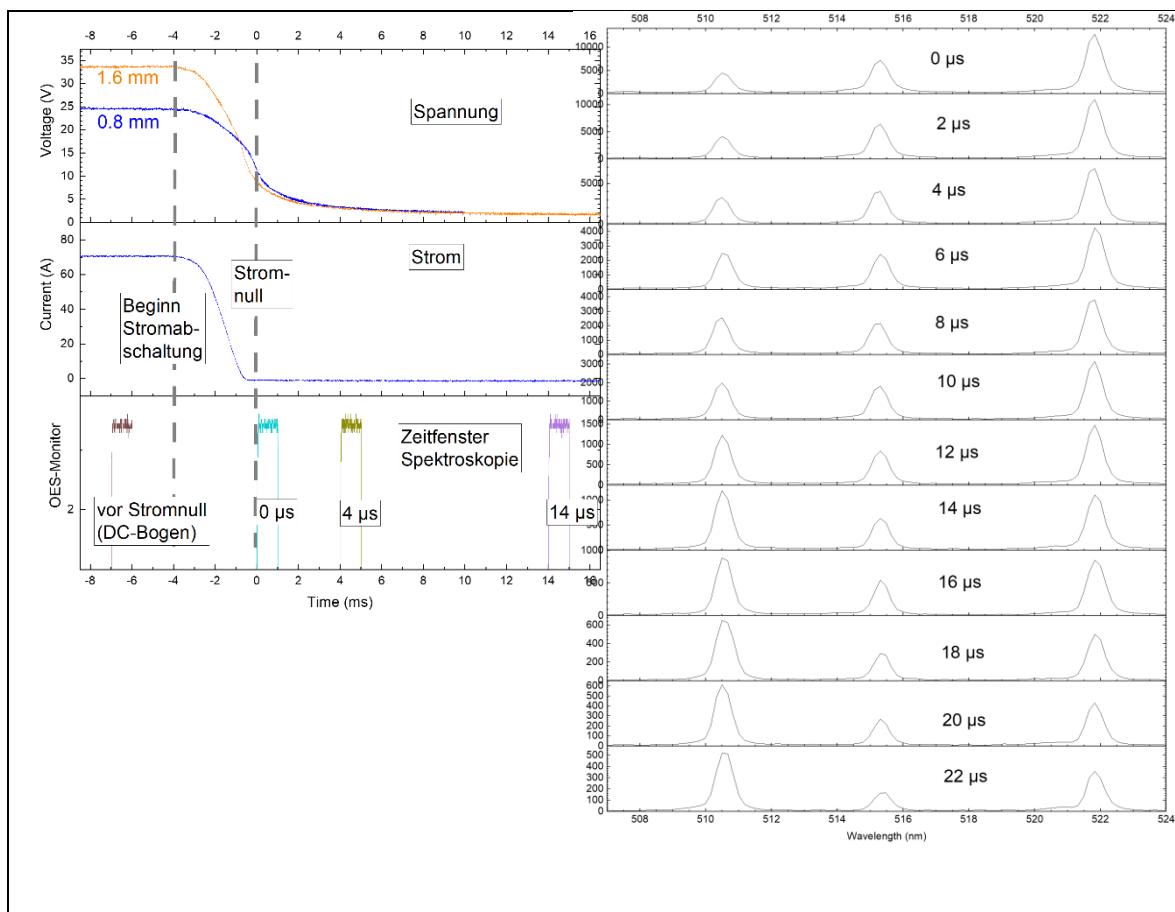


Abbildung 2.65: Zeitverlauf der elektrischen Messungen (links) und der Spektrenausschnitte im Bereich der für die Auswertung verwendeten atomaren Kupferlinien (rechts) [21].

Der für die Auslegung von hybriden Schaltern wichtige Zeitbereich um Stromnull wurde nachfolgend systematisch untersucht. Dazu wurden eine Reihe von Entladungen an einem Modellschalter mit 1.6 mm Elektrodenabstand durchgeführt. Die elektrischen Messungen sind im linken Teil von Abbildung 2.67 dargestellt, wobei die Zeitachse auf den Zeitpunkt Stromnull normiert ist. Die Dauer der Kommutationsphase des Halbleiterorschalters wird bei der Strommessung deutlich: Deutlich weniger als 4 µs vergehen zwischen Beginn der Stromabschaltung und tatsächlichem Stromnull. Betrachtet man die Zeit zwischen 90% und 10% (fall time), sind es sogar nur etwa 2.5 µs. Im Spannungsverlauf erscheint das Abklingen

deutlich langsamer, weil bei der Kontaktspannung auch über dem parallelgeschalteten Halbleiter gemessen wird. Im unteren Panel sind einige Beispiele für die Zeitfenster der optischen Emissionsspektroskopie dargestellt anhand der von der Kamera gelieferten Kontrollsignale. Das garantiert eine zuverlässige und sehr reproduzierbare Aufnahme einer Reihe von Spektren mit variierendem Abstand zu Stromnull, welche im rechten Teil von Abbildung 2.67 gezeigt werden. Mit zunehmendem zeitlichem Abstand von Stromnull (Spektrenabfolge von oben nach unten) fällt die Intensität der Kupferlinien um mehrere Größenordnungen. Im Vergleich der Linienintensitäten lässt sich gut erkennen, dass zunächst die (Doppel-)Linie bei 522 nm deutlich intensiver ist als die Linie bei 510 nm. Etwa 12-14 μ s nach Stromnull sind beide Linienintensitäten gleich groß, im weiteren Verlauf dominiert die 510 nm-Linie immer mehr. Da das obere Energieniveau bei Cu I 510 nm niedriger liegt, kann daraus unter Annahme lokalen thermischen Gleichgewichts (LTE) bereits eine sinkende Plasmatemperatur abgeleitet werden. Die Linienintensität bei 515 nm beträgt in Übereinstimmung mit den entsprechenden Übergangswahrscheinlichkeiten jeweils rund die Hälfte derer bei 522 nm.

So ist zu erkennen, dass die Intensität der Atomlinien bei 515 nm bzw. 522 nm nach etwa 50 μ s stark vom Rauschsignal des Detektors überlagert werden. Unabhängig davon ist zu erkennen, dass die Intensität der Kupfer-Atomlinie bei 510 nm zwar weiterhin abnimmt, aber bis zu einer Zeit von etwa 100 μ s nach Stromnull detektierbar bleibt.

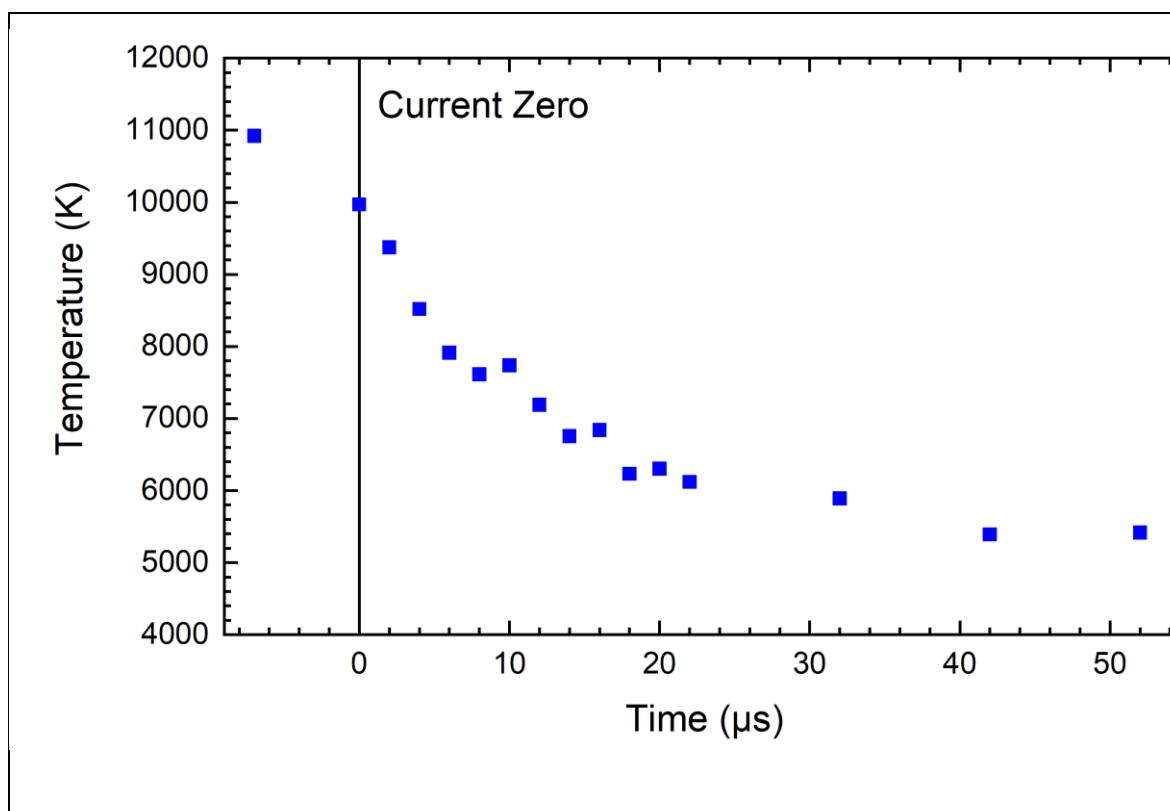


Abbildung 2.66: Zeitlicher Verlauf der Plasmatemperatur bestimmt mittels 2-Linienmethode an Kupfer-Atomlinien [21].

Die ermittelten zugehörigen Plasmatemperaturen sind in Abbildung 2.69 über die Zeit bezüglich Stromnull aufgetragen. Ausgehend von Werten nahe 11 000 K während des Gleichstrombogens (DC, vor Abschalten) sinkt die Temperatur innerhalb einiger 10 μ s auf Werte von etwa 6000 K nach 20-30 μ s. Dieser Bereich ist zugleich auch als Limit aufzufassen, d.h. die nachfolgenden Werte, die einen deutlich langsameren Temperaturabfall zwischen etwa 20 und 50 μ s nach Stromnull bzw. eine Stabilisierung bei Werten zwischen 5000 und 6000 K suggerieren, weisen eine zunehmende Messunsicherheit wegen der relativ schwachen Linie bei 522 nm auf. Im Bereich oberhalb 6000 K liegt die absolute Genauigkeit der Temperaturbestimmung besser als 1000 K, für den relativen relativer Verlauf kann ein deutlich niedrigerer Wert abgeschätzt werden (200 K). Die Analyse weiterer Cu-Atomlinien sowohl dargestellten Übersichtsspektrum als auch im Bereich der Resonanzlinien um 330 nm, zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den obigen Erkenntnissen: Je niedriger das obere Energieniveau der Linie, desto länger nach Stromnull ist sie detektierbar. Daran kann gefolgert werden, dass die Plasmatemperatur im weiteren Verlauf zw. 50 μ s und über 100 μ s noch weiter sinkt. Eine Abschätzung ergibt Werte oberhalb von 4000 K nach 100 μ s, eine Quantifizierung ist anhand der vorliegenden Emissionsspektren jedoch nicht möglich.

Der Einfluss mehrerer Parameter auf das Abklingverhalten der Plasmatemperatur wurde untersucht. Dabei zeigt sich, dass die optische Emissionsspektroskopie zwar eine Reihe von Vorteilen hat wie das berührungslose Messen, die Unabhängigkeit von elektrischen Messungen und von der Annahme örtlicher Verteilungen von Teilchen- und Stromdichte, dass aber auch methodisch bedingte Nachteile auftreten. Das betrifft die kritische Empfindlichkeit der Spektroskopie bezüglich der Linienemission sowie damit einhergehend eine mangelnde zeitliche und örtliche Auflösung der realisierbaren Messungen. Im Fall kleinerer Elektrodenabstände von 0.8 mm verläuft das Abklingen nach aktuellem Erkenntnisstand deutlich schneller als bei 1.6 mm – ein ausreichend reproduzierbarer Temperaturverlauf lässt sich nicht bestimmen. Im Fall eines größeren Elektrodenabstands von 2.4 mm, bei dem deutlich höherer Energieumsatz und mehr Elektrodenerosion auftritt, werden qualitativ deutlich längere Abklingzeiten beobachtet.

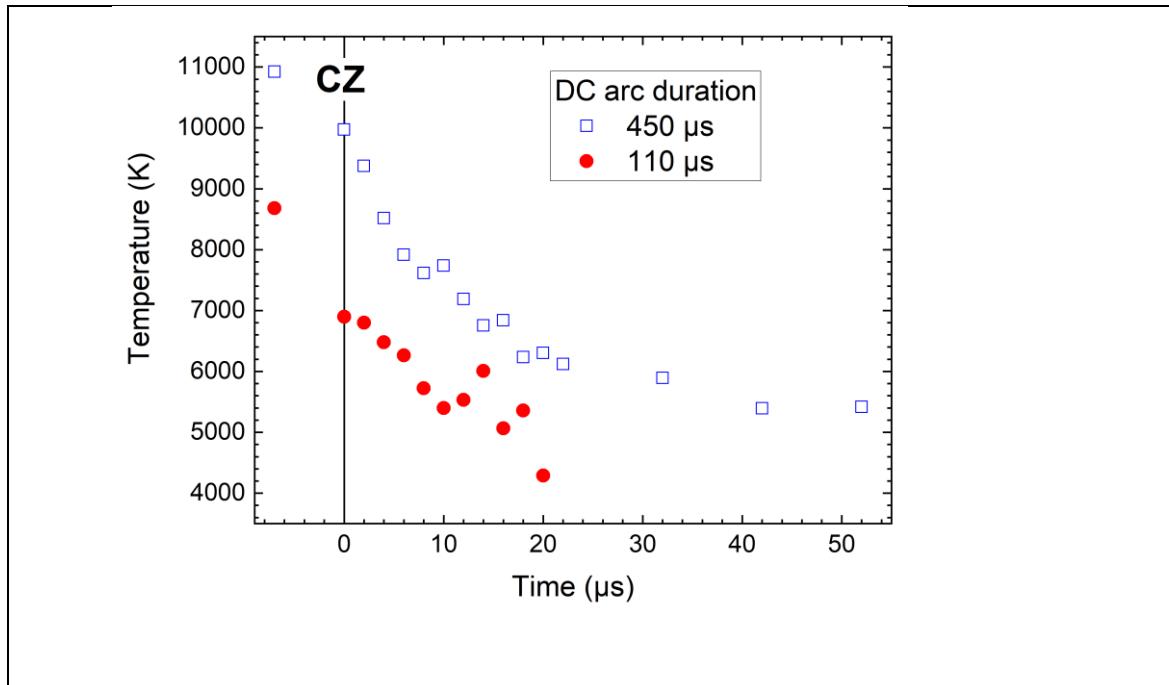


Abbildung 2.67: Temperaturverlauf um Stromnull. [25]

Weiterhin wurde eine unterschiedliche Belastung der Elektrodenstrecke untersucht, indem die Dauer des Gleichstrombogens vor dem Abschalten von rund 450 μ s auf ca. 110 μ s verringert wurde (Abbildung 2.70). Der Vergleich der aus den Linienvorhältnissen berechneten Plasmatemperaturen zeigt bereits für den DC-Wert eine geringere Temperatur unterhalb 9000 K – eine Folge geringeren Energieeintrags während der verkürzten Bogenphase. Entsprechend fällt auch nach dem Abschalten des Entladungsstroms die Temperatur erheblich schneller und erreicht bereits nach rund 10 μ s Werte um 6000 K. Bei den vorliegenden Spektren ist das Signal-Rausch-Verhältnis etwas günstiger und die Nachweisgrenze liegt eher bei rund 5000 K, sie wird nach weniger als 20 μ s erreicht. Ein möglichst schnelles Abschalten des Folgestromlichtbogen mittels Halbleiterschalter lohnt sich also insofern, dass die Abklingphase des Lichtbogens bezüglich der Plasmatemperatur erheblich verkürzt wird. Damit verknüpft sollte eine schnellere Wiederverfestigung der Bogenstrecke sein, weshalb der Halbleiterschalter früher abgeschaltet und kostengünstiger dimensioniert werden kann.

Für die Wiederverfestigung der Bogenstrecke spielen neben der Gastemperatur noch weitere Parameter eine Rolle. Das betrifft insbesondere die Metalldampfdichte, die neben der Temperatur wesentlich in die Leitfähigkeit eingeht. Zur Abschätzung der nach dem Abschalten vorhandenen Dichte an Kupferatomen wurden weitere spektroskopische Untersuchungen durchgeführt, in diesem Fall Absorptionsmessungen.

AP 3.3: Validierung und Ermittlung der Kennfelder

Im AP 3.2 wurden umfangreiche Untersuchungen zum hybriden Schalten von DC-Strömen unter Verwendung zweier unterschiedlicher experimenteller Anordnungen durchgeführt: Zum einen am INP-Modellschalter mit beweglichen Kontakten und zum anderen an der Dehn-Funkenstrecken-Anordnung mit festen Elektroden und Laufschiene. Hierbei unterscheiden sich die erfassten Verhaltensweisen des Schaltlichtbogens und Restplasmagas (post-arc) sowohl durch die Elektrodenmaterialien als insbesondere auch durch das für den Lichtbogen zur Verfügung stehende Volumen, welches nicht nur die optische Zugänglichkeit, sondern auch die Detektierbarkeit der Plasmastrahlung maßgeblich beeinflusste. Für die hybride Dehn-Funkenstrecke mit festen Abständen von bis zu einige mm konnten sehr gute und auswertbare Informationen zur Bestimmung des Plasmazustands und des Wiederverfestigungsverhaltens der Schaltstrecke einschließlich neuer Ansätze für seine Detektion erreicht werden.

Demgegenüber stellten die sehr kurzen Lichtbögen beim hybriden Schalten mit beweglichen Kontakten (im Bereich 100 µm) sowohl im umgebauten realen Schalter von E-T-A als auch mit dem INP-Modellschalter eine große Herausforderung dar. In diesem Fall war die Strahlungsintensität nur während der Bogenphase und nur unter Einstellung sehr langer Detektionszeiten für die Spektrometer-Kameras erfassbar. Dabei ist diese vergleichbar mit der Dauer des eigentlichen hybriden Bogens. Darüber hinaus war für das Restplasmagas eine Detektion nur mit Faser-Spektrometern (ohne räumliche Auslösung) möglich und wiederum mit sehr langen Belichtungszeiten realisierbar. Dies verhinderte selbst eine ungefähre Abschätzung der zu erwartenden Temperaturabsenkung des Restplasmagas nach Stromnull und machte die Bestimmung der Wiederverfestigungsverhalten unmöglich. Die Temperaturverlauf konnte ansatzweise anhand zusätzlicher Experimente unter Verwendung eines Messstroms über den Widerstand der Elektrodenstrecke abgeschätzt werden. Zusätzlich wurden die Ergebnisse des mathematischen Modells zur näherungsweisen Bestimmung der Leitfähigkeit der Kontaktstrecke benutzt, um deren Verlauf während der Nachstromphase zu bestimmen und daraus Schlussfolgerungen für die Ermittlung von Richtwerten für die Schaltelektronik gewinnen zu können.

Erarbeitung der Kennfelder für die Schaltzeitpunkte der Hybridelektronik in AP 4 und AP 7

Für die vom INP erarbeitenden Ansätze zur Bestimmung der Schaltzeitpunkte der Hybridelektronik kommt nur die Schaltvariante "mit Lichtbogen" in Frage, da im Wesentlichen die optischen Eigenschaften des Lichtbogens untersucht wurden. Wie bereits erwähnt, konnten die Eigenschaften des Restplasmagas mit ausreichender

Genauigkeit und in Abhängigkeit von der Zeit nur bei den Messungen mit festen Elektrodenstrecke bei der Modellanordnung des Projektpartners Dehn ermittelt werden. Für die Modellschalter mit beweglichen Kontakten werden die Ergebnisse der Messung der Wiederverfestigung unter Anwendung einer Nebenquelle in Kombination mit theoretischen Ansätzen genutzt, um die Abhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit von der Temperatur des Restplasmagas in der Elektrodenstrecke zu bestimmen. Im Folgenden werden die Ergebnisse dieser Analyse für die jeweiligen Modellanordnungen dargelegt.

Das Hauptziel ist die Bestimmung der minimal notwendigen On-Zeit der Hybridelektronik (IGBT, Thyristor, MOSFET) in Bezug auf die jeweiligen Belastungsparameter (Stromamplitude, Lichtbogendauer, wiederkehrende Spannung bzw. Einschwingspannung). Da diese Zeit auch erheblich von der Geometrie sowie Öffnungsgeschwindigkeit der Kontakte im realen Schalter abhängig ist, dienen die Ergebnisse vom Modellschalter als Orientierung für eine spätere Anwendung in realen Schaltern und sollten für diese an die entsprechenden Gegebenheiten experimentell angepasst werden.

Bestimmung der dielektrischen Leitfähigkeit des Restplasmagases:

Basierend auf den Ergebnissen der Messungen mit einer Nebenspannungsquelle und eingespeistem Messstrom wurde aus dem zeitlichen Verlauf des Widerstands der Elektrodenstrecke die zugehörige Entwicklung der elektrischen Leitfähigkeit berechnet. Die fehlenden Parameter wie Widerstandslänge und Querschnitt wurden ausgehend vom Ohmschen Gesetz und unter Annahme eines rotationszylindrischen Modells für den Widerstand der Elektrodenstrecke bestimmt. Für die Länge des Widerstands wurde der gemessene Weg-Zeitverlauf der Kontaktstrecke und als Querschnitt die gesamte Elektrodenfläche verwendet. Das verwendete Modell dient zweckmäßig zur Ermittlung der Leitfähigkeit nur nach der Bogenphase. Die ermittelten Werte für die Bogenphase oder beim geschlossenen Kontakten können nur annähernd grob die realen Werte der Bogenleitfähigkeit oder seine Temperatur andeuten. Für die Nachstromphase lässt sich der Stromfluss verteilt über die gesamte Elektrodenfläche anzunehmen, da hierbei keine lokalen Fußpunkte vorzufinden sind und aufgrund der hohen thermischen Leitfähigkeit und wegen der vergleichsweisen großen Massen der Elektroden- und Elektrodenhalter eine schnelle und homogene Elektrodenabkühlung zu erwarten ist. In Abbildung 2.73 wird ein Beispiel der Konduktanz per Längeneinheit (Siemens/m) über die Zeit, wie es sich aus den gewonnenen Verläufen berechnet, dargestellt.

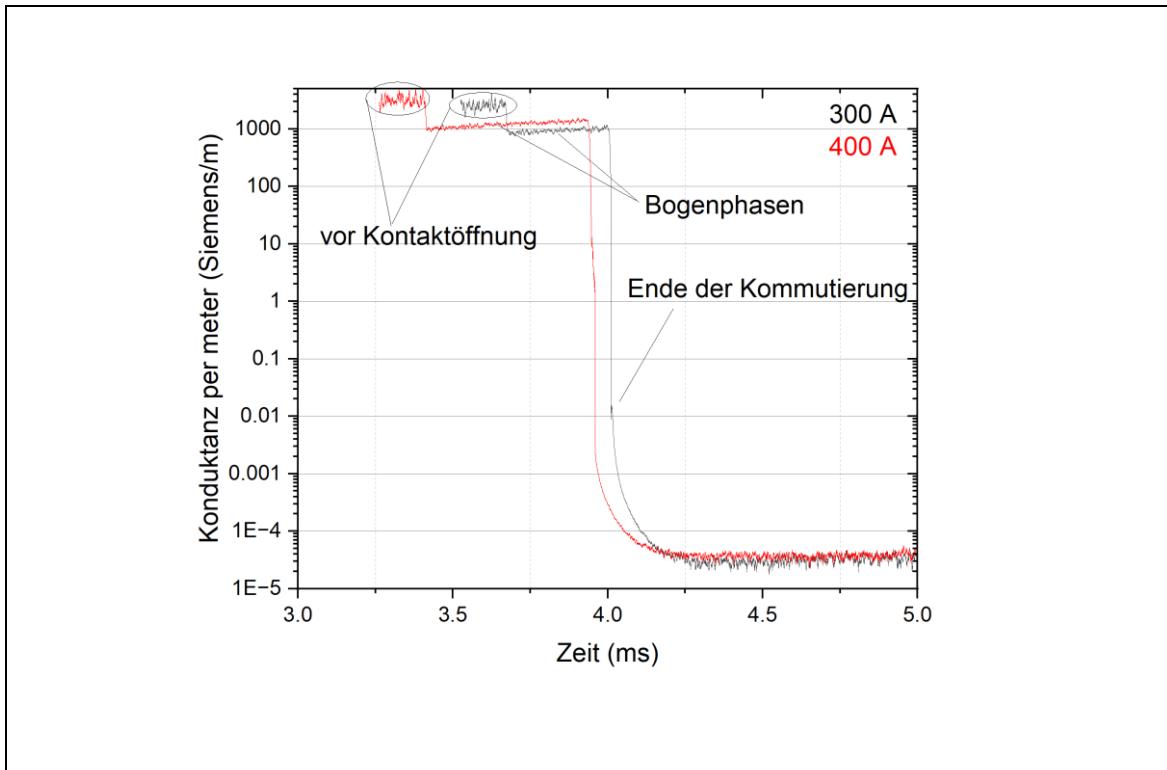


Abbildung 2.68: Beispiel - Errechnete Konduktanz per Längeneinheit der Elektrodenstrecke unter Nutzung der Nebenspannungsquelle bei Annahme einer zylindrischen Widerstandsstrecke. Die Bereiche vor Kontaktöffnung sowie während der Bogenphasen würden zur Zuordnung der Phasen bei hybrid Schalten eingetragen.

Unter Berücksichtigung der experimentell bestimmten spektralen Verteilungen während der Bogenphase, welche für die realisierten Kontaktstrecken (wenige 100 μm Länge) auf ein nahezu rein metallisches Metalldampfplasma hinweisen, wurde anhand des im Rahmen von AP5 entwickelten Entladungsmodells die elektrische Leitfähigkeit für ein hundertprozentiges Metalldampfplasma aus dem Elektrodenmaterial (Ag/SnO₂) bei einem Druck von 1 bar für Temperaturen zwischen 500 und 20000 K berechnet. Das Ergebnis ist im Abbildung 2.74 auf einer halblogarithmischen Achse dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die elektrische Leitfähigkeit mit sinkender Temperatur sehr schnell abnimmt, insbesondere zwischen 5500 K und 5000 K um eine, zwischen 5000 K und 2500 K bereits um mehr als vier Größenordnungen.

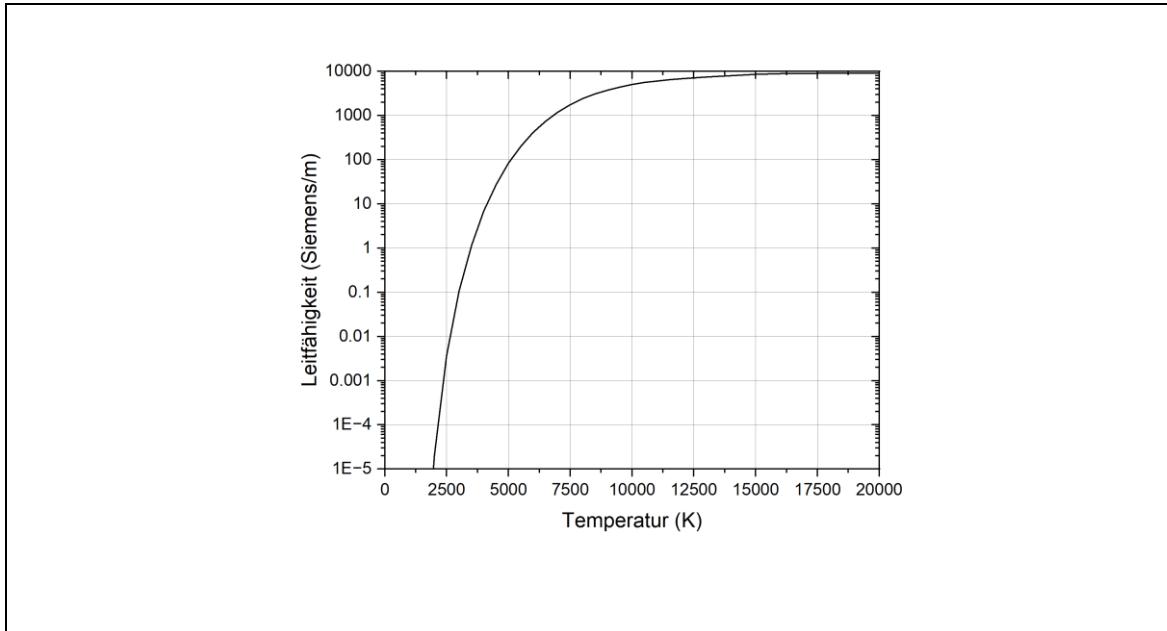


Abbildung 2.69: Berechnete Leitfähigkeit für Metalldampfplasma (Annahme basierend auf den spektroskopischen Untersuchungen mit Ag/SnO₂ Elektroden beim hybrid Schalten).

Mit dem Wissen um die aus dem Modell berechnete Temperaturabhängigkeit der elektrischen Leitfähigkeit (Abbildung 2.74) können im folgenden Schritt die aus den Experimenten mit Nebenquelle ermittelten zeitabhängigen Konduktanz (bzw. Leitfähigkeiten) verwendet werden, um den zeitlichen Verlauf der Temperatur des Restplasmagases während und nach Ende der Kommutierungszeit abzuschätzen. Wie die Ergebnisse von der Spektroskopie während der Bogenphase zeigen, sollte die Elektronentemperatur des Lichtbogens bei einem maximalen Wert von etwa 15000 K liegen und für den Strombereich zwischen 200 und 400 A nahezu gleich sein. Dieser Wert entspricht dem Ausgangswert vom Temperaturverlauf der Leitfähigkeit unmittelbar am Ende der Bogenphase bevor die Kommutierung ansetzt.

Für die Bogenphase ergibt die angewandte Methode eine deutlich niedrigere Temperatur. Dabei sinkt die Temperatur vom Restplasmagas bereits innerhalb der Kommutierungszeit (ca. 10 µs) auf Werte zwischen 2500 K und 6000 K. Dies wurde durch eine Reihe von Experimenten bestätigt. In diesem Bereich ändert sich die elektrische Leitfähigkeit um einige Größenordnungen. Der weitere Verlauf wird hingegen durch die Amplitude des Messstroms bzw. die angelegte Spannung und die Länge der sich weiter öffnenden Kontaktstrecke bestimmt. Dies wird später weiter betrachtet.

Ferner wurde die kritische elektrische Feldstärke in Abhängigkeit von der Temperatur der anhand des Modells aus AP5 [26] für reinen Ag-Dampf und 1 bar Druck berechnet. Diese wird im Abbildung 2.92 mit halblogarithmischer Skale dargestellt. Die stärksten Änderungen in der kritischen Feldstärke treten zwischen

Raumtemperatur und ca. 2000 K auf; oberhalb 5000 K betragen die Veränderungen weniger als 10 %. Unter Verwendung der gemessenen Weg-Zeit-Kurven der Kontaktbewegung kann aus der berechneten Feldstärke der Verlauf der Ansatz-Durchschlagsspannung (nach Townsend) als Funktion der Zeit für den Modellschalter dargestellt werden.

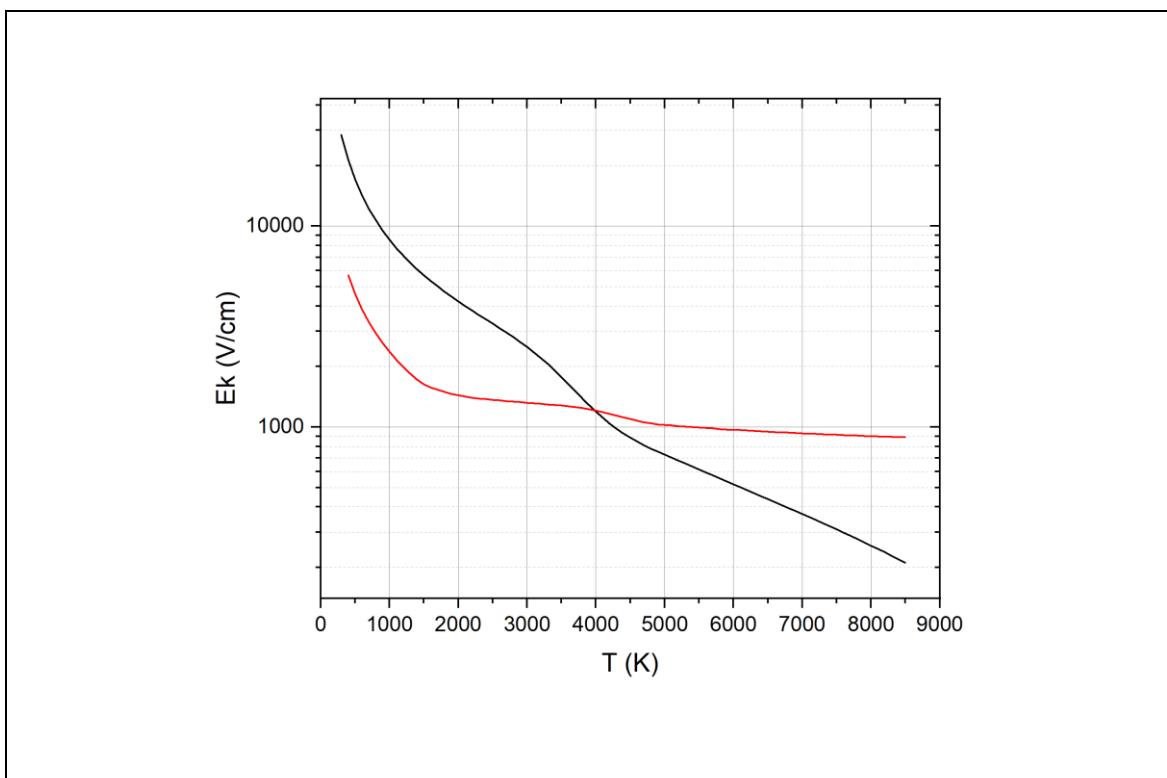


Abbildung 2.70: Berechneter Verlauf der kritischen elektrischen Feldstärke in Funktion der Temperatur für eines 100% Ag-Metalldampfgas bei 1 bar (rote Linie) im Vergleich mit der theoretischer Feldstärke vom Luft bei 1 bar (schwarze Linie).

Ein weiterer Einflussfaktor wird bei den erfolgenden kürzen Elektrodenabständen beim hybrid Schalten ($\sim 100 \mu\text{m}$) durch die Rauigkeit den Kontakt gespielt. Dabei kann die Kontaktstrecke nach der Kommutierungsphase mit sehr hohe elektrische Felder beim Eintreten der Wiederkehrende bzw. Einschwingspannung belastet werden, die im Größenordnung von mehrere KV/mm liegen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die verwendete Methode zur Bestimmung von Größenordnung und Verlauf der Temperatur des Restgasplasmas beim hybriden Schalten mit beweglichen Elektroden grundsätzlich anwendbar ist.

Zur Bestimmung der Wiederzündverhaltens weisen an der anderen Seite die Ergebnisse darauf hin, dass überwiegend die treibenden Nebenquellenspannung eine wichtige Rolle spielt. Diese kann annährend mit der in realen Anwendungen durch die wiederkehrende Quellespannung bzw. die Einschwingspannung verglichen werden.

Insgesamt lassen sich aus den gewonnenen Erkenntnissen beim hybriden Schalten mit beweglichen bzw. mit festen Kontakten folgenden Schlussfolgerungen ziehen:

- Es wurden sowohl für die Plasmatemperatur als auch die zugehörige Leitfähigkeit zeitliche Verläufe ermittelt, welche auf eine sehr schnelle Abkühlung in weniger als 10 µs erfolgen. Hierbei kann insbesondere für die Messungen mit beweglichen Kontakten eine Beeinflussung durch die Dauer der Kommutierungsphase zugeordnet werden. Diese konnten aufgrund der notwendigen Zuleitungslängen in den Experimentierzellen maximal auch ca. 10 µs reduziert werden. In realen Geräten werden viel kompaktere Stromzuleitungen aufgebaut, so dass eine schnellere Kommutierung in wenige µs realisierbar sein kann.
- Die Ermittlung der Plasmaeigenschaften und des damit verbundenen Wiederzündverhaltens beim INP-Modellschalter mit beweglichen Kontakten konnte aufgrund räumlicher und zeitlicher Beschränkung für die Spektroskopie nur indirekt über eine zusätzliche Nebenspannungsquelle und theoretische Überlegungen erfolgen. Die Ergebnisse geben trotzdem Aufschluss darüber, welche Größenordnung die Kontaktabstände betragen sollen, damit dem Wiederzündverhalten durch die Wiederverfestigung der Kontaktstrecke entgegengewirkt werden kann.
- In Bezug auf die angewandte Methode zur Bestimmung der Leitfähigkeit der Kontaktstrecke nach Stromnull konnte festgestellt werden, dass eingespeiste Messströme höher als 4 mA stets eine so intensive Aufheizung des Restplasmagases bewirkten. Dies kann für die realen Anwendungen in Bezug zu der erwarteten Einschwingsspannung gestellt werden.
- Bei der festen Kontakten verläuft die Wiederverfestigungsprozess ebenfalls in einem Zeitraum der Größenordnung von wenigen 10 µs. Die Plasmatemperatur wurde mittels Emissionsspektroskopie anhand atomarer Kupferlinien während der Bogenphase sowie in einer Reihe von Messungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach Stromnull ermittelt. Für Kupfer-Elektroden mit 1.6 mm Abstand, 70 A Bogenstrom und eine Entladungsdauer von ca. 450 µs konnte der zeitliche Verlauf gut bestimmt werden, wobei die (örtlich gemittelte) Temperatur von etwa 11 000 K während der Bogenphase innerhalb des Kommutationszeitraums von 2-3 µs bereits um 700 K abnimmt und im weiteren Verlauf innerhalb etwa 30 µs bis auf Werte um 6000 K sinkt. Intensitätsbedingt liefert die Methode Werte bis zu etwa 5000-6000 K.
- Kürzere Bogenentladungen bewirken nicht nur eine geringere Elektrodenbelastung und Materialerosion, sondern weisen auch eine signifikant geringere Bogentemperatur vor dem Abschalten auf (ca. 9000 K nach ca. 11 µs Bogenentladung). In der Folge sinkt die Plasmatemperatur deutlich schneller und erreicht innerhalb etwa 10 µs bereits Werte um 6000 K.
- Die Wiederverfestigung basiert im Wesentlichen auf der sehr schnell sinkenden Temperatur des Restgases, die die Leitfähigkeit um mehrere Größenordnungen sinken lässt. Ausgehend der erwarteten Zusammensetzung bei 1 bar wurde der zeitliche Verlauf der Leitfähigkeit nach Stromnull ermittelt.

2.4 AP 4 - Auslegung der Hybridelektronik und Testmessungen

2.4.1 E-T-A:

Im **AP. 4** wird die Steuerung der Hybridelektronik ausgelegt und an die spezifischen Anforderungen der Messtechnik des INP und des EGA sowie an die Anforderungen des schaltgerätenahen Demonstrators der E-T-A angepasst. In Zusammenarbeit von E-T-A und EGA werden der Leistungsteil der Hybridelektronik angepasst und ein wirkungsvoller Überspannungsschutz zum Schutz der Hybridelektronik entwickelt. Steuerungs- und Leistungsteil der Hybridelektronik werden anschließend kombiniert und am Modellschalter aus **AP. 2.3** angebracht. Der nun komplettierte Hybrid-Modellschalter wird in Betrieb genommen und getestet. Abschließend werden in diesem Arbeitspaket die Messserien zum statischen und dynamischen Schaltverhalten des Hybrid-Modellschalters durchgeführt. Die auf diese Weise am Modellschalter entwickelte Hybridelektronik wird dann in **AP. 7** in ein Demonstrator schaltgerät integriert.

In **AP. 4.1** wird von E-T-A in Zusammenarbeit mit EGA und INP die Steuereinheit der Hybridelektronik entwickelt und als Platinenaufbau realisiert. Die Steuereinheit ist als Auswerte- und Ansteuerungseinheit das zentrale Bindeglied zwischen der Messtechnik zur Erfassung der Größen der Schaltstrecke und dem Leistungsteil der Hybridelektronik. Dabei gilt es, die Anforderungen der Messtechnik (INP und EGA), der Leistungshalbleiter, der Modellschalter inkl. der Ablaufsteuerungen (EGA und INP) sowie des schaltgerätenahen Demonstrators (E-T-A) des **AP. 7** umzusetzen. Hauptsächlich hat E-T-A neben der Festlegung der Anforderungen in **AP. 4.1.5** die Steuerplatine dimensionieren, entwerfen, entflechten sowie die Leistungsplatine und als modularen Prototyp für mehrere Versionen in **AP. 4.1.5** erstellt und gefertigt.

Der Demonstrator kann nach [13] aufgegliedert werden in Komponenten. Eine vereinfachte Darstellung des verwendeten Demonstrators zeigt Abbildung 2.71.

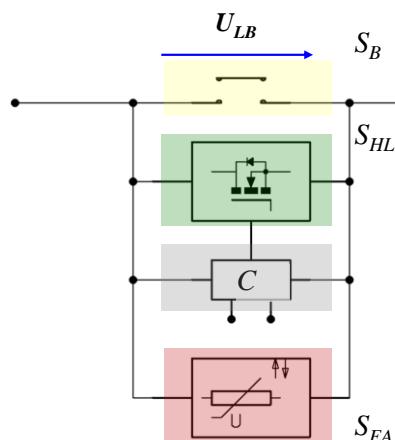


Abbildung 2.71: Schematische Darstellung des Demonstrators

Der Demonstrator besteht aus dem Bypassschalter S_B sowie der Hybridelektronik. Diese Elektronik beinhaltet den Halbleiterschalter S_{HL} und den Energieabsorber S_{EA} . Zusätzlich verfügt der Demonstrator noch über eine Steuer- und Regeleinheit C.

Die Steuerungseinheit sollte dazu in der Lage sein sämtliche hybriden Schaltvorgänge nach Überschrift 2.1 an einem Modellschalter oder Demonstrator zu ermöglichen. Zusätzlich musste die Steuerungs-Reglereinheit in den Prüfaufbau integrierbar sein.

Aus diesem Grund wurden 2 grundlegende Schritte durchgeführt:

1. Ein Prüfaufbau mit einer Kondensatorbatterie wurde bei der E-T-A entworfen und bzgl. Steuerungs- und Sicherheitstechnik aufgebaut und in Betrieb genommen.
2. Die technischen Anforderungen an eine Steuereinheit des Hybridschalters abhängig von allen hybriden Schaltvorgängen nach Abschnitt 2.1 wurden seitens der E-T-A definiert
3. Die technischen Anforderungen an die Komponenten der Steuerungseinheit in Abhängigkeit des Prüfkreises wurden definiert.

Schaltungen und Platinenlayouts der Steuerungseinheit wurden für ein modulares Steuerungskonzept konstruktiv ausgelegt.

Prüfaufbau und Messkonzept:

Für eine Auslegung der hybriden Regelereinheit C war die Kenntnis des Prüf- und Messkonzepts nach Abschnitt 2.6 grundsätzlich notwendig. Natürlich sollten sowohl hybrider Schaltvorgang, Leitungselektronikkonzept als auch Messkonzept soweit möglichst variabel sein. Im Zuge der Untersuchungen wurde das Messkonzept mehrfach angepasst. Den finalen Prüfaufbau nach Abschnitt 2.6 zeigt Abbildung 2.72.

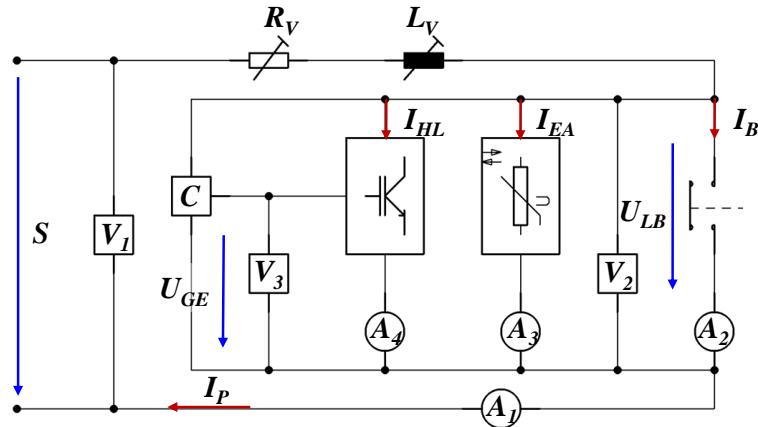


Abbildung 2.72: Prüfaufbau

Der Prüfkreis wird über die Prüfspannungsquelle S mit dem Prüfstrom I_P gespeist. Es handelt sich bei der Prüfspannungsquelle um eine Kondensator-Batterie. Die Höhe der Prüfkapazität beträgt maximal 300 mF. Mit Hilfe des variabel einstellbaren Widerstands R_V und der variabel einstellbaren Induktivität L_V wird die Höhe des zu prüfenden Stroms I_P und die ohmsch-induktive Zeitkonstante des Prüfkreises τ eingestellt.

Abhängig von der Höhe des Laststroms und einem zulässigen Spannungseinbruch von 5 % wurde die modulare Kondensatorbatterie in 75 mF-Schritten bis 300 mF variiert. Mit Hilfe einstellbarer Widerstände R_V und Induktivitäten L_V können Stromhöhe und Zeitkonstante τ des Prüfkreises eingestellt werden.

Hierbei sind stets 5 Kondensatoren zu einem tragbaren Modul zusammengefasst. Eine Symmetrierung des Stroms der einzelnen Kondensatoren wird durch eine einer Platine erreicht.



Abbildung 2.73: Kondensatorbatterie

Diese extra ausgelegte, induktiv optimierte Platine verfügt jeweils über einen Vorwiderstand mit dem Wert des 7 fachen R_{ESR} . Auf diese Weise werden 2 Dinge erreicht:

1. Kompensation der Schwankung des R_{ESR} der einzelnen Kondensatoren

2. Kompensation der Variation der Zuleitungsinduktivitäten und Widerstände

Die Prüfquelle wird mit Hilfe zweier Schalter auf den Prüfkreis aufgeschaltet. Der Draufschalter T_1 ist als Thyristor ausgeführt, wodurch eine prellfreie Aufschaltung und dadurch annähernd schalthandlungsunabhängige Stromanstiege erreicht werden können.

Die Spannungssensoren V_1 , V_2 und V_3 dienen der Erfassung der Prüfspannung S , der Spannung über dem Schaltgerät U_{LB} und der Steuerspannung U_{GE} des Halbleitereschalters S_{HL} . Ströme werden mit den Stromsensoren A_1 bis A_4 erfasst. Hierbei handelt es sich in den Fällen A_1 , A_2 und A_4 um koaxiale Messwiderstände. Je nach Stromhöhe werden Widerstände zwischen $0,5 \text{ m}\Omega$ bis $100 \text{ m}\Omega$ verwendet. Lediglich im Fall des Stromsensors A_4 kommen berührungslos messende Nullflusswandler zum Einsatz. Auf diese Weise kann niederinduktiv der Prüfstrom I_p sowie der Strom durch den Bypassschalter I_B , der Strom durch den Energieabsorber I_{EA} und der Strom durch den Halbleitereschalter I_{HL} erfasst werden. Die Ströme weisen unterschiedliche Anstiegszeiten zwischen $0,1 \mu\text{s}$ bis $5 \mu\text{s}$ und 10 bis $1000 \mu\text{s}$ auf.

Eine eingesetzte Steuer- bzw. Regeleinheit sollte auch hinsichtlich der Bezugspotentiale des Messsystems für den Einsatz ausgelegt sein. Nachfolgende Darstellung zeigt schematisch die entworfene Steuer- bzw. Regeleinheit.

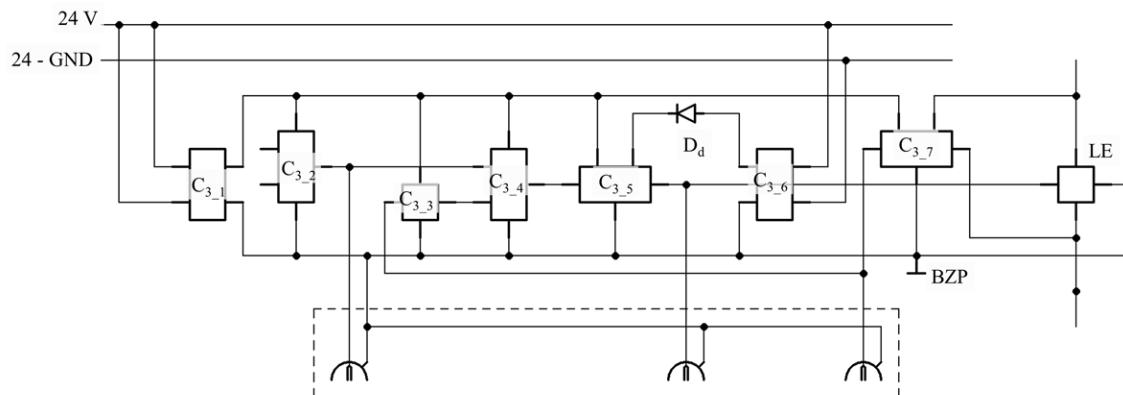


Abbildung 2.74: Steuerung- bzw. Regeleinheit

C3_1: DC/DC-5 V

C3_2: LWL-Schnittstelle

C3_3: Timing

C3_4: NAND

C3_5: Treiber

C3_6: DC/DC-12 V-40 V

C3_6: Rückkopplung

Nach erfolgter schaltungstechnischer und konstruktiver Umsetzung sieht die modulare Einheit folgendermaßen aus.

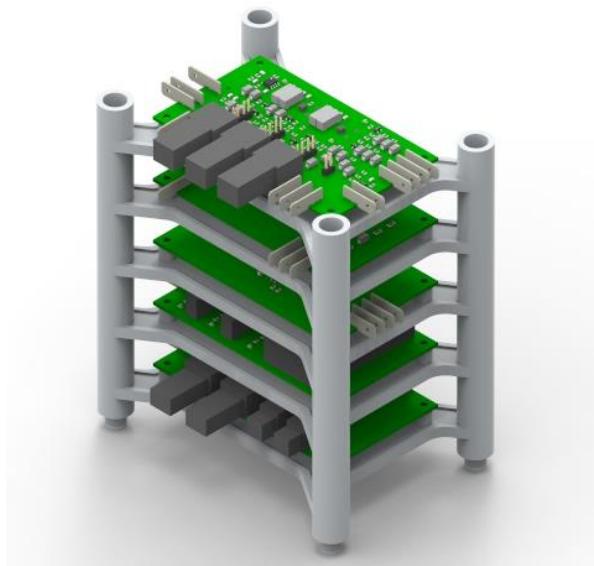


Abbildung 2.75: Modell der Steuerung- bzw. Regeleinheit

Wie beschrieben, besteht die Ansteuerung aus unterschiedlichen Komponenten, welche unterschiedliche Aufgaben erfüllen. Nachfolgend werden die Anforderungen der Komponenten und deren Funktion kurz erläutert.

Netzteil:

Tabelle 2.5: Netzteil - Technische Anforderungen

Kürzel:	C3_1
Versorgung:	24 V oder 9 V Batteriebetrieb
Bauteil:	DC-DC-Wandler – galvanisch getrennt
Ausgangsspannung:	+5 V
Ausgangsleistung:	1 W
ΔU EIN zu AUS	3000 V

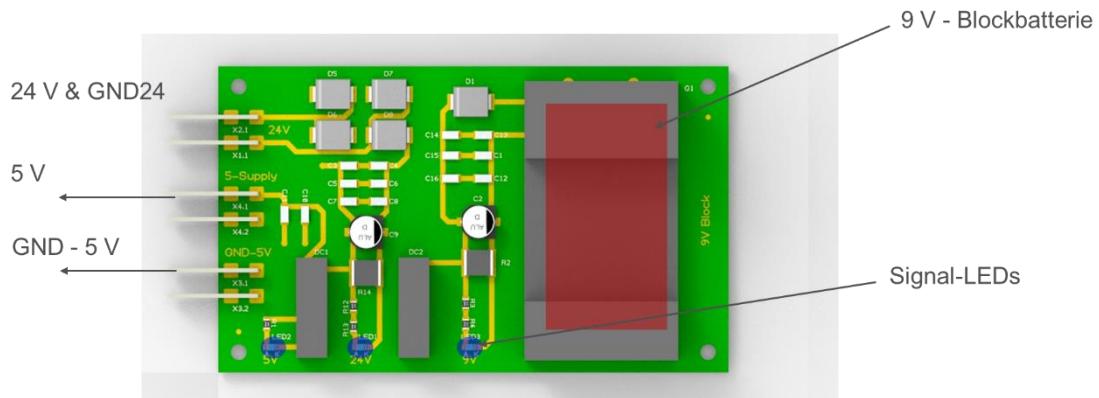


Abbildung 2.76: Netzteil

Koppel-Einheit:

Tabelle 2.6: Koppelseinheit - Technische Anforderungen

Kürzel:	C3_2
Bauteil:	Coupling/LWL&3,3 V – Steuerungs-Logik
Eingangsspannung	5 V
Ausgangsspannung:	3,3 V bis 5 V V
Steuerstrom:	10 mA
ΔU U_EIN zu U_AUS	10 000 V
Herausforderung:	Kurzer Verzug << 1 μ s

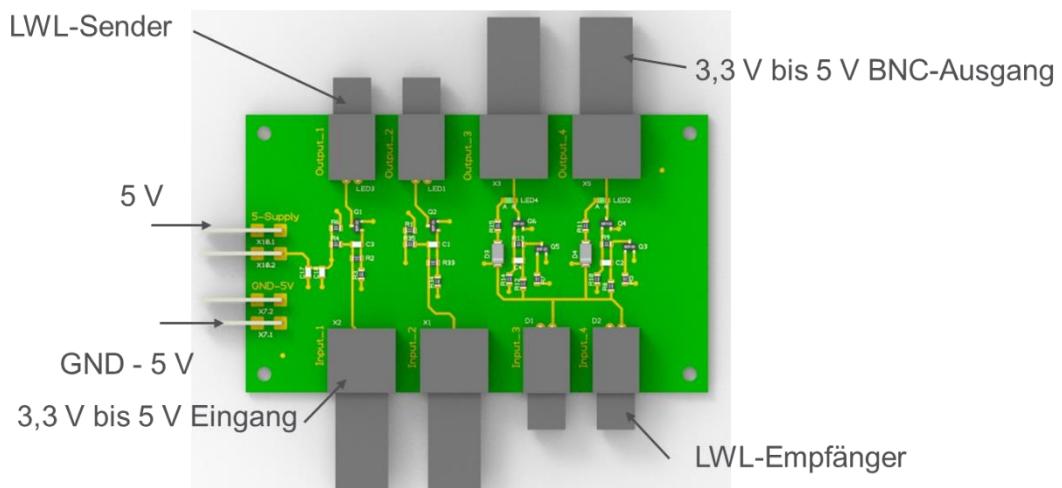
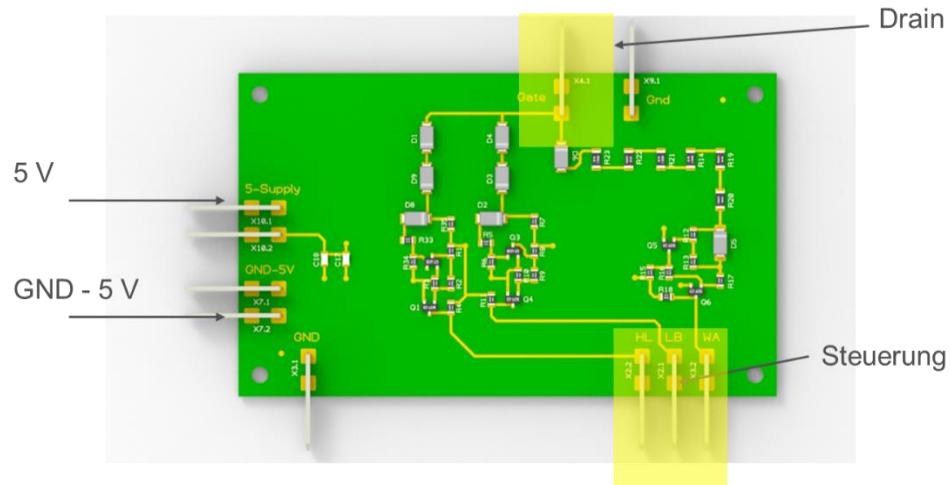


Abbildung 2.77: Koppelseinheit

Detektionseinheit:

Tabelle 2.7: Detektionseinheit - Technische Anforderungen

Kürzel:	C3_7
Bauteil:	Feed back– Steuerungs-Logik
Eingangsspannung	5 V
Ausgangsspannung:	3,3 V bis 5 V - Schließer
Steuerstrom:	10 mA
Herausforderung:	Kurze Verzugszeit < 1µs, Detektion Kontaktöffnung, HL-EIN usw.
Funktionsarten:	Spannungen < 5 V und Spannungen > 5 V

**Abbildung 2.78: Detektionseinheit****Treibereinheit:****Tabelle 2.8: Treibereinheit - Technische Anforderungen**

Kürzel:	C3_5
Bauteil:	Treiber – Steuerungs-Logik
Eingangsspannung	5 V
Ausgangsspannung:	12 V bis 50 V
Steuerstrom:	> 5 A
Herausforderung:	Kurzer Verzug < 1µs, Komplementäre Ausgangsstufe, Querstrom minimieren, Pufferstufe für Querströme /

	Angstkondensatoren Keramik 10 μ , 1 μ und 100 n, Niederinduktiv und niederohmisch puffern
Funktionsarten:	Spannungen < 5 V und Spannungen > 5 V

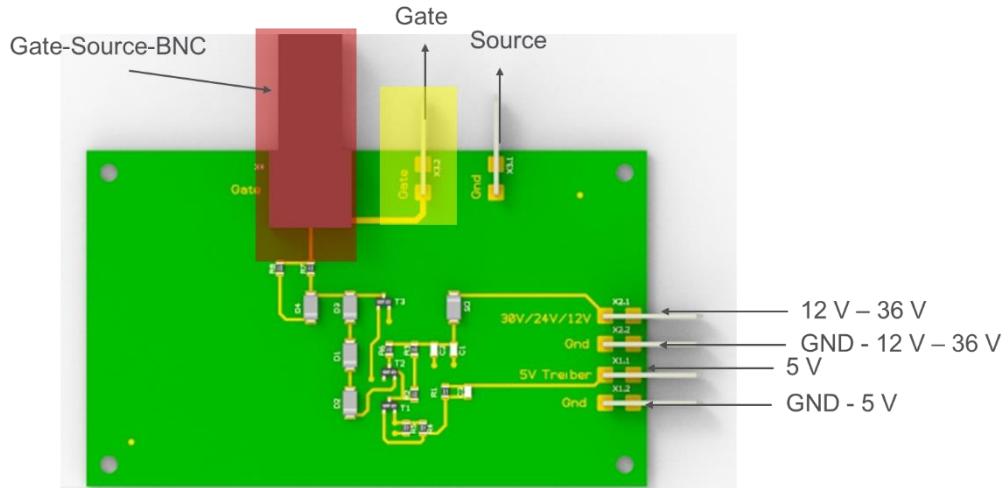


Abbildung 2.79: Treibereinheit

Steuereinheit:

Tabelle 2.9: Steuereinheit - Technische Anforderungen

Kürzel:	C3_3
Bauteil:	Timing – Steuerungs-Logik - 5 V-Logik, im Bereich: $1 \mu\text{s} \geq t \geq 0,3 \mu\text{s}$
Eingangsspannung	5 V
Ausgangsspannung:	5 V
Steuerstrom:	20 mA
Herausforderung:	Kontinuierlich einstellbar bis 5 μs
Funktionsarten:	Einschalt- und Ausschalt Verzug einstellbar, mit und ohne Einschaltverzug

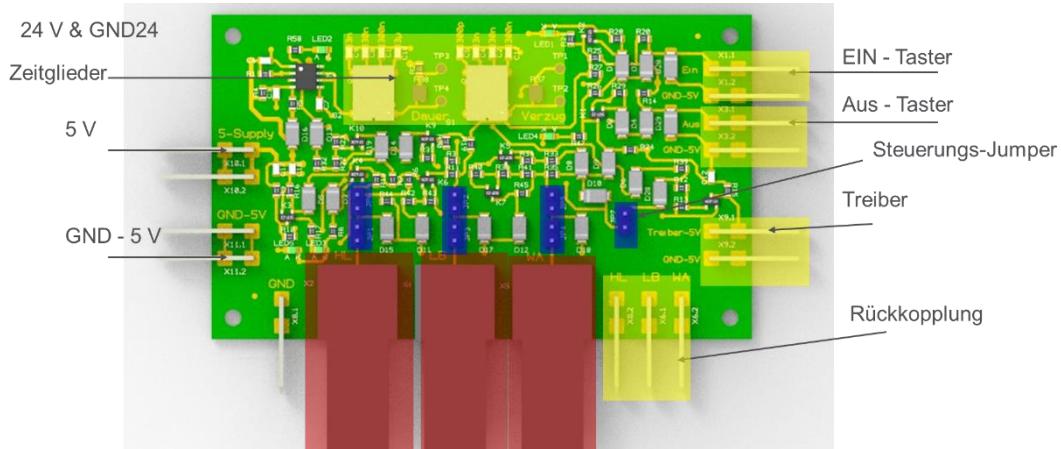


Abbildung 2.80: Steuerungseinheit

Funktion:

Durch unterschiedliches Setzen von Jumfern kann zwischen verschiedenen Betriebsmodi des hybriden Schaltens variiert werden.

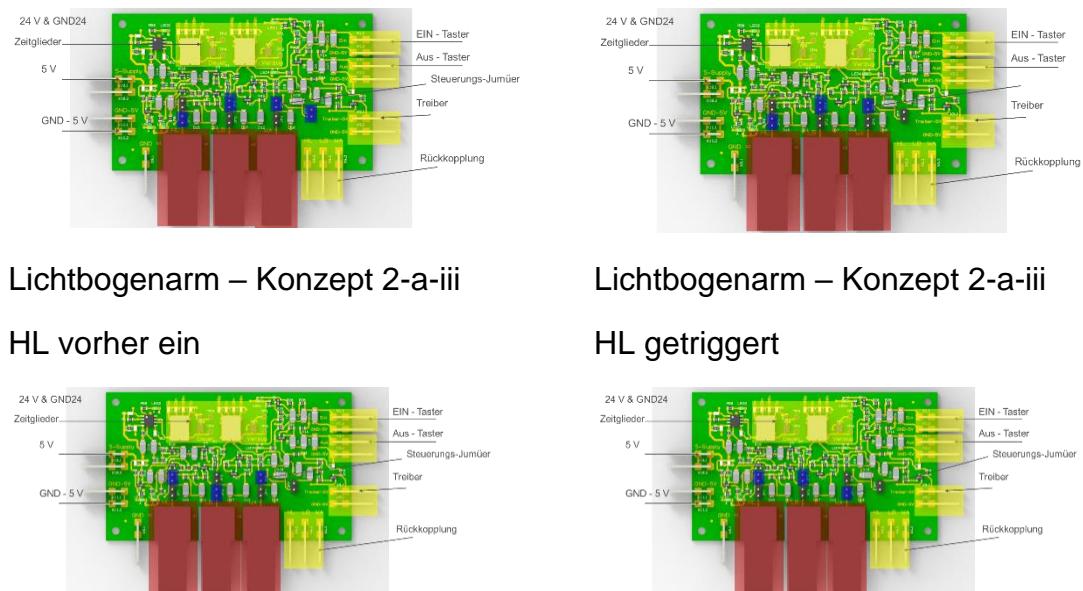


Abbildung 2.81: Steuerungsmodifikationen

Hierbei ist es möglich die hybriden Schaltkonzepte 2-a-i bis 2-a-iv nachzubilden. Das Konzept 2-a-iv des lichtbogenfreien Schaltens wurde im Projekt zwar ausgelegt und angedacht, aber aufgrund Relevanz für das Projektziel nicht weiter im Projekt verfolgt.

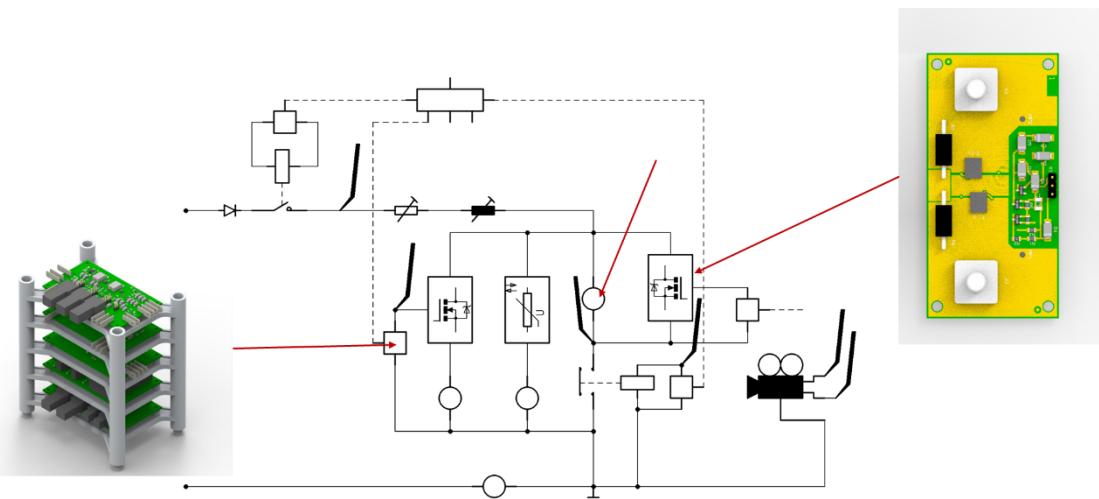


Abbildung 2.82: Modulare Aufbau Messaufbaus

AP. 4.3 Untersuchung zur passiven Begrenzung der Schaltspannung

In AP. 4.3.4 werden Versuchsreihen mit den in AP. 4.2 erstellten leistungselektronischen Komponenten und den festgelegten Prüfparametern bzgl. des Überspannungsschutzes im Prüflabor bei Dehn durchgeführt. E-T-A nimmt im Rahmen von Arbeitstreffen teil.

Die E-T-A hat in einem ersten Entwurf unterschiedliche Konzepte für den Einsatz als Störschutzbeschaltung SSB diskutiert, bewertet und verglichen. Als Konsequenz hat die E-T-A eine allgemeine Leistungsplatine mit möglicher Bestückung unterschiedlicher Komponenten hergestellt.

Neben dem Überspannungsschutz ist das Konzept ebenfalls mit unterschiedlichen Halbleiterschaltern bestückbar. Dies ermöglicht bei identischem Aufbau und identischer Ansteuerung den Vergleich verschiedener Halbleitertechnologien. Einen schematischen Schaltplan einer Bestückungsvariante zeigt Abbildung 2.83

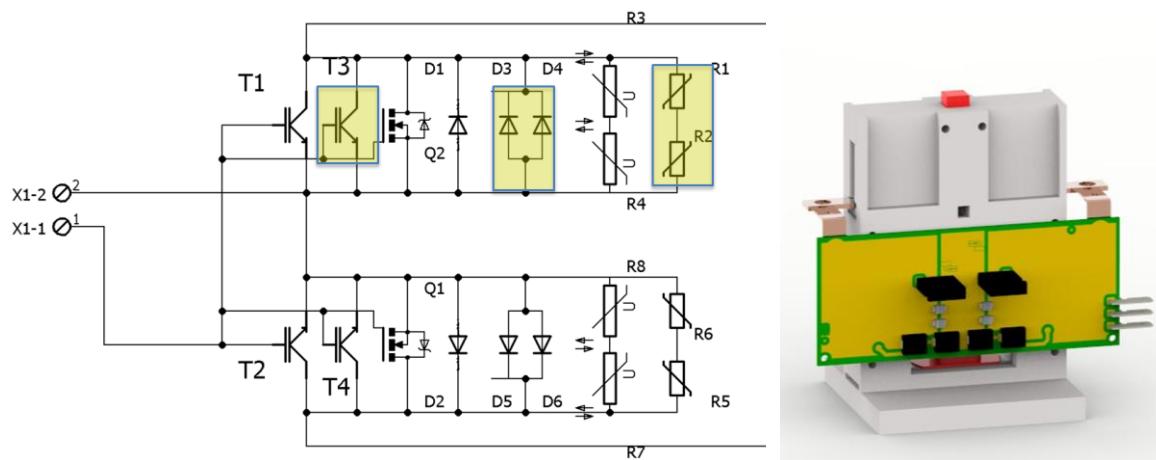


Abbildung 2.83: Bestückung der Leistungsplatine

Im Zuge der Auslegung wurde bei der E-T-A eine Schritt für Schritt-Anleitung zur Varistordimensionierung erarbeitet. Mit Hilfe grundlegender Systembetrachtung und ausgehend von analytischen Auslegungen werden Varistoren für die Bestückung ausgewählt:

- 1. Was sind die Systemanforderungen?**
- 2. Wann spricht der Varistor an?**
- 3. Kann der Varistor den max. zu schaltenden Strom führen?**
- 4. Schützt der Varistor das System ausreichen beim maximalen Strom?**
- 5. Ist der Varistor energetisch in der Lage eingesetzt zu werden?**
- 6. Wie viel Schaltspiele darf der Varistor durchführen und welches I^2t ergibt sich je Schaltvorgang?**

Nach einer ersten Betrachtung ergibt sich folgender Varistor:

Part Number	Branding	Maximum Rating (85°C)				Specifications (25°C)				
		Continuous		Transient		Varistor Voltage at 1mA DC Test Current	Maximum Clamping Voltage at 100A, 8 x 20µs	UL 1449 Voltage Protection Rating	Typical Capacitance f = 1MHz	
		AC Volts	DC Volts	Energy 2ms	Peak Surge Current 8 x 20µs					
		$V_{M(A)RMS}$	$V_{M(DC)}$	W_{TM} 1 x Pulse	I_{TM} 1 x Pulse					
		(V)	(V)	(J)	(A)	(V)	(V)	(V)	(pF)	
V25S300P	P25S300	300	385	500	22000	W_{var_max}		765	1000	1450
V25S320P	P25S320	320	420	540	22000			825	1000	1350
V25S385P	P25S385	385	505	630	22000	558	682	1010	1200	1080

Schaltspiele in einem Schaltstrom von 500 A ergeben sich in Abhängigkeit der ohmsch-induktiven Lasten zu:

Tabelle 2.10: Parameter für einen Schaltstrom von 500 A.

Tao in s	WL in J	delta t in s	I^2t in A^2s	swc
0,005	600	-	-	0
0,003	360	0,00151	126	15
0,001	120	0,00050	42	100
0,0009	108	0,00045	38	100
0,0008	96	0,00040	34	100
0,0007	84	0,00035	29	100

Schaltspiele in einem Schaltstrom von 2500 A ergeben sich in Abhängigkeit der ohmsch-induktiven Lasten zu:

Tabelle 2.11: Parameter für einen Schaltstrom von 500 A.

Tao in s	WL in J	delta t in s	I^2t in A^2s	swc
0,005	3000	-	-	0
0,003	1800	-	-	0
0,001	600	-	-	0
0,0009	540	0,00045	945	15
0,0008	480	0,00040	840	15
0,0007	420	0,00035	735	15

AP. 4.2 Kombination des Modellschalters mit der Hybridelektronik und Durchführung der Messungen zum Schaltverhalten

Im **AP. 4.2** wird zunächst der Leistungsteil der Hybridelektronik inklusive Strom- und Spannungsmesstechnik entwickelt, realisiert und getestet. Die Ergebnisse fließen in die Entwicklung des Demonstratorschaltgerätes des **AP. 7** ein. Hierfür muss in **AP. 4.2.1** eine Leiterplatte geplant werden, die sowohl den elektronischen Leistungsteil als auch den Überspannungsschutz und die elektrische Messtechnik beinhaltet. E-T-A hat eine entsprechende Schaltung entwickeln, entflochten und gefertigt (**AP. 4.2.6**), damit diese den Projektpartnern in ausreichender Menge für die Messungen an den Modellschaltern und am Demonstrator zur Verfügung stehen. Bei den Serienuntersuchungen des statischen und dynamischen Schaltverhaltens wird E-T-A im Rahmen von Arbeitstreffen am EGA teilnehmen und mitarbeiten.

Mit Hilfe zweier aufgezeichneter Signalverläufe werden die lichtbogenbehafteten **Hybridschaltkonzepte 2-a-i & ii** sowie die lichtbogenarmen **Konzepte 2-a-iii & iv** im folgenden Unterkapitel erläutert. Zusätzlich wird der Prozess des Hybridschaltens in Form von Ablaufdiagrammen erläutert.

Phasen der Stromführung überlappen sich während der sogenannten Kommutierungsphasen. Kommutierung des Stroms bedeutet, dass der Strom von einem Zweig des Hybridschalters auf einen anderen wechselt. Die Kommutierungsphasen werden im Detail in Abschnitt 3 betrachtet.

Anhand der Signalverläufe von Schaltvorgängen werden nachfolgend die Prozesse erläutert.

i. Hybridschaltkonzept 2-a-i & ii

Der Hybridschaltprozess startet nachfolgend im Augenblick T_1 mit der Öffnung des ersten Kontakts.

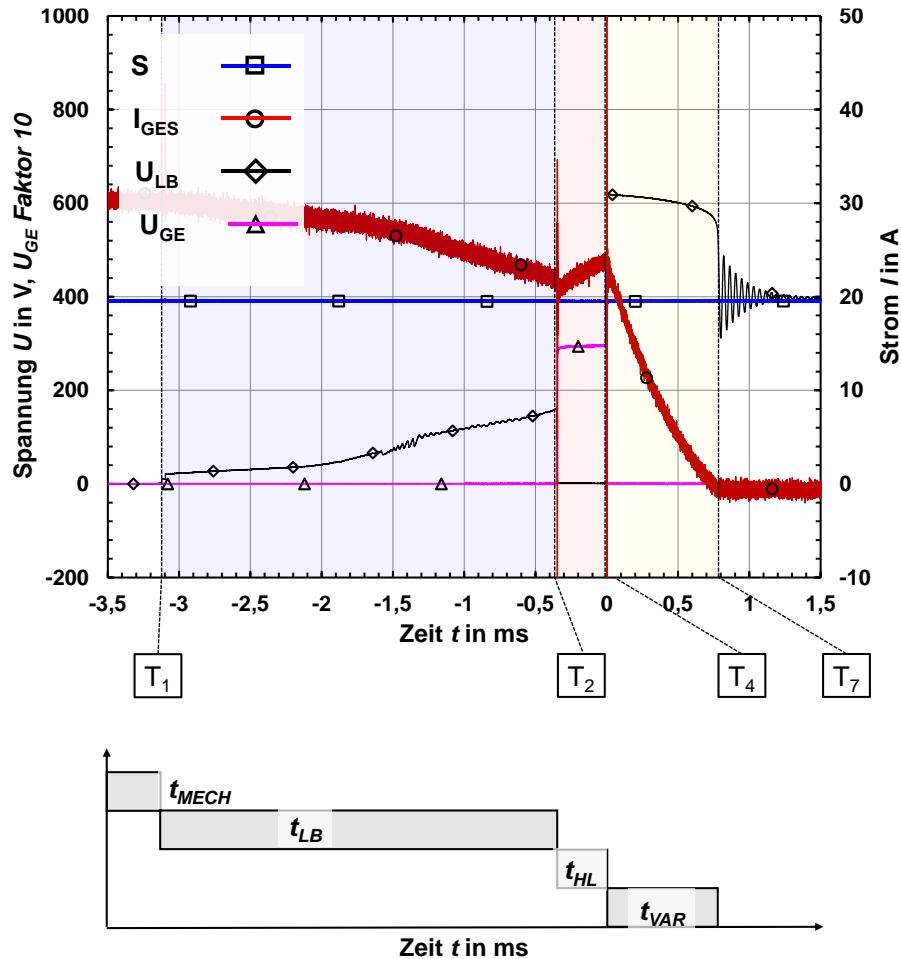


Abbildung 2.84: Hybridschaltkonzept 2-a-ii – Lichtbogenreduziert – 400 V, 32 A und $\tau = 1 \text{ ms}$ [27]

Bis zur Kontaktöffnung wird der Strom über den geschlossenen Bypassschalter S_B geführt. Ein Schaltlichtbogen zündet zu T_1 . Die Stromführung erfolgt bis T_2 über die Schaltlichtbögen während der Lichtbogenbrenndauer t_{LB} . Im Augenblick T_2 wird die Gatespannung erhöht und der Halbleiterschalter wird eingeschaltet. Der Lichtbogen verlischt nach der Kommutierung des Stroms auf den Halbleiterschalter S_{HL} . Für die Dauer t_{HL} bis T_4 führt der Halbleiterschalter den Strom. Durch den Abbau der Gatespannung U_{GE} , sperrt der Halbleiterschalter. Der Strom kommutiert und fließt für die Dauer t_{EA} über den Energieabsorber S_{EA} bis zum Stromnulldurchgang in T_7 .

ii. Hybridschaltkonzept 2-a-iii & iv

Abbildung 2.85 zeigt einen aufgezeichneten Signalverlauf.

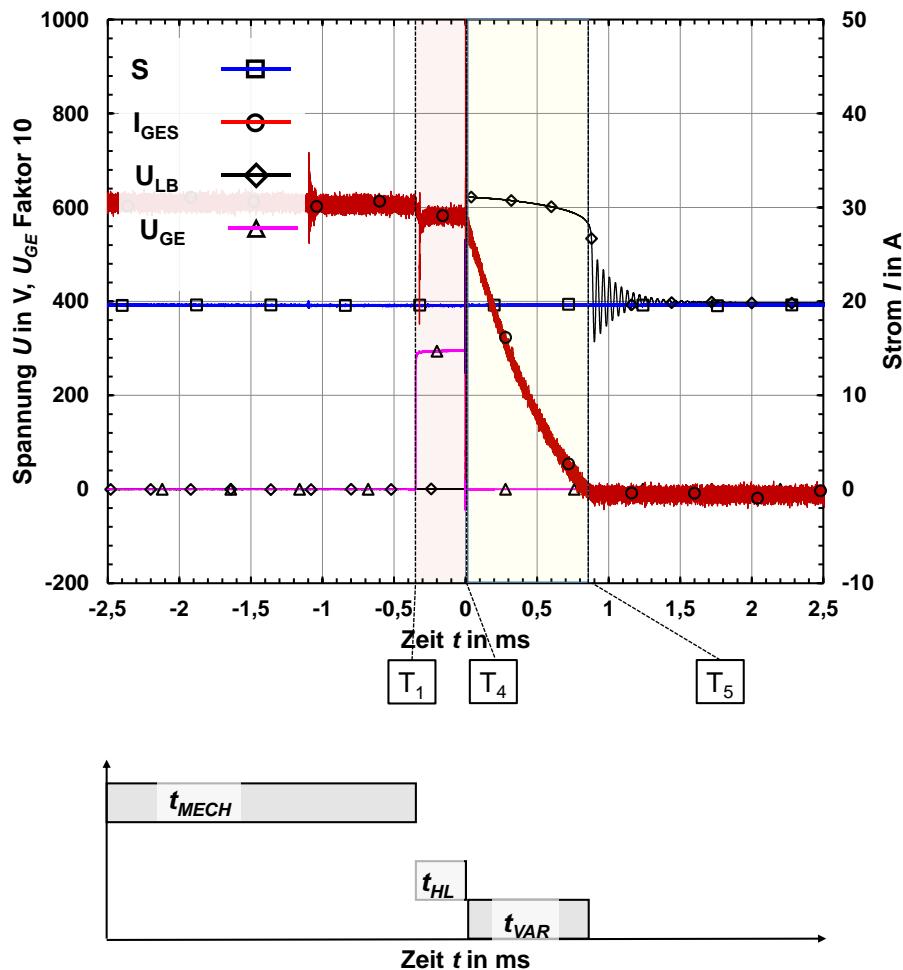


Abbildung 2.85: Hybridschaltkonzept 2-a-iii – Lichtbogenarm – 400 V, 32 A und $\tau = 1$ ms [27]

Im Gegensatz zu den **Konzepten 2-a-i** oder **ii** ist der Halbleiterschalter S_{HL} mit einer Gatespannung von 30 V eingeschaltet bevor das Kontaktssystem sich im Augenblick T_1 öffnet. Im Fall des betrachteten Signalverlaufs wird kein Brennen von Schaltlichtbögen festgestellt. Der Strom kommutiert vom Bypassschalter S_B auf den Halbleiterschalter S_{HL} und wird bis T_4 von diesem getragen. Der Halbleiterschalter S_{HL} wird ausgeschaltet und der Strom wird bis zum Nulldurchgang in T_5 vom Energieabsorber S_{EA} geführt.

2.4.2 DEHN:

Untersuchung zur passiven Begrenzung der Schaltspannung

In AP 4.3.1 werden verschiedene Überspannungsschutzkonzepte auf Basis der Literaturrecherche des AP. 1 gegenübergestellt und an ausgewählten Beispielen Berechnungen sowie Simulationen durchgeführt und bewertet. Hierzu wurde auf Grundlage der am Modellschalter durchgeführten Messungen ein

Simulationsmodell erstellt, mit welchem der real gemessene Strom-Spannungsverlauf nachgebildet werden kann.

Die in den nachfolgenden Erklärungen verwendeten Begriffe sind in Abbildung 2.86 definiert. In dem in der Abbildung abgebildeten Oszilloskopogramm ist der Spannungsverlauf beim Abschalten des Hybrid-Kreises dargestellt.

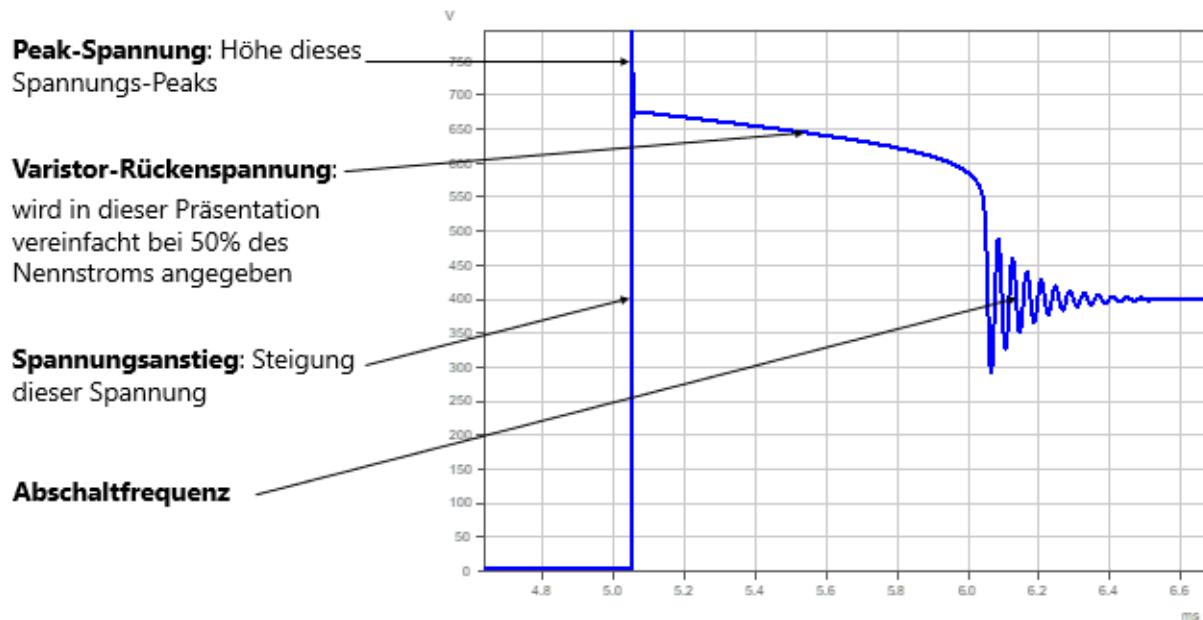


Abbildung 2.86: Begriffsdefinition

Modellbildung

Bei dem Simulationsmodell wurde besonders darauf geachtet, dass sowohl die Peak-Spannung beim Abschalten des Hybrid-Kreises als auch der Spannungsanstieg des Peaks mit den realen Messgrößen übereinstimmen. Die Varistor-Rückenspannung und die Abschaltfrequenz wird im Simulationsmodell nur zweitrangig betrachtet, da davon ausgegangen wird, dass diese beiden Parameter auf des Wiederzünden der Funkenstrecke im Hybridkreis keinen signifikanten Einfluss haben werden.

Zur Überprüfung des Simulationsmodells wurden reale Messungen mit verschiedenen Parametern für die Stromstärke und die Zeitkonstante gewählt. Diese beiden Parameter können variiert werden, indem im Prüfaufbau der Widerstand R2 und die Induktivität L1 eingestellt werden. Die Messungen hierzu sind im nachfolgenden Oszilloskopogramm in Abbildung 2.87 dargestellt. Der blaue Verlauf zeigt die gemessene Spannung, der grüne Verlauf die simulierte Spannung. Die elektrischen Parameter bei 400 VDC sind:

Kanal 1: $I = 75 \text{ A}$, ohmsch

Kanal 2: $I = 75 \text{ A}$, Zeitkonstante: $3,8 \mu\text{s}$

Kanal 3: $I = 150 \text{ A}$, ohmsch

Kanal 4: $I = 150 \text{ A}$, Zeitkonstante: $8,63 \mu\text{s}$

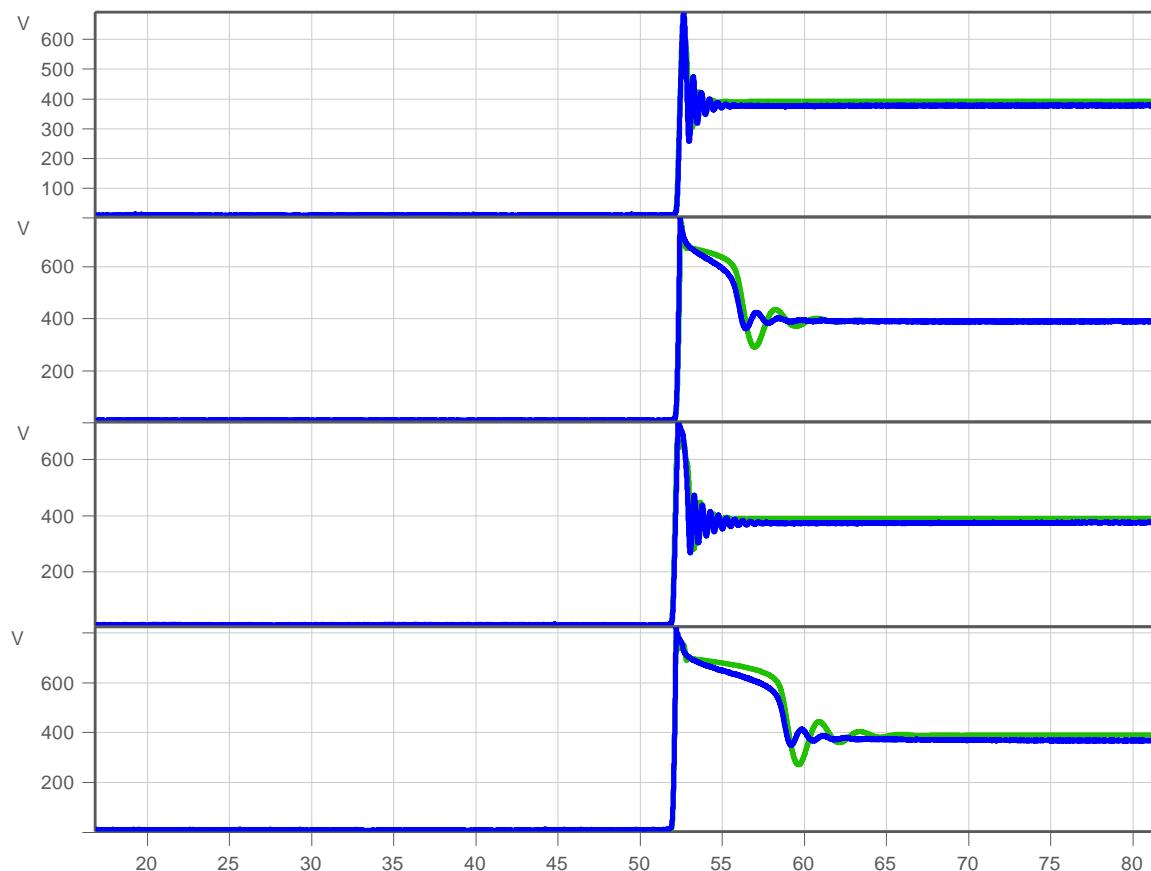


Abbildung 2.87: Vergleichsmessungen zur Verifikation des Simulationsmodells

Bei den im Oszillogramm zu sehenden Verläufen ist sowohl der Spannungsanstieg als auch die Höhe der Peak-Spannung zwischen Simulation und realer Messung vergleichbar. Die Varistor-Rückenspannung und die Abschaltfrequenz sind dagegen voneinander abweichend. Da für die Untersuchung des Wiederzündverhaltens einer Funkenstrecke insbesondere die Peak-Spannung und der Spannungsanstieg die dominante Rolle spielen sollten, wird dieses Modell für die weiteren Simulationen als ausreichend betrachtet.

Simulation von Überspannungsschutz-Modellen

Für nachfolgende Parameter in Tabelle 2.12 wurden bei allen Modellen eine Simulation durchgeführt.

Tabelle 2.12: Übersicht der verwendeten Parameter

Netzspannung [VDC]	Strom [A]	Zeitkonstante [μ s]
	75	ohmsch
400	150	8,63
	300	1000

Die Verläufe mit einem Strom von 300 A und einer Zeitkonstante von 1 ms sind diejenigen, bei denen der höchste Spannungs-Peak und die größte Steilheit des Spannungsanstiegs vorliegt. Zudem wird bei diesen Verläufen die größte Energie umgesetzt. Dementsprechend wird nachfolgend nur auf die Ergebnisse dieser Simulationen eingegangen.

Außerdem werden alle simulierten Begrenzer-Schaltungen und die Wirksamkeit derselben mit der als Standard-Modell definierten Anordnung verglichen (ein Varistor LS40K320 als Überspannungsschutz).

Simulation von Überspannungsschutz-Modellen zur Begrenzung der Varistor-Rückenspannung

Untersuchungen:

In diesem Kapitel 4.3.2 werden zur Begrenzung der Varistor-Rückenspannung Varistoren zweier Hersteller (Epcos und Littlefuse) in verschiedenen Verschaltungen miteinander verglichen. Die Bauformen der beiden Varistoren sind in nachfolgender Abbildung 2.88 dargestellt:



Abbildung 2.88: Bauform der verwendeten Varistoren (Littlefuse => rote Varistoren, Epcos => blaue Varistoren)

Die Varistor-Fläche der Littlefuse-Varistoren beträgt 1352 mm². Die Fläche der Epcos-Varistoren beträgt 1296 mm². Von beiden Herstellern werden Varistoren mit einem Milliampere-Punkt von 240 V und von 510 V verwendet.

In einem ersten Vergleich wurden die Varistoren mit einem mA-Punkt von 510 V und zwei Varistoren (mit 240 V mA-Punkt) des gleichen Herstellers in Reihenschaltung miteinander verglichen. In nachfolgender Abbildung 2.89 ist das Simulationsergebnis dargestellt:

Simulationsergebnis:

U = 400 VDC

I = 300 A

Zeitkonstante = 1 ms

Kanal 1: Gesamtspannung [V]

Kanal 2: Gesamtstrom [A]

Kanal 3: Varistor-Spannung [V]

Kanal 4: Varistor-Strom [A]

Kanal 5: Varistor-Energie [J]

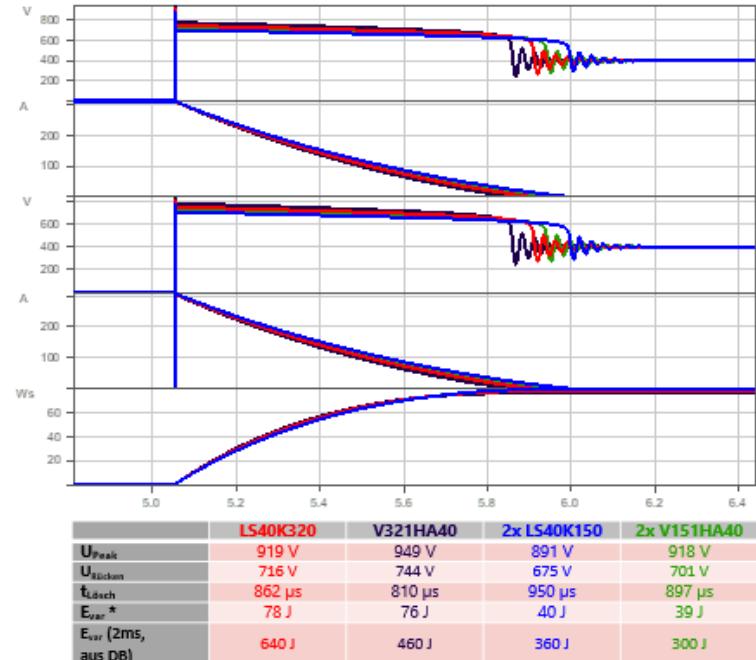


Abbildung 2.89: Ergebnisüberblick Reihenschaltung

Beim Ergebnisüberblick ist zu beachten, dass nur die Verläufe mit gleichem mA-Punkt sinnvoll miteinander verglichen werden können. Auffällig beim Vergleich der

Peak-Spannungen und der Varistor-Rückenspannungen ist, dass die Varistoren von Epcos stets einen um ca. 30 V niedrigeren Wert haben.

Da die Epcos-Varistoren die besseren Werte aufweisen, wird nachfolgend nur noch mit diesen Typen getestet.

Neben der Reihenschaltung wurde auch die Parallelschaltung der Varistoren getestet. Dabei werden zwei Varistoren mit einem mA-Punkt von 510 V und ein Varistor mit einem mA-Punkt von 510 V parallel zu zwei Varistoren mit einem mA-Punkt von 240 V in Reihe getestet und mit dem Ergebnis der Simulation mit einem Varistor von Epcos verglichen. Ein Überblick über das Ergebnis ist in Abbildung 2.90 dargestellt.

Simulationsergebnis:

$U = 400 \text{ VDC}$

$I = 300 \text{ A}$

Zeitkonstante = 1 ms

Kanal 1: Gesamtspannung [V]

Kanal 2: Gesamtstrom [A]

Kanal 3: Energie Varistor 1 [J]

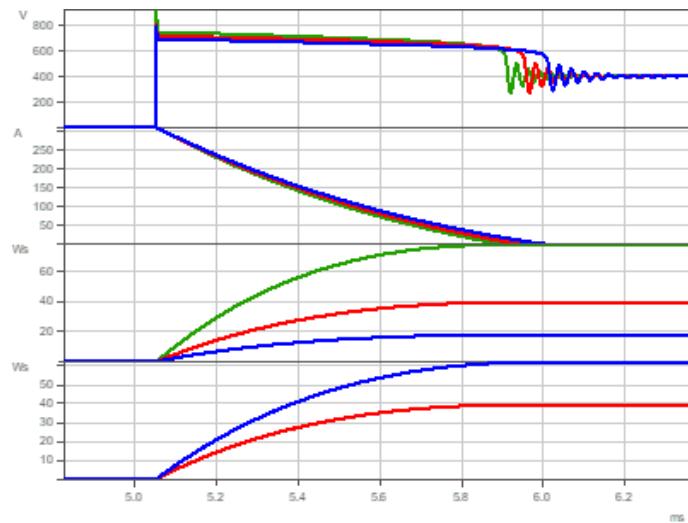
Kanal 4: Energie Varistor 2 oder 3 [J]

LS40K320 (Vergleich)

LS40K320 || (LS40K150 + LS40K150)

LS40K320 || LS40K320

	1x LS40K320	2x LS40K320 parallel	2x LS40K150 in Reihe parallel zu 1x LS40K320
U_{Peak}	919 V	803 V	788 V
$U_{\text{Rück}}$	716 V	691 V	667 V
$t_{\text{Lösch}}$	862 μs	0,9 ms	1 ms
$E_{\text{Var 1}}^*$	78 J	39 J	17,9 J
$E_{\text{Var 2}}^*$	—	39 J	31 J
$E_{\text{Var}}(2\text{ms},$ $\text{aus DB})$	640 J	640 J	360 J



* Energie pro Varistor

Abbildung 2.90: Ergebnisüberblick Parallelschaltung

Das Ergebnis zeigt, dass beide Varianten die Varistor-Rückenspannung und die Peak-Spannung positiv beeinflussen. Allerdings ist bei der Simulation mit den Varistoren mit kleinen mA-Punkt (LS40K320 || (LS40K150 + LS40K150)) zu beachten, dass diese einen kleineren mA-Punkt haben. Außerdem schwierig ist die reale Umsetzung der Parallelschaltung von Varistoren, da die Varistoren denselben mA-Punkt aufweisen sollten, da sonst die Stromverteilung sehr ungleichmäßig ist. Es entsteht somit ein Zusatzaufwand zur Sortierung der Varistoren.

Außerdem wurde die Lebensdauer der Varistoren bei den simulierten Strombelastungen verglichen. Die möglichen Schaltspiele laut Datenblatt sind

nachfolgender Tabelle 2.13 zu entnehmen. Bei den Angaben ist zu beachten, dass im Datenblatt angenommen wird, dass der Strom für 1 ms konstant durch den Varistor fließt. Da im Fall dieser Simulationen der Strom in Dreiecksform vorliegt, sind doppelt so viele Schaltspiele möglich.

Tabelle 2.13: Vergleich der Varistor-Lebensdauer

Hersteller	Strom [A]	Schaltspiele	Hersteller	Strom [A]	Schaltspiele
Epcos	75	>10 ³	Littlefuse	75	>10 ²
	150	>10 ³		150	>10 ²
	300	>10 ³		300	>10

Überspannungsschutzmodelle zur Begrenzung der Peak-Spannung

Zur Bearbeitung dieses Kapitels 4.3.2 wurden sich außerdem verschiedene Modelle zur Begrenzung der Peak-Spannung überlegt. Diese sind Abbildung 2.91 zu entnehmen.

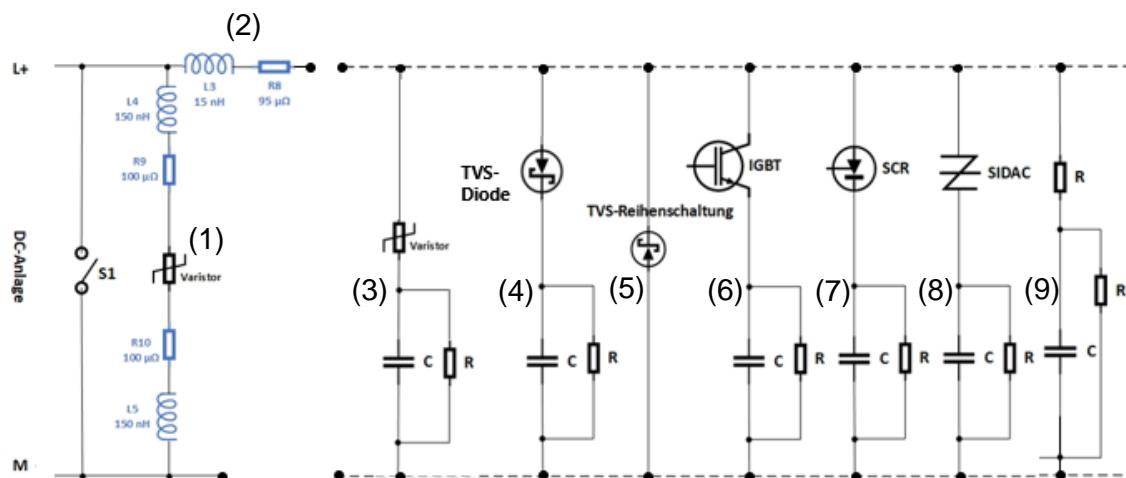


Abbildung 2.91: Modelle zur Begrenzung der Peak-Spannung

Alle Varianten sind dabei als zusätzlicher Schutz parallel zum Varistor (1) zu sehen. Als Varistor wird der Typ LS40K320 der Firma Epcos verwendet. Dieser Varistor stellt den primären Überspannungsschutz für den Schalter S1 dar.

Um die Vergleichbarkeit der Simulationen zu gewährleisten, werden alle Begrenzer-Varianten über ein LR-Glied angeschlossen (2). Dieses wird stets identisch dimensioniert ($L = 15 \text{ nH}$, $R = 95 \mu\Omega$) und stellt die Anschluss- und Leitungsinduktivität bzw. dessen Widerstand dar. Die RC-Glieder der einzelnen Begrenzer-Schaltungen werden mit einer Kapazität von $2 \mu\text{F}$ und einem Widerstand von $120 \text{ k}\Omega$ definiert.

Zusammenfassung der Simulation

Zusammenfassend zeigt Tabelle 2.14 die simulierten Maxima der Peak-Spannungen bei Einsatz der Begrenzer-Schaltungen. Die Tabelle enthält auch die Peak-Spannung der Simulation der Begrenzer-Schaltung IGBT in Reihe zu einer Kapazität.

Tabelle 2.14: Übersicht der Spannungs-Peaks bei Anwendung der Begrenzer-Schaltungen

Varistor	Varistor	Varistor	Varistor	Varistor	Varistor	Varistor (IGBT
(Varistor + C)	(TVS+C)	(Sidac + C)	(R+C)	TVS-Kette	+ C)	
U_{Peak} [V]	919	787	822	822	818	875
						1010

Anhand der Tabelle ist zu sehen, dass mit allen Begrenzer-Schaltungen (Ausnahme: Begrenzer-Schaltungen mit IGBT oder Thyristor, aufwendigere Abstimmung zum Schalter nötig) die Peak-Spannung gesenkt werden kann. Am erfolgreichsten gelingt dies bei allen passiven Varianten mit einer Kapazität in Reihe. Anzumerken ist, dass bei exakterer Auslegung der Bauteile ein weiteres Absenken der Peak-Spannung möglich erscheint.

Ebenso zeigen die Simulationsergebnisse, dass die Steilheit des Spannungsanstieges durch einige Schaltungen selbst bei harter Abschaltung des IGBT's reduziert werden kann.

Entsprechend den Ergebnissen zu den Haupteinflussgrößen bzgl. der Wiederverfestigung der Schaltstrecke kann somit eine Überspannungsschutzbeschaltung ausgewählt werden, durch welche die Gesamtabschaltzeit ggf. verkürzt werden kann.

Auswahl geeigneter Überspannungsschutz-Modelle

Für die realen Tests der Begrenzer-Schaltungen im Hybridkreis werden drei Modelle ausgewählt. Wichtige Kriterien hierbei sind, dass das Begrenzer-Modell passiv ist und die Schaltspannung U_{Peak} reduzieren kann. Außerdem soll auf die Bauteilgröße und die Bauteilkosten geachtet werden.

Anhand dieser Kriterien werden die Modelle (Varistor || (IGBT + C)) und (Varistor || TVS-Kette) von vornherein aussortiert, da sowohl die Auswirkungen auf die Peak-Spannung als auch die Kosten der TVS-Dioden bzw. die notwendige aktive Ansteuerung des IGBTs durch die zuvor genannten Kriterien ausgeschlossen werden.

Aus den vier verbleibenden Modellen, welche aufgrund der genannten Kriterien interessant sind, wird sich bei den weiteren Versuchen für die Modelle (Varistor || (Varistor + C)), (Varistor || (TVS + C)) und (Varistor || (Sidac + C)) entschieden.

Integration des Überspannungsschutzes in den Hybridkreis

Des Weiteren muss der ausgewählte Überspannungsschutz in den Hybridkreis integriert werden. Die räumliche Anordnung des Überspannungsschutzes ist dabei Abbildung 2.92 zu entnehmen. In diesem Bild ist links oben (blaues Bauteil) der Varistor LS40K320, der bei der Simulation der Begrenzer-Schaltungen verwendet wurde, zu sehen. An den Bohrungen oberhalb dieses Varistors besteht die Möglichkeit, die oben ausgewählten Modelle anzubinden. Somit ist gewährleistet, dass diese Modelle und der Varistor parallel, in direkter Nähe zum zu schützenden IGBT, geschaltet sind.

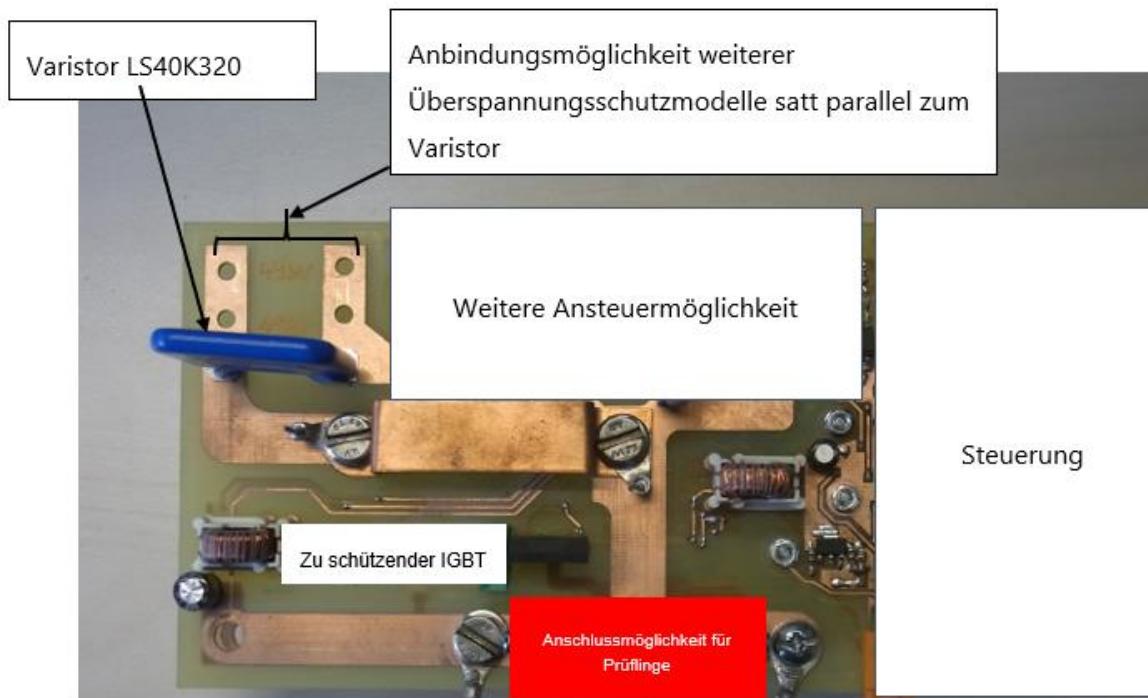


Abbildung 2.92: Anschluss des Überspannungsschutzes am Hybridkreis (Draufsicht)

Überprüfung der ausgewählten Begrenzer-Modelle

Um die ausgewählten Begrenzer-Modelle überprüfen zu können, wurde mithilfe des Versuchsaufbaus aus Abbildung 2.93 eine Einstellung der el. Parameter sowie der Lichtbogenbrenndauer und der Dauer der lichtbogenfreien Zeit gesucht, bei welcher der Modellschalter zuverlässig wiederzündet. Die Einstellungen für ein reproduzierbares Wiederzünden waren bei 150 A und einer Zeitkonstante von 8,63 μ s bei einer Lichtbogenbrenndauer von 100 μ s und einer lichtbogenfreien Zeit von 50 μ s.

Bei dem Versuchsaufbau handelt es sich um eine Kapazitätsentladung bei einer Spannung von 400 VDC. Über einen Widerstand und eine Induktivität können die Stromstärke und die Zeitkonstante gewählt werden. Für die Versuche zur Wiederzündung des Modellschalters wird ein IGBT-Schalter in den Versuchsaufbau

integriert. Dieser ist ein Sicherheitsbaustein und schaltet die Spannung immer 5 ms nach erstmaliger Zündung der Funkenstrecke ab. Somit wird der Modellschalter bei Wiederzündung vor zu langen Belastungen geschützt. Mit dem eingezeichneten Hybridkreis kann der Modellschalter nach einer bestimmten Lichtbogenbrenndauer kurzgeschlossen werden und diese einstellbare lichtbogenfreie Zeit durch Beendigung des Kurzschlusses wieder beendet werden.

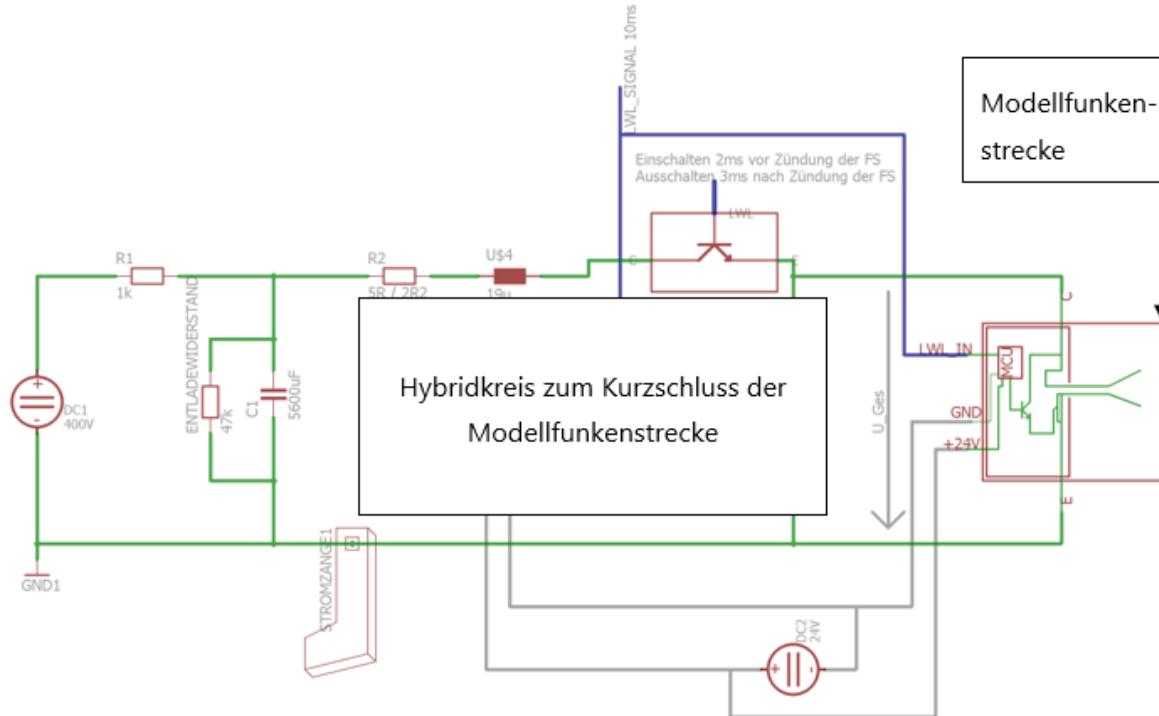


Abbildung 2.93: Versuchsaufbau

Nachfolgend werden die ausgewählten Modelle (Varistor || (Varistor + C)), (Varistor || (TVS + C)) und (Varistor || (Sidac + C)) an der Platine aus Abbildung 2.92 am gekennzeichneten Ort angeschlossen.

Nachfolgende Oszillogramme sind zum Vergleich immer mit der Messung ohne Begrenzer-Schaltung übereinandergelegt. Bei dieser Messung ist es auch immer zum Wiederzünden gekommen. Die Messung ohne Begrenzer-Schaltung ist der blaue Verlauf. Die Messung mit Begrenzer-Schaltung ist der rote Verlauf. Kanal 1 ist in allen Oszillogrammen der Gesamtstrom, Kanal 2 die Spannung über dem Modellschalter.

Außerdem wird bei allen Messverläufen ausschließlich der Abschaltvorgang gezeigt, da die Begrenzer-Schaltung auf diesen, im Gegensatz zum Zündvorgang wesentlichen Einfluss hat.

Abbildung 2.94 zeigt den Verlauf mit der Begrenzerschaltung „Varistor in Reihe zu Kapazität“. Dabei ist ersichtlich, dass die Peakspannung wesentlich gesenkt werden kann und es somit zu keinem Wiederzünden gekommen ist.

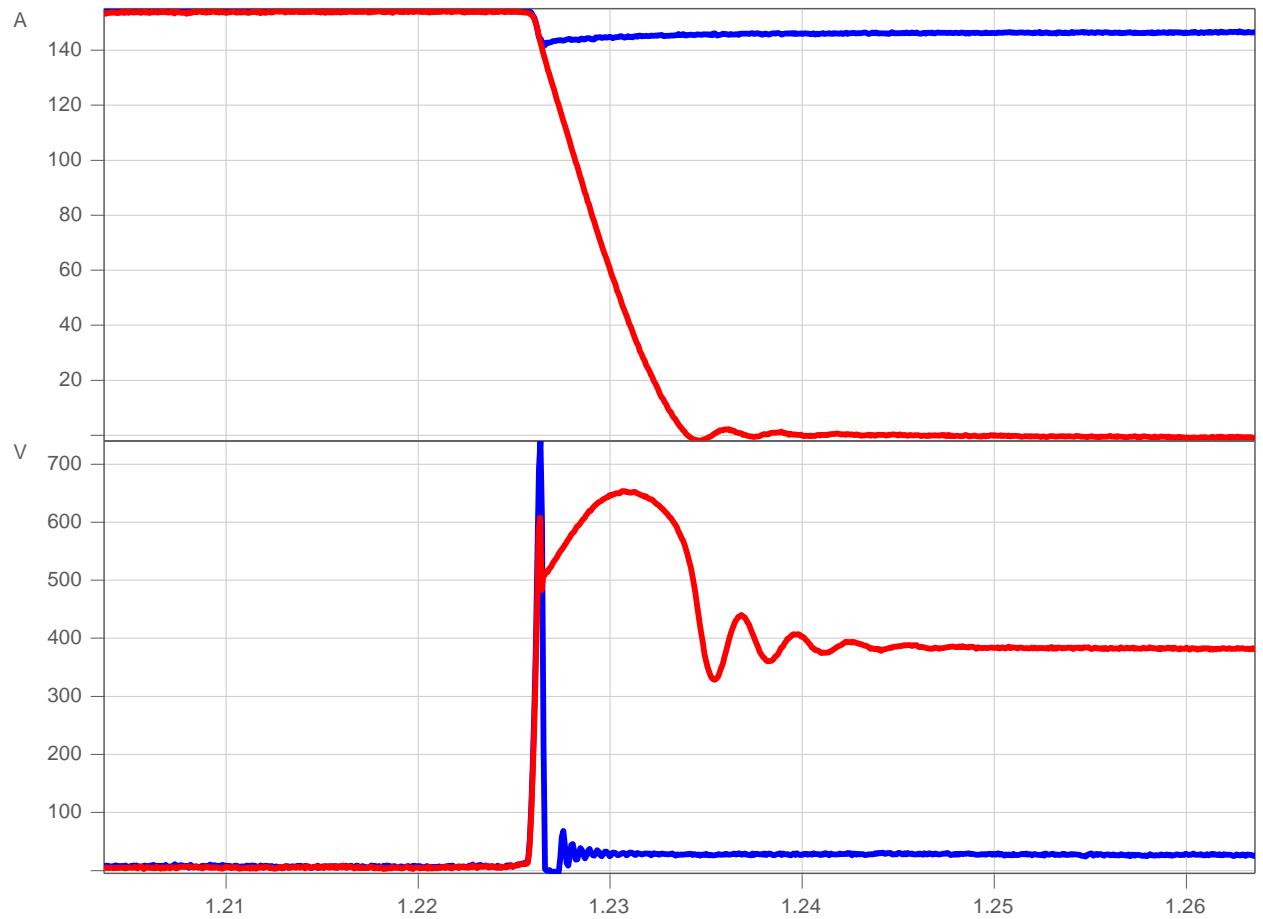


Abbildung 2.94: Vergleich der **Messung ohne Begrenzerschaltung** mit der **Messung mit Varistor und Kapazität**

Die gemessenen Peakspannungen betragen:

Wiederzündspannung ohne Begrenzerschaltung: 738 V

Peakspannung mit Begrenzerschaltung: 606 V

Auf die zweite Spannungserhöhung, die durch das Laden der Kapazität entsteht, wird nicht weiter eingegangen, da die Versuche mit Wiederzünden gezeigt haben, dass der erste Peak bei diesen el. Parametern für das Wiederzünden relevant ist.

Abbildung 2.95 zeigt den Verlauf mit der Begrenzerschaltung „Sidac in Reihe zu Kapazität“. Auch bei dieser Schaltung ist ersichtlich, dass die Peakspannung gesenkt werden kann und es somit zu keinem Wiederzünden gekommen ist.

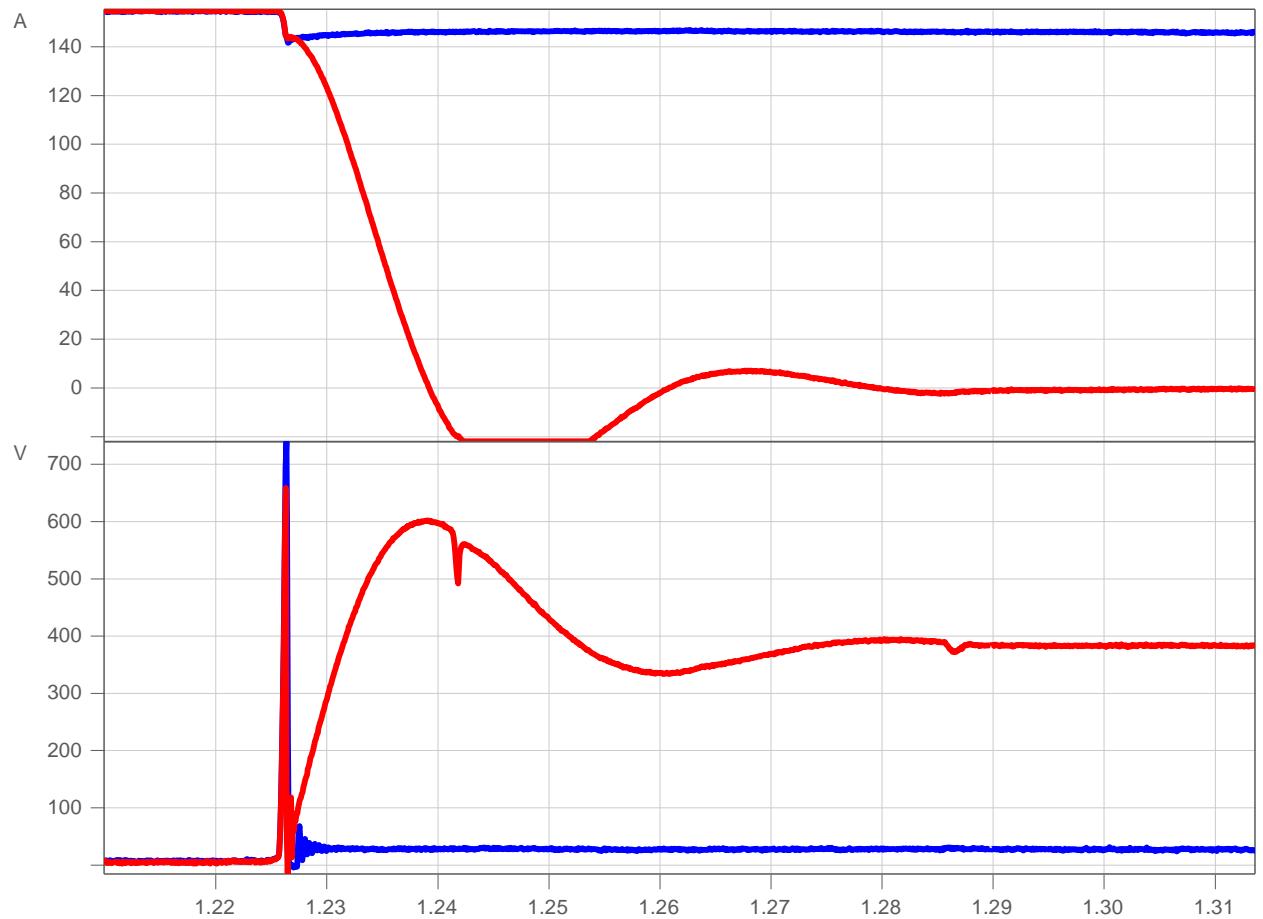


Abbildung 2.95: Vergleich der **Messung ohne Begrenzerschaltung** mit der **Messung mit Sidac und Kapazität**

Die gemessenen Peakspannungen betragen:

Wiederzündspannung ohne Begrenzerschaltung: 738 V

Peakspannung mit Begrenzerschaltung: 657 V

Die letzte getestete Begrenzerschaltung ist eine TVS-Diode in Reihe zu einer Kapazität. Das dazugehörige Oszillogramm ist Abbildung 2.96 zu entnehmen. Auch bei dieser Schaltung ist es gelungen, den ersten Peak so zu reduzieren, dass es zu keinem Wiederzünden gekommen ist.

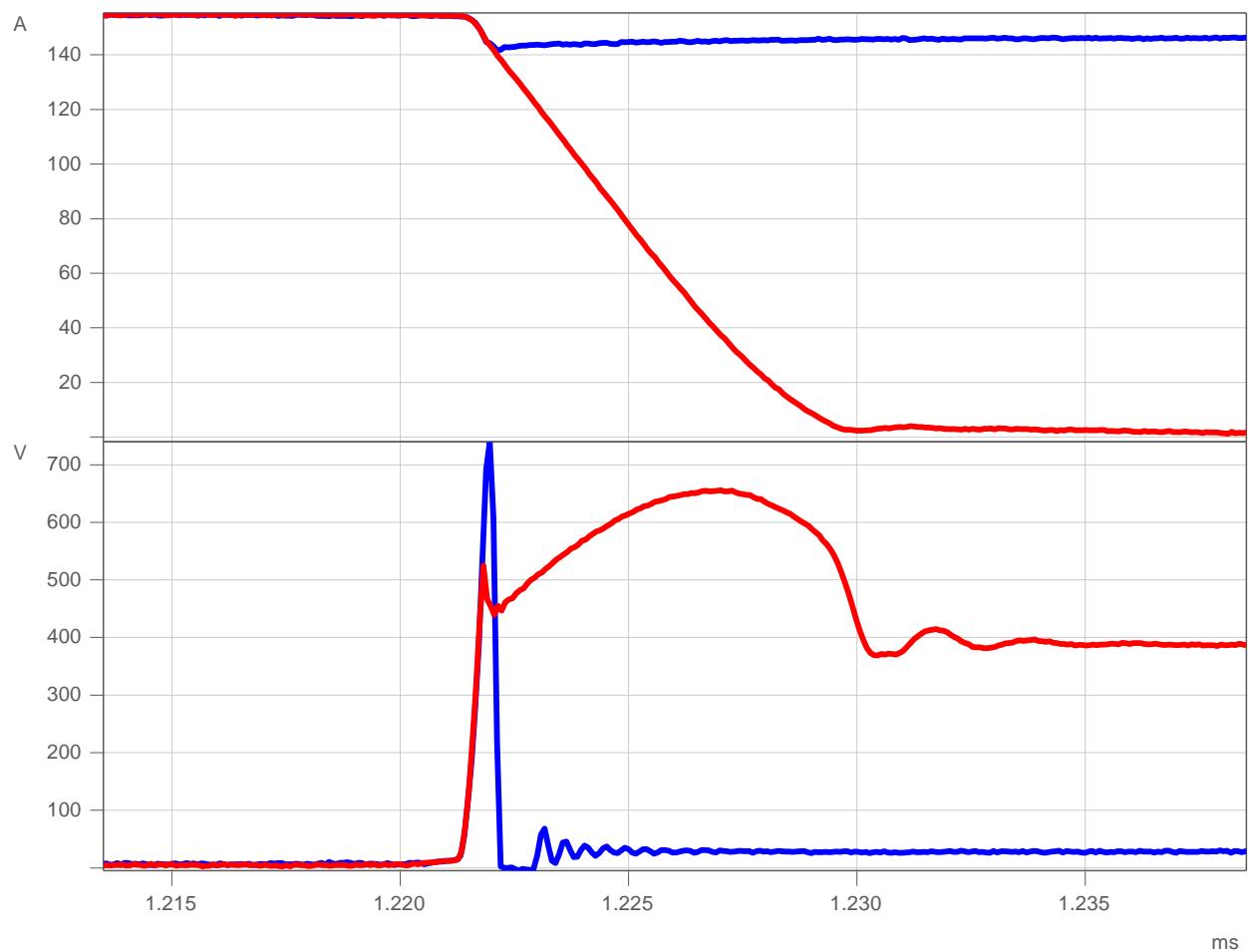


Abbildung 2.96: Vergleich der Messung ohne Begrenzerschaltung mit der Messung mit TVS-Diode und Kapazität

Die gemessenen Peakspannungen betragen:

Wiederzündspannung ohne Begrenzerschaltung: 738 V

Peakspannung mit Begrenzerschaltung: 522 V

Die drei ausgewählten Modelle haben gezeigt, dass es mit allen möglich ist, den ersten Peak so zu reduzieren, dass es zu keinem Wiederzünden der Funkenstrecke kommt. Im Anschluss an den Peak sackt die Spannung in Abhängigkeit des verwendeten Bauteils in Reihe zur Kapazität (Varistor, TVS-Diode oder Sidac) mehr oder weniger stark zusammen und es kommt zu einem weiteren, deutlich langsameren Spannungsanstieg. Dies ist das Laden der Kapazität.

Vergleich einer realen Messung mit Begrenzer-Schaltung mit der Simulation

Des Weiteren wurde ein Vergleich durchgeführt, indem eine reale Messung einer Begrenzer-Schaltung mit dem Simulationsergebnis verglichen wird. Ausgewählt wurde hierfür das Begrenzer-Modell Sidac in Reihe zur Kapazität. Das Oszilloskop hierzu ist Abbildung 2.97 zu entnehmen. In diesem Diagramm stellt der blaue Verlauf die Simulation und der rote Verlauf die reale Messung dar. Da die Begrenzer-Schaltung auf den Spannungspeak beim Abschalten des Hybridkreises

Einfluss nehmen soll, wird im nachfolgenden Oszillogramm nur der Abschaltvorgang gezeigt.

Kanal 1 zeigt den Gesamtstrom, Kanal 2 die Spannung über dem Modellschalter.

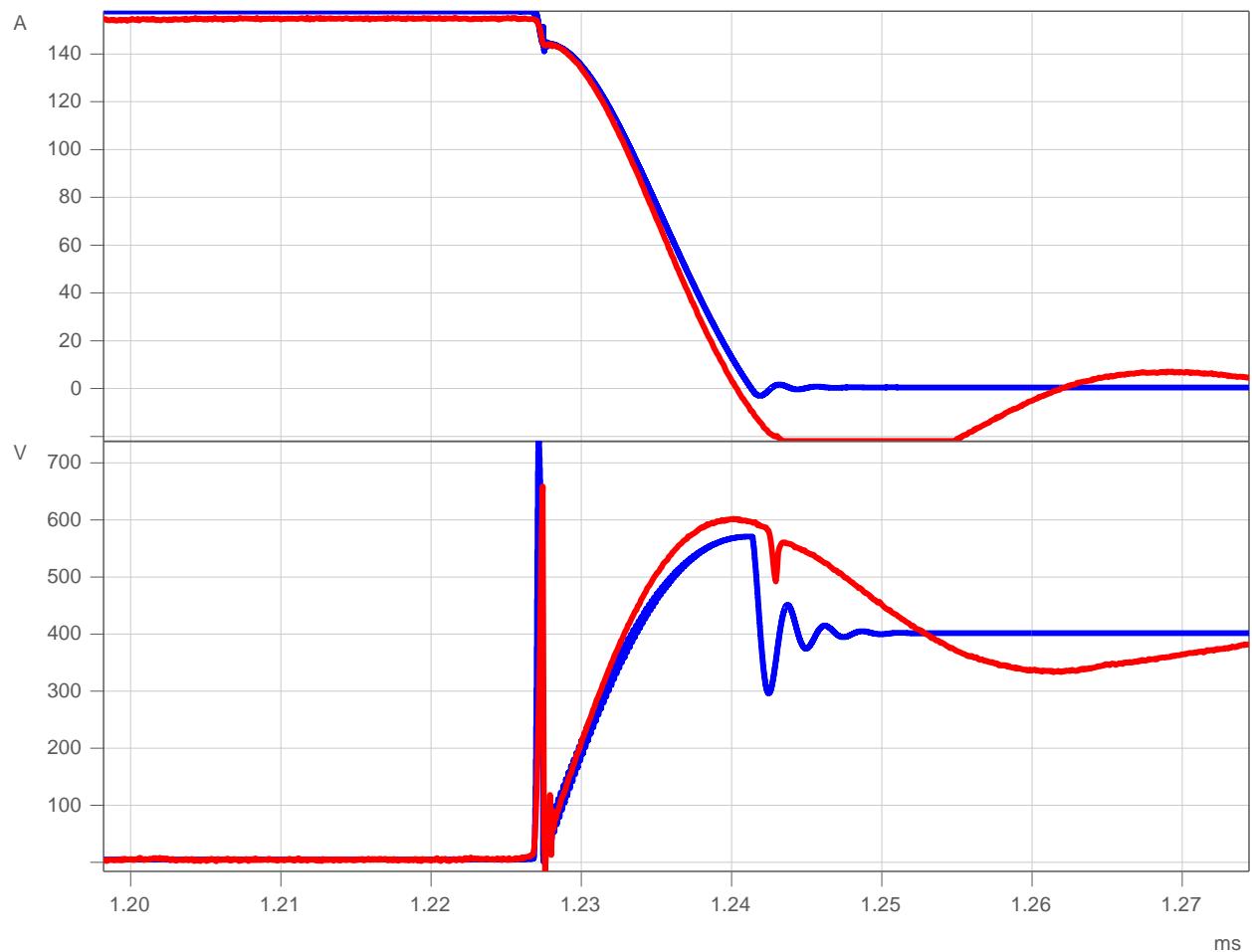


Abbildung 2.97: Vergleich der Simulation mit der realen Messung bei Begrenzerschaltung mit Sidac und Kapazität

Dem Oszillogramm ist zu entnehmen, dass Messung und Simulation in Näherung übereinstimmen. Der erste Spannungspeak der Simulation ist höher als der der Messung. Dies liegt an einem konservativ gestalteten Modell, wie dies auch schon beim Varistor-Modell der Fall war. Außerdem ist die Maximalspannung der Kondensatorladung in der Realität etwas höher als in der Simulation. Dies könnte mit dem Ort der Spannungsmessung oder der Bauteiltoleranz zusammenhängen. Der verwendete Sidac hat gegenüber dem Modell eine 1,5 % kleinere Schwellspannung (erklärt die kleinere Peakspannung in der realen Messung). Die Kapazität der verwendeten Kondensatoren ist 14 % kleiner als der angegebene Nominalwert von 2 μ F. Dies könnte die größere gemessene Spannung, die durch den Kondensator bedingt ist, erklären. Die Frequenz am Ende des Abschaltvorgangs muss nicht weiter beachtet werden, da in der Simulation

ausschließlich darauf geachtet wurde, dass die Peak-Höhe und die Spannungssteilheit stimmen.

Aufnahmen mit der Highspeedkamera

Zuletzt wurde mit der Highspeedkamera ein Vorgang mit Wiederzündung und einer ohne Wiederzündung aufgenommen. Für die Aufnahme Wiederzündung wurde wieder mit den identischen Parametern wie zuvor gearbeitet (150 A; 8,63 µs Zeitkonstante; Lichtbogenbrenndauer: 100 µs; Lichtbogenfreie Zeit: 50 µs). Für die Aufnahme ohne Wiederzündung wurde die Begrenzer-Schaltung TVS-Diode in Reihe zu einer Kapazität verwendet.

Vor der ersten Belastung wurde ein Foto von den Elektroden gemacht (siehe Abbildung 2.98). Da die Elektroden zuvor mehrfach belastet wurden, hat die linke Elektrode einen Rußfleck. Das weitere Aussehen kann der nachfolgenden Abbildung entnommen werden.

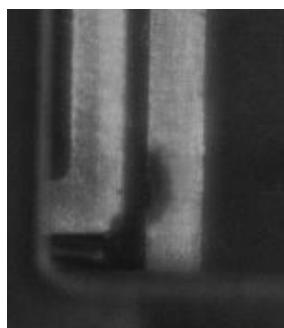


Abbildung 2.98: Elektroden vor den Belastungen für die Aufnahmen mit der Highspeedkamera

Das Oszillogramm für die Aufnahme des Wiederzündprozesses kann Abbildung 2.99 entnommen werden. In Kanal 1 ist erneut der Gesamtstrom und in Kanal 2 die Spannung über dem Modellschalter zu sehen. Kanal 3 zeigt, wann die Kamera zeitlich ausgelöst hat.

Im Oszillogramm zu sehen ist, dass der Lichtbogen nach einer Lichtbogenbrenndauer von 100 µs für 50 µs kurzgeschlossen (lichtbogenfreie Zeit) wird. Danach schaltet der Kurzschluss-IGBT ab und es entsteht ein Spannungspeak. Da die Funkenstrecke noch nicht spannungsfest ist, kommt es zum Wiederzünden der Funkenstrecke. Am Ende des Verlaufs wird die Spannung durch den IGBT-Schalter abgeschaltet. Im Anschluss an das Oszillogramm sind in Tabelle 2.15 die Aufnahmen der Highspeed-Kamera dargestellt. Zeitlich können die Bilder anhand der Beschriftung in Kanal 3 dem Oszillogramm zugeordnet werden.

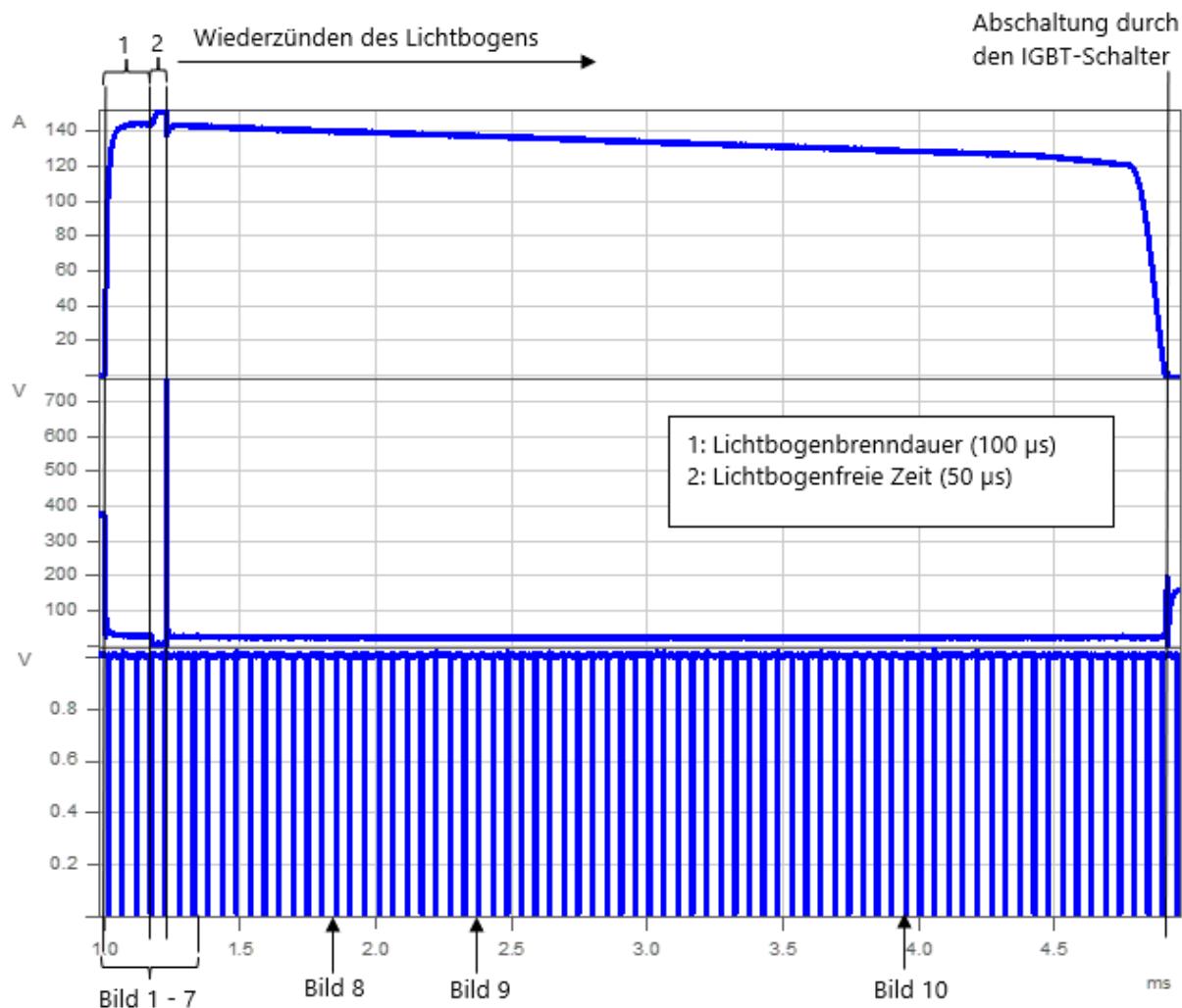


Abbildung 2.99: Wiederzünden der Funkenstrecke

Tabelle 2.15: Aufnahmen der Highspeedkamera

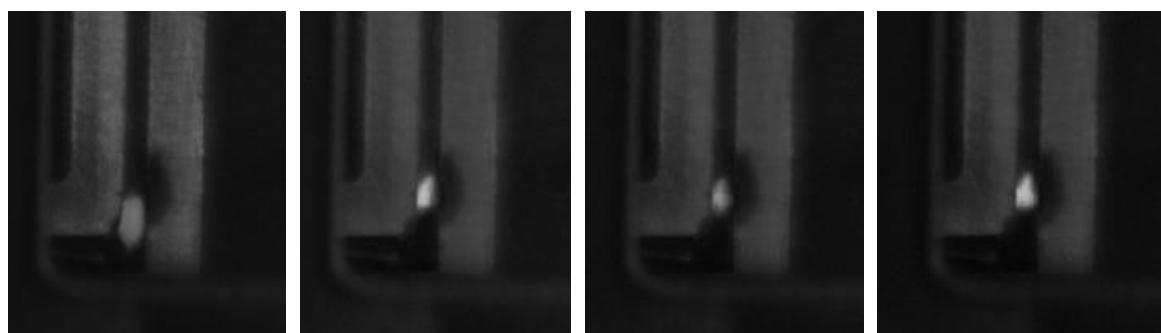


Bild 1

Bild 2

Bild 3

Bild 4

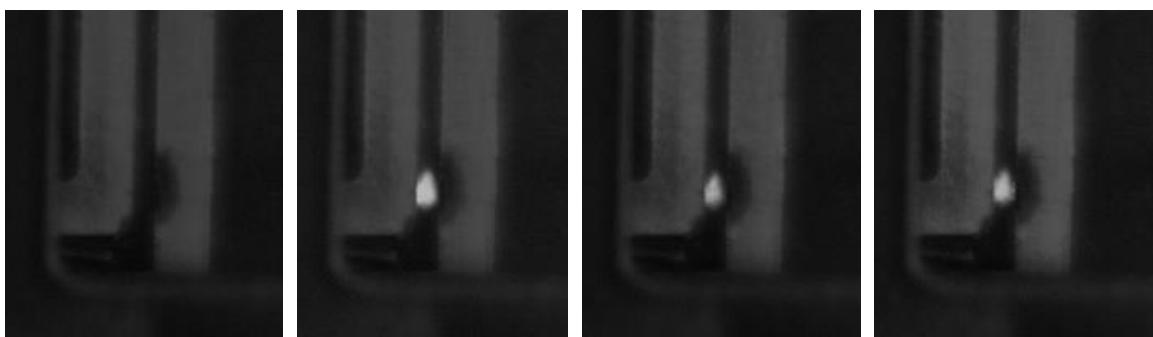


Bild 5

Bild 6

Bild 7

Bild 8

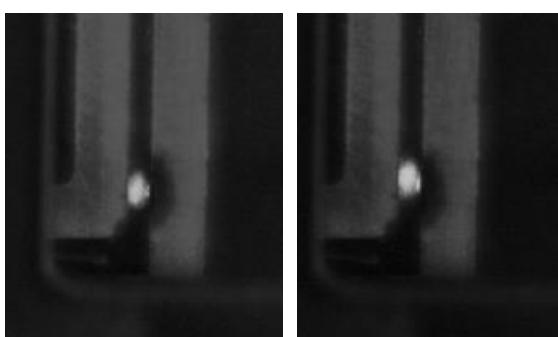


Bild 9

Bild 10

Die Bilder der vorangegangenen Tabelle zeigen, dass der Lichtbogen in Bild 5 vollständig gelöscht war. Danach ist es, nach Abschalten des IGBTs zum Kurzschluss der Funkenstrecke, durch Wiederzünden gekommen. Der Ort des Wiederzündens ist ähnlich dem Ort des Lichtbogens vor dem Löschen.

Im Anschluss wurde die vorangegangene Messung wiederholt mit der Begrenzerschaltung TVS-Diode in Reihe zur Kapazität. Das Oszillogramm hierzu ist Abbildung 2.100 zu entnehmen. Im Anschluss an das Oszillogramm sind in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** die Aufnahmen der Highspeed-Kamera dargestellt. Die zeitliche Zuordnung kann dem Oszillogramm entnommen werden.

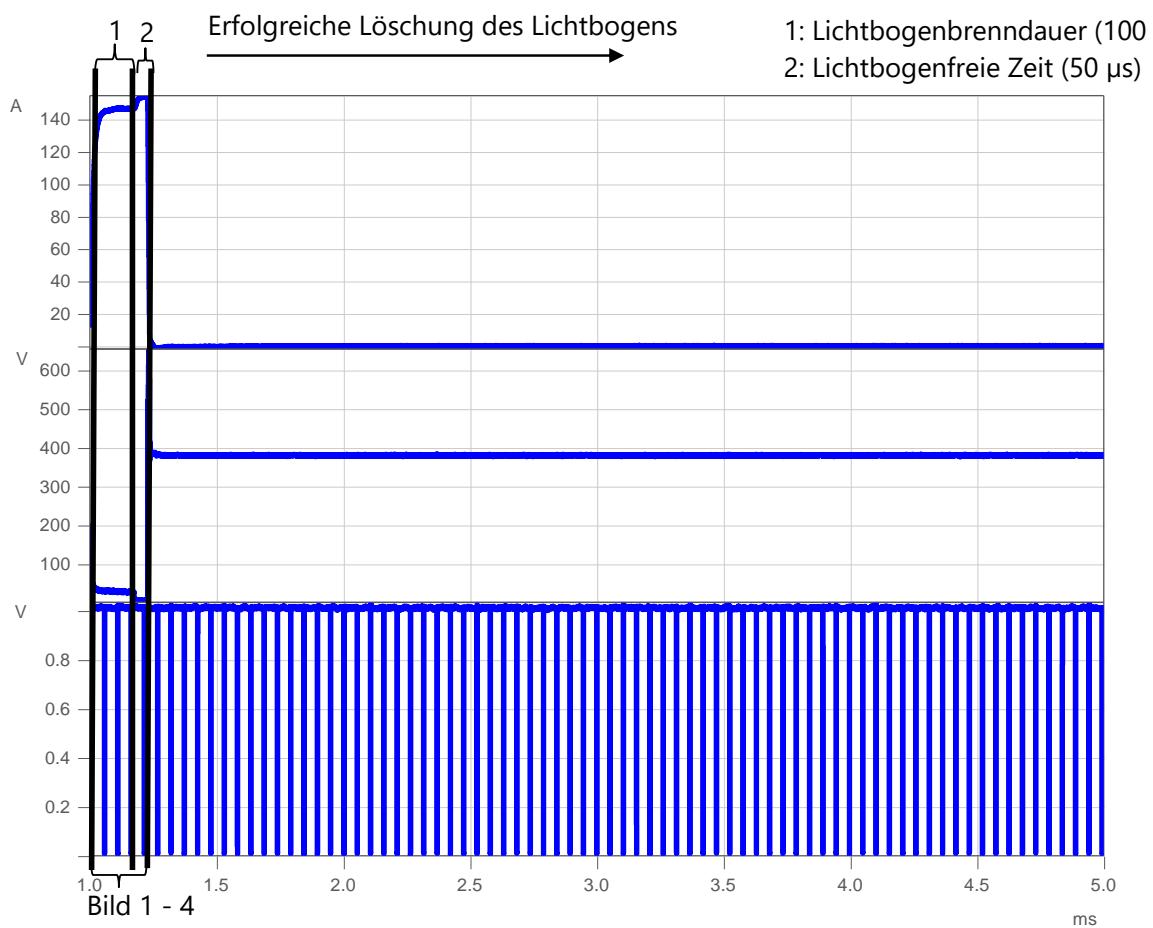
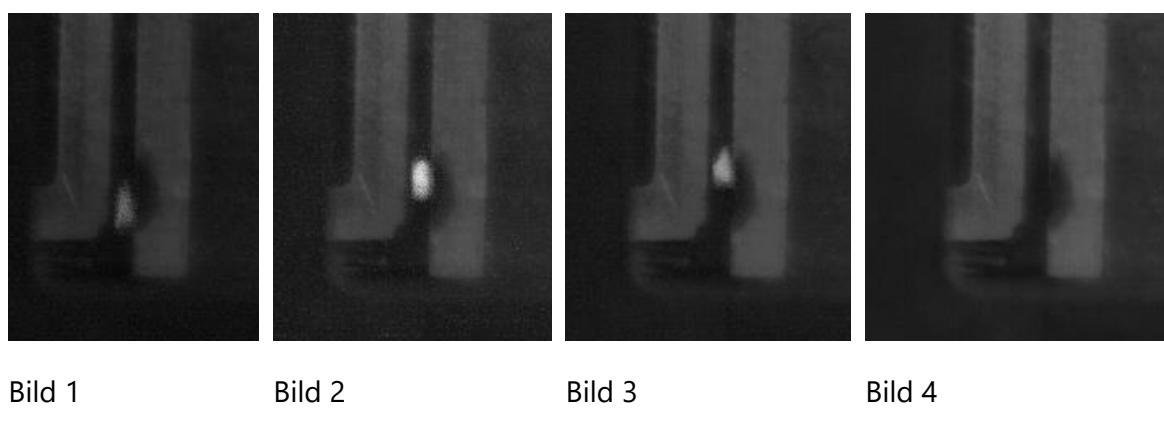


Abbildung 2.100: Verhindern des Wiederzündens der Funkenstrecke mittels Begrenzerschaltung

Tabelle 2.16: Aufnahmen der Highspeedkamera



2.5 AP 5 - Modellbildung und Simulation

E-T-A, DEHN lieferten bei Bedarf aus den Arbeitspaketen Messergebnisse zur Verifikation.

2.5.1 EGA:

AP 5.2 Modellbildung und Simulation

Hauptziel des Arbeitspakets 5.2 ist die Erstellung eines Gesamtnetzwerkmodells für den im Projekt aufgebauten Modell-Hybridschalter. Mit Hilfe des entworfenen Simulationsmodells erfolgte die Untersuchung des Schaltvorgangs eines hybriden Schaltgerätes. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse wurden mit den in Arbeitspaket 4.2 erfassten Messungen verglichen.

Der Bereich der Modellbildung und Simulation durchlief, wie auch die anderen Arbeitspakete, verschiedene Stufen. Zunächst erfolgt eine allgemeine Orientierung im Bereich der verschiedenen Simulationsplattformen. Herangezogen wurden hierfür MATLAB Simulink, LTspice sowie ATP-Draw. Zwischen diesen drei Alternativen wurden direkte Vergleiche hinsichtlich Handhabbarkeit, Modellangebot und grundsätzlicher Eignung für die zu erledigende Simulationsaufgabe durchgeführt. Nach verschiedenen Versuchen und Variationen stellte sich MATLAB Simulink als für diese Aufgabe am besten geeignetes Simulationsprogramm heraus. LTspice zeigte in einigen Situationen Probleme hinsichtlich der Modelfunktion sowie Schwierigkeiten in der Konvergenz der Simulation.

Der Aufbau der einzelnen Gesamtnetzwerkmodelle erfolgte in allen Fällen gleich. Die Modelle sind stufenweise aufgebaut und erweitert worden, um somit eine möglichst einfache Fehleridentifikation und -behebung zu gewährleisten. Das oben genannte Gesamtnetzwerkmodell umfasst dabei Quelle, Hybridschalter und Last, wie aus nachfolgender Darstellung hervorgeht.

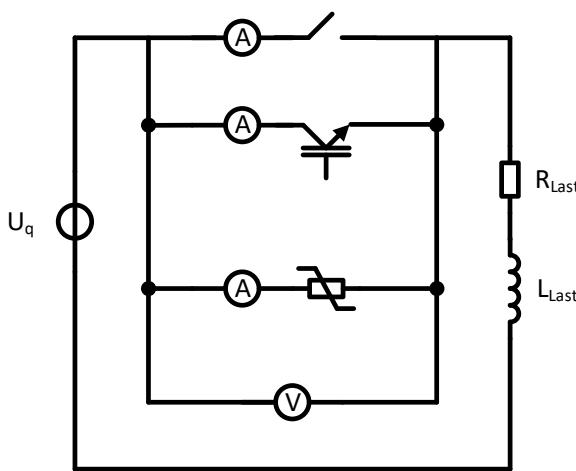


Abbildung 2.101: Vereinfachtes Ersatzschaltbild des Simulationsmodells in MATLAB Simulink

Während des Aufbaus der Modelle sind verschiedene Ansätze zur Modellierung der zentralen Elemente der einzelnen Teilsysteme des Hybridschalters (mechanisches Schaltgerät, Leistungshalbleiter, Überspannungsschutzelement) untersucht worden. Unterstützt wurden diese Betrachtungen, insbesondere im Bereich der

Modellierung des leistungselektronischen Schaltelements, durch studentische Hilfskräfte und zugehörige studentische Arbeiten. Durch den Projekt Projektpartner INP ist für den in der mechanischen Schaltstrecke auftretenden Lichtbogen ein Modell entwickelt worden. Ziel ist hierbei, dessen Verhalten und Einfluss auf den Schaltvorgang eines Hybridschalters zu beschreiben. Damit dieses Modell im Gesamtnetzwerkmodell von EGA eingesetzt werden kann, ist dieses dementsprechend in ein Look-up-Table basiertes Modell überführt worden. Zusätzlich ist mit Unterstützung durch den Projektpartner DEHN für den MOV, als Element des Überspannungsschutzes, ein messwertbasiertes Modell für den Einsatz in LTspice und Simulink, durch EGA erstellt worden. Im Verlauf der Forschung sind, wie unter Arbeitspaket bereits erwähnt, Betrachtungen und Untersuchungen zum Einfluss der parasitären Kommutierungsinduktivitäten getätigt worden. Die Verteilung dieser Induktivitäten ist in folgender Skizze dargestellt. Diese Betrachtungen sind sowohl mit den genannten Modellen von INP und DEHN als auch mit den Standardmodellen aus MATLAB Simulink durchgeführt worden. Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse sind jene, mit den Standardmodellen aus Simulink gewonnenen Simulationsergebnisse.

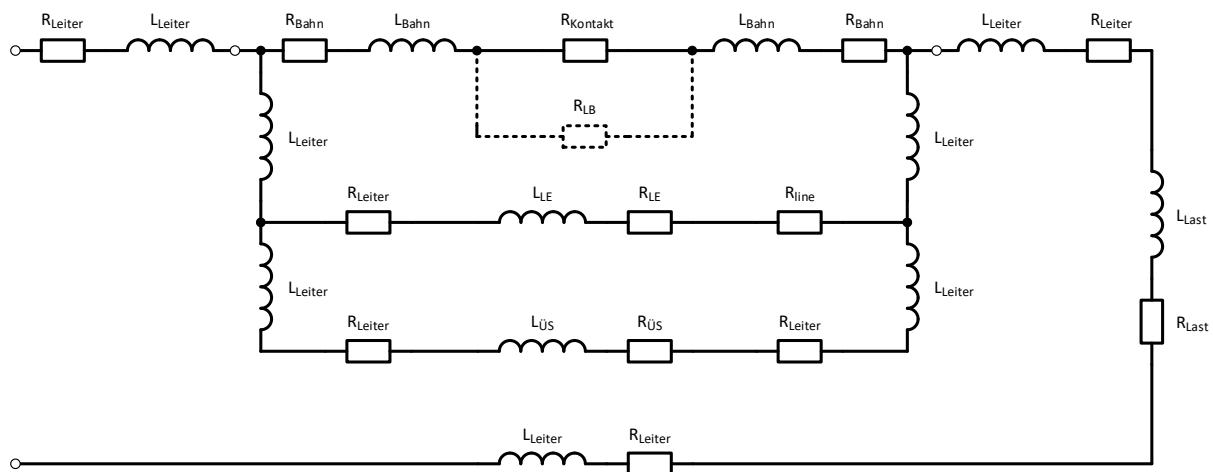


Abbildung 2.102: Erweitertes ESB des Versuchsaufbaus mit parasitären Widerständen und Induktivitäten

Im Fokus der Betrachtungen stand der Einfluss auf das Schaltverhalten des Hybridschalters, und insbesondere der Einfluss auf das Kommutierungsverhalten des Stromes vom mechanischen Schaltgerät im Nominalpfad auf das leistungselektronische Schaltgerät im Kommutierungspfad. Die parasitären Größen sind messtechnisch erfasst worden und in das Simulationsmodell in MATLAB Simulink eingeflossen, welches folgendem Bild dargestellt ist.

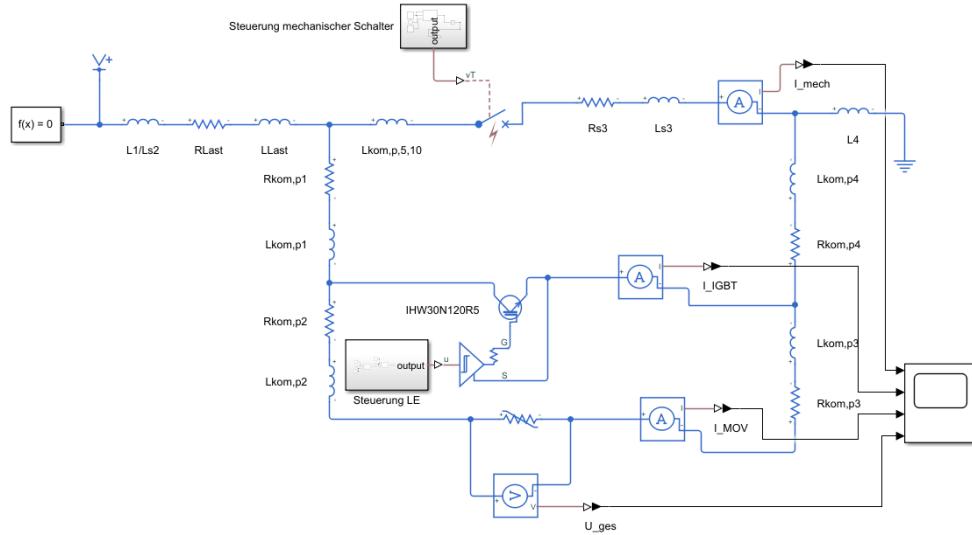


Abbildung 2.103: Simulationsmodell in MATLAB Simulink

Die drei Teilsysteme des Hybridschalters aus Abbildung 2.101 sind durch oben genannte Standardmodelle aus Simulink nachgebildet worden. Besonderheit im Hinblick auf das mechanische Schaltgerät ist dabei die Nachbildung des Lichtbogens durch die Nutzung des "Circuit Breaker" Blocks in welchem das Mayr-Modell implementiert ist. Wie bereits zuvor erwähnt, stellt die Variation der Kommutierungsinduktivität den Kern der Betrachtungen dar. Beispielhaft hierfür ist in Abbildung 2.102 der Kommutierungsvorgang 1 dargestellt.

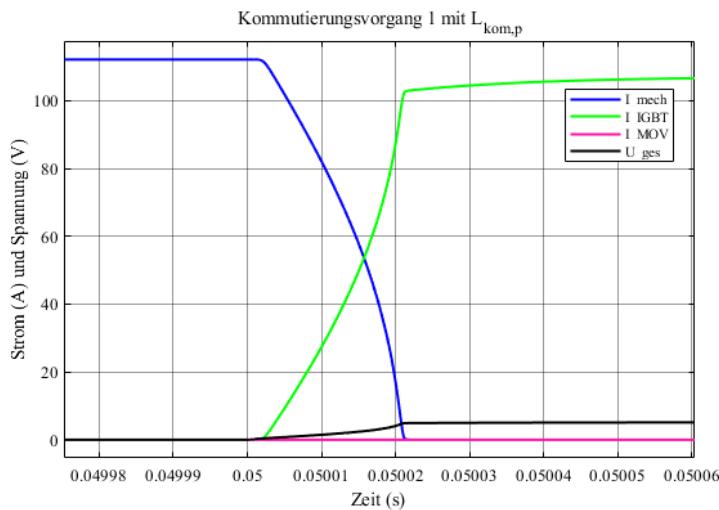


Abbildung 2.104: Simulierter Kommutierungsvorgang 1 im Hybridschalter mit parasitärer Kommutierungsinduktivität

Dieser beschreibt den Übergang des Stromes vom mechanischen Schaltgerät I_{mech} auf den Leistungshalbleiter, hier I_{IGBT} . Es zeigt sich ein steiles Absinken des Stromes im mechanischen Schaltgerät unter gleichzeitigem Ansteigen des Stroms im Leistungshableiter. Dieser Übergang verstärkt sich zum Ende des Kommutierungsprozesses nochmals. Auf Grund des nun veränderten Lastkreises zeigt sich ein verringelter Laststrom, welcher in der Anordnung fließt. Der Anstieg des Spannungsfalls lässt sich mit dem steigenden Lichtbogenwiderstand im

mechanischen Schalter begründen. Begrenzt wird dieser auf den Spannungsabfall über dem leistungselektronischen Schaltgerät, welches den Laststrom nun führt. Dementsprechend beschreibt Kommutierungsvorgang 2 (siehe Abbildung 2.103) den Übergang des Stromes vom Leistungshalbleiter auf das Element des Überspannungsschutzes, I_{MOV} .

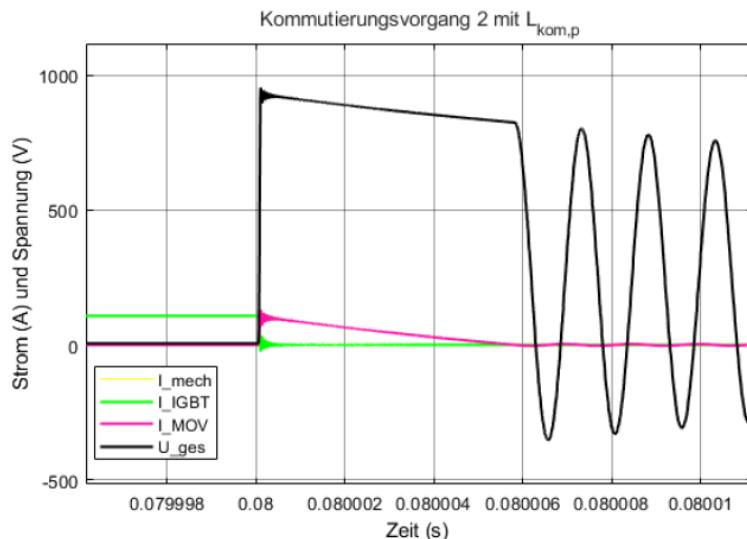


Abbildung 2.105: Simulierter Kommutierungsvorgang 2 im Hybridschalter mit parasitärer Kommutierungsinduktivität

Chrarakteristisch für diesen Prozess ist die steile Ausschaltflanke des leistungselektronischen Schaltelementes. Damit wird ein hohes di/dt hervorgerufen, welches an den parasitären Induktivitäten des Kreises zu deutlichen Überspannungen führt. Um diese und die damit einhergehenden Gefahren für die Komponenten des Hybridschalters zu limitieren ist ein Element des Überspannungsschutzes vorgesehen. In diesem Fall ist ein MOV-Modell genutzt worden. Mit dem Anstieg der Überspannung wird auch die Ansprechspannung des MOV erreicht. Daran angeschlossen ist der Abbau der in den parasitären Induktivitäten gespeicherten Energie. Gekennzeichnet ist dieser Prozess durch den "Rücken" welcher im Verlauf der Spannung U_{ges} zu erkennen ist. Ebenso zeigt sich ein sanftes Abklingen des Varistorstromes innerhalb dieses Zeitbereichs. Gefolgt wird dieser Vorgang von kapaziv-induktiven Schwingungen welche über einen kurzen Zeitbereich abklingen und den Ausschaltvorgang somit abschließen.

Mit Hilfe des Modells in MATLAB Simulink ist das Verhalten des Hybridschalters unter weiterer Variation verschiedener Modellparameter untersucht worden:

- Netzspannung
- Nennstrom
- leistungselektronisches Element
- Überspannungsschutzelement
- mechanische Schaltstrecke

- parasitäre Elemente

Die im weiteren Verlauf der simulativen Untersuchung gewonnenen Ergebnisse stehen in guter Übereinstimmung mit den im Zuge der Untersuchungen aus [28] gewonnenen Erkenntnissen.

2.5.2 INP:

Zielstellung des Arbeitspakets

Ziel dieses Aufgabenpakets war, einerseits den experimentell bestimmten Eigenschaften und Kenngrößen in Form eines geeigneten Modells ein physikalisch-technisches Gerüst zu geben. Anderseits sollte mit Hilfe des Modells eine weitergehende Verallgemeinerung der Erkenntnisse zum Zeitverhalten der Schaltstrecke für die Anwendung ermöglicht werden. Das INP konzentrierte sich im Vorhaben auf die Erarbeitung und die Anwendung eines plasmaphysikalischen Modells sowie der Ableitung eines elektrischen Modells für die mechanische Schaltstrecke. Anschließend werden die mathematischen Ergebnisse Anhand der experimentellen Ergebnissen aus AP 7 (Federführung E-T-A) verifiziert und das mathematische Modell ggf. angepasst.

Zuordnung zu den APs der anderen Projektpartner

Ein Teil der Ergebnisse dieses Arbeitspaket diente der Ableitung eines elektrischen Bogenmodells für das Netzwerkmodell in AP5.10, welche von den Partner TU II und E-T-A- für die Erarbeitung der theoretischen Kennfelder für die Schaltzeitpunkte der Hybridelektronik in AP4 und AP7 vorgesehen wurde.

AP 5.1 Physikalisches Modell (INP)

In dem AP5 wurden die experimentellen Untersuchungen mit der Modellbildung und Simulation und der mathematischen Erfassung der physikalischen Vorgänge während und von der Stromunterbrechung unterstützt.

AP 5.1.1 Festlegung der technischen Randbedingungen

Die technischen Randbedingungen für die angestrebte plasmaphysikalische Modellbildung auf Grundlage der Geometrie, Materialien und Belastungsgrößen wurden festgelegt.

Die Wahl des konkreten Modellierungsansatzes ist von mehreren Bedingungen abhängig. Im spezifischen Fall des betrachteten Hybridschalters sollen folgende Punkte berücksichtigt werden:

- Interner Aufbau der Schaltkammer, wie z.B. Dimensionen, Verwendung von Löschbleche, Verhältnis von Elektrodenoberfläche zur Wandoberfläche der Gehäuse

- Elektrodenabstand
- Berücksichtigung der Elektrodenbewegung
- Referenzzusammensetzung des Gases
- Art der Entladung (z.B. Glimmentladung, Funke, Lichtbogen), Notwendigkeit der Betrachtung von Übergängen zwischen unterschiedlichen Entladungsarten
- Plasmadynamik, u.a. Rolle der Gasströmung, Abweichung von Symmetrie, Bewegung der Ansatzpunkte auf den Elektroden
- Gemessene Strom- und Spannungsverläufe, Druckaufbau, maximale Lichtbogendauer;
- Elektrodenerosion.

AP 5.1.2 Festlegung der technischen Randbedingungen

Die wesentlichen Erkenntnisse für den möglichen Modellierungsansatz wurden im Arbeitspaket AP3 gewonnen. Die Schaltkammer hat einen (relativ) einfachen Aufbau, ohne Löschhilfen. Das Entladungsvolumen ist deutlich kleiner als das Gesamtvolumen des Kammers. Die Entladungsdauer liegt im Bereich von bis zu einigen 100 μ s. Der Antrieb leistet eine Öffnungsgeschwindigkeit von ca. 1 m/s. Der maximale Abstand zwischen den Elektroden während der Entladungsphase liegt somit im Bereich zwischen 20 μ m und 50 μ m. Für spätere Anwendungen sind allerdings auch die Elektrodenabstände bis zu 1 mm sowie die Entladungsdauer bis zu 1 ms vom Interesse.

Das Initialplasma entsteht durch eine Brückenexplosion – schnelle Aufheizung (unter 1 μ s) der letzten Kontaktstelle zwischen den Elektroden auf eine Temperatur oberhalb des Schmelzpunktes mit anschließender Verdampfung und Ionisation. Durch diesen Vorgang wird das Entladungsvolumen nahezu vollständig mit dem Metalldampf gefüllt. Die entsprechende Gemischzusammensetzung kann zunächst als zu 100% bestehend aus Elektrodenmaterial (Metalldampf) angenommen werden. Der gemessene Spannungsabfall liegt unter 12 V. Von besonderem Interesse ist der Stromnullübergang und die anschließende post-arc-Phase.

AP 5.1.3 Erstellung eines physikalischen Modells vom Lichtbogen an der Elektrodenstrecke unmittelbar, während und nach dem Stromnulldurchgang

Mögliche Modellierungsansätze:

Mögliche Modellierungsansätze sind in der Tabelle 34 zusammengefasst. Abhängig von dem Entladungstypen und der zu berücksichtigenden Prozessen in dem Entladungsplasma kann der geeignete Ansatz gewählt werden. In Anbetracht der experimentellen Ergebnisse wurde die Entwicklung eines räumlich eindimensionalen zeitabhängigen Fluid-Poisson-Modells mit beweglichen Elektroden favorisiert. Die Vorteile dieses Modells sind die Betrachtung von möglichen Nichtgleichgewichteffekten, die Analyse der Entladungsdynamik sowohl

in der aktiven Phase als auch in der Abklingphase und die selbstkonsistente Beschreibung der Elektrodengebiete.

Tabelle 2.17: Mögliche Modellansätze

Modellansatz	Vorteile	Nachteile
MHD + Gleichgewicht	<ul style="list-style-type: none"> • 2D/3D Modellierung möglich • Einbeziehung der Gasströmung • Optimierung der Schaltkammer 	<ul style="list-style-type: none"> • Einbindung der Beschreibung von Randgebieten nur bedingt möglich • Beschränkte Aussagen für den Stromnulldurchgang
MHD + Nichtgleichgewicht	<ul style="list-style-type: none"> • 2D/3D Modellierung prinzipiell möglich • Einbeziehung der Gasströmung • Einbindung der Beschreibung von Randgebieten möglich • Optimierung der Schaltkammer 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher mathematischer und numerischer Aufwand • Reduzierung der Dimensionen nötig (Verlust der Aussagekraft u.a. über Strömungsverhältnisse)
Kinetische Modelle: • Fluid-Poisson-Solver PIC-MC-Simulationen	<ul style="list-style-type: none"> • Präzise Beschreibung des Plasmas, der Randschichten, der Elektroden • Großer Gültigkeitsbereich u.a. um Stromnull 	<ul style="list-style-type: none"> • Hoher mathematischer und numerischer Aufwand • Meistens Beschränkung auf 1D-Modelle
Analytische Modelle: • Cassie-Mayr	<ul style="list-style-type: none"> • einfach zu realisieren • ermöglichen Einbau in 	<ul style="list-style-type: none"> • räumliche Effekte werden nicht einbezogen (0D-Modelle)

• Analyse der Durchbruch-Kriterien (Streamerbildung)	elektrotechnische Modelle zwecks Gesamtsystem-Modellierung	• erfordern experimentelle Kenntnisse, sowie Festlegung diverser Parameter
--	--	--

Modellierungsstrategie und erste Ansätze:

Die Modellbildungsstrategie wurde wie folgt ausgelegt. Im ersten Schritt wurde ein Fluid-Poisson–Modell für ruhende Elektroden entwickelt. Dabei wurde die Elektrodentemperatur und die Gastemperatur festgelegt. Als Entladungsmedium wurde anlehnend an experimentelle Findungen Silberdampf gewählt. Dieses Modell wurde in mehreren Schritten erweitert. Zur Beschreibung der Schaltstrecke sowie ihrer Wiederverfestigung wurde das Modell um die Energiebilanz des Gases und Elektrodenbewegung erweitert. Weiterhin wurden im Züger der Modellerweiterung wurden die Energiebilanzen an den Elektrodenoberflächen aufgestellt.

Das erstellte physikalische Modell wurde unter Berücksichtigung des Elektronenemissionsverhaltens der aufgeheizten Elektroden und dessen Einfluss auf die Ionisation in den Fallgebieten erweitert. Um die Abkühlodynamik der Elektroden nach der Stromunterbrechung zu berücksichtigen, wurde das entsprechende Elektrodenenergiebilanz aufgestellt. Die durchgeföhrten Simulationen haben gezeigt, dass das komplette physikalische Modell in der Abklingphase (Wiederverfestigungsphase) auf seine Grenzen stößt. In der Abwesenheit von Ladungsträger gewinnen numerische Instabilitäten an Bedeutung. Die Ergebnisse sind daher nicht mehr vertrauenswürdig. Für die Beschreibung der Wiederverfestigung wurde dann eine andere Strategie angewendet. Ausgehend aus der Zusammensetzung des Gemisches nach der Entladung wurde das kritische Feld (Durchbruchsfeld) in Abhängigkeit von Metalldampfanteil in Luft und Temperatur berechnet. Dabei kam ein null-dimensionales Modell einschließlich einen Solver für die kinetische Gleichung der Elektronen zum Einsatz. Der Durchbruch ereignet sich bei einer Feldstärke, welche ein Überfluss der Ionisationsprozesse über Rekombination und attachment gewährleistet.

Die entsprechenden Daten wurden in Form von Tabellen gespeichert. Für die Berechnung der Durchbruchspannung in Abhängigkeit von der Zeit werden dann folgende Daten benötigt: Zeitabhängige Verläufe von Gaszusammensetzung, Gastemperatur und Elektrodenabstand.

Die Gaszusammensetzung wurde in erster Näherung aus dem Verdampfungsdruck des Elektrodenmaterials und N₂/O₂ Gemisch (79/21) bei einem Gesamtdruck von einer Atmosphäre abgeschätzt. Der Verdampfungsdruck des Elektrodenmaterials

ist nur eine Funktion der Oberflächentemperatur. Für die Bestimmung des zeitabhängigen Verlaufs der Oberflächentemperatur nach der Stromunterbrechung wurde ein entsprechender Ansatz ausgearbeitet. Mit Hilfe dieses Modells lässt sich ein Spannungsbedarf für die Wiederzündung/Neuzündung der Entladung ausrechnen. Zusammen mit den Daten aus dem physikalischen Modell lassen sich daraus:

- elektrische Festigkeit der Schaltstrecke berechnen sowie
- geeignete Ansätze und vereinfachte Modelle der Schaltstrecke für Netzwerksimulation

ableiten.

Annahmen für das physikalische Modell:

- axiale Symmetrie
- axiale Struktur dominierend für Entladungseigenschaften
- radiale Homogenität (bzw. Profilvorgabe möglich)
- vernachlässigbare Gasdynamik
- Bewegung der Elektroden auf der Zeitskala deutlich langsamer als Prozesse im Entladungsplasma
- Vernachlässigung der Entladungsinitiierung (keine selbstkonsistente Beschreibung der Brückenexplosion)
- Definition des Initialplasmas durch Vorgabe der Teilchendichte, Temperatur der Elektronen und des Gases
- Entladungsplasma dominiert durch Elektrodenmaterial
- Vorgabe der angelegten Spannung (DC oder zeitabhängig)

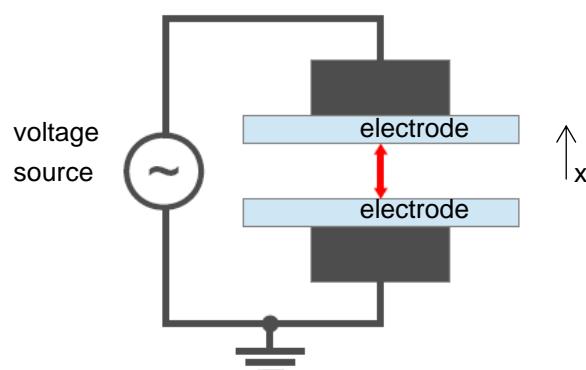


Abbildung 2.106: Schematische Repräsentation der Schaltstrecke (roter Pfeil).

AP 5.1.4 Erstellung eines Modells für die elektrische Belastung der Elektrodenstrecke sowie der Wiederverfestigung

Die Grundlagen eines eindimensionalen Fluid-Poisson-Modells sind in [29], [30] dargelegt. Folgende Gleichungen liegen dem Modell zugrunde:

- Teilchenbilanzgleichungen für Plasmaspezies n_j

$$\partial_t n_j + \partial_x \Gamma_j = S_j$$

- Energiebilanz der Energiedichte der Elektronen w_e

$$\partial_t w_e + \partial_x Q_e = -e_0 \Gamma_e E + S_e, \quad w_e = \varepsilon n_e$$

- Poisson-Gleichung für das elektrische Potenzial ϕ , Gleichung für elektrisches Feld E

$$-\varepsilon_0 \partial_x^2 \phi = \sum_j q_j n_j, \quad E = -\partial_x \phi$$

Die Teilchen- und Energieflüsse (Γ_j, Q_e) werden durch Drift-Diffusion-Näherung definiert.

- Schwerteilchen

$$\Gamma_j = -\partial_x (D_j n_j) + \text{sgn}(q_j) b_j E n_j$$

- Elektronen (konsistente Näherung aus Vier-Momenten-Modell [29] [30])

$$\begin{aligned} \Gamma_e &= -\frac{1}{\nu_e} \partial_x \left(\left(\frac{2\varepsilon}{3m_e} + \hat{\xi}_2 \right) n_e \right) - \frac{e_0}{m_e \nu_e} E n_e \\ Q_e &= -\frac{1}{\tilde{\nu}_e} \partial_x \left((\tilde{\xi}_0 + \tilde{\xi}_2) n_e \right) - \frac{e_0}{\nu_e} \left(\frac{5\varepsilon}{3m_e} + \hat{\xi}_2 \right) E n_e \end{aligned}$$

Hierbei sind folgende Bezeichnungen eingeführt: Elementarladung e_0 , Elektronenmasse m_e , Beweglichkeit b_j , Diffusionskoeffizient D_j , Stoßfrequenz ν , Ladungszahl q_j .

An den Elektroden wird das Gleichungssystem durch geeignete Randbedingungen ergänzt.

- Teilreflektion der Schwerteilchen an der Oberfläche (Reflektionskoeffizient r_j)

$$\Gamma_j \cdot \vec{v} = \frac{1-r_j}{1+r_j} \left(|b_j E| n_j + \frac{\nu_{th,j}}{2} n_j \right)$$

- Teilreflektion, sekundäre Emission, Thermofeldemission der Elektronen an der Oberflächen

$$\begin{aligned} \Gamma_e \cdot \vec{v} &= \frac{1-r_e}{1+r_e} \left(\frac{e_0}{m_e \nu_e} |E| n_e + \frac{\nu_{th,e}}{2} n_e \right) - \frac{2}{1+r_e} (\gamma [\Gamma_i \cdot \vec{v}, 0] + j_{em} \cdot \vec{v}) \\ Q_e \cdot \vec{v} &= \frac{1-r_e}{1+r_e} \left(\frac{e_0}{\tilde{\nu}_e} \left(\frac{5\varepsilon}{3m_e} + \hat{\xi}_2 \right) |E| n_e + \frac{\tilde{\nu}_{th,e}}{2} n_e \right) \\ &\quad - \frac{2}{1+r_e} (\gamma [\Gamma_i \cdot \vec{v} \varepsilon^\gamma, 0] + J_{em} \cdot \vec{v}) \end{aligned}$$

Transportkoeffizienten ξ werden aus der Lösung der kinetischen Gleichung der Elektronen (Boltzmann-Gleichung) gewonnen.

Für die Lösung der Poisson-Gleichung wird das elektrische Potenzial an den Elektroden vorgegeben.

$$\begin{aligned}\phi(x = 0) &= U_0(t); \\ \phi(x = d) &= 0\end{aligned}$$

Des Weiteren werden für das Modell folgende Materialdaten benötigt:

- Stoßquerschnitte für elastische und unelastische Prozesse (Anregung, Ionisation, Attachment, Rekombination usw.)
- Daten für das Gasgemisch – Massendichte, thermische Leitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität
- Daten für Elektrodenmaterial – Massendichte, thermische und elektrische Leitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, Schmelzpunkt, Siedepunkt, Dampfdruckkurve, Verdampfungsenthalpie, Austrittsarbeit, sekundärer Elektronenemissionskoeffizient

Tabelle 35 zeigt Prozesse, die in dem Stoß-Strahlungsmodell berücksichtigt wurden. Das Modell unterscheidet den Grundzustand (Ag) effektiven angeregten Zustand (Ag^*), einfach geladenen Ionen (Ag^+) und Elektronen (e). Die Dichte der angeregten Atome (Ag^*) setzt sich aus den Dichten den vier untersten Zuständen vom Silber - $\text{Ag}(5p^2P^0_{1/2})$, $\text{Ag}(5p^2P^0_{3/2})$, $\text{Ag}(6p^2P^0_{1/2})$, $\text{Ag}(6p^2P^0_{3/2})$ zusammen.

Tabelle 2.18: Plasmachemische Prozesse in Silberplasma

Prozess	Referenz
1 $\text{Ag} + e \rightarrow \text{Ag} + e$	[31]
2 $\text{Ag} + e \rightarrow \text{Ag}(5p^2P^0_{1/2}) + e$	[32]
3 $\text{Ag} + e \rightarrow \text{Ag}(5p^2P^0_{3/2}) + e$	[32]
4 $\text{Ag} + e \rightarrow \text{Ag}(6p^2P^0_{1/2}) + e$	[32]
5 $\text{Ag} + e \rightarrow \text{Ag}(6p^2P^0_{3/2}) + e$	[32]
6 $\text{Ag} + e \rightarrow \text{Ag}^+ + 2e$	[33], [34]
7 $\text{Ag}^+ + e \rightarrow \text{Ag}^*$	[35]
8 $\text{Ag}^+ + 2e \rightarrow \text{Ag} + e$	[35]

Die Energiebilanz des Gases wurde in folgenden Form aufgestellt

$$\partial_t \rho C_p T = \kappa \Delta T + Q_{el} - Q_{rad}$$

Hier T ist die Gastemperatur, ρ die Massendichte, C_p spezifische Wärmekapazität, κ thermische Leitfähigkeit, Q_{el} Aufheizung durch elastische Stöße, Q_{rad} Energieverlust durch Strahlung.

Für den Wärmetransport an der Grenze zwischen dem Plasma und den Elektroden werden Wärmeflüsse definiert.

$$Q_{heat} = \frac{3}{2} m_{ion} v_{ion}^3 n_{ion} + \frac{3}{2} m_n v_n^3 n_n + m_{ion} n_{ion} (h_{ion} - \varphi_{mat}) + \frac{1}{4} n_e v_{th,e} \left(\frac{4}{3} \varepsilon - \varphi_{mat} \right) - A_R T^2 e^{-e_0 \varphi_{mat} / k_B T} (\varphi_{mat} + 2k_B T) - \sigma_R T^4$$

Hier m ist die Teilchenmasse, n die Teilchendichte, v thermische Geschwindigkeit, φ_{mat} die Austrittarbeit (mit Schottky-Korrektur), h_{ion} die Enthalpie, A_R die Richardson-Konstante, k_B Boltzmann-Konstante, σ_R die Stefan-Boltzmann-Konstante.

Die Wärmebilanz der Elektrode wurde in folgender Form aufgestellt.

$$\partial_t \rho_{el} C_p^{el} T_{el} = \kappa \Delta T_{el} + I^2 l / (\sigma_{el} S)$$

T_{el} ist die ElektrodenTemperatur, ρ_{el} die Massendichte des Elektrodenmaterials, C_p^{el} spezifische Wärmekapazität, σ_{el} elektrische Leitfähigkeit, l und S Elektrodendicke und –fläche, I der Strom über die Schaltstrecke.

Der Sättigungsdruck p_{sat} des Elektrodenmaterials wurde mit Hilfe der allgemeinen Langmuir-Formel bestimmt.

$$\log_{10}(p_{sat}) = A - \frac{B}{T} - C \log_{10}(T)$$

A, B, C sind materialspezifische Konstanten. Für Silber wurden folgende Werte aus der Literatur [36] abgeleitet.

$$A = 17.2186, \quad B = 14917.1, \quad C = 1.79821$$

Zur Initialisierung der Entladung wurde anlehnd an experimentellen Daten die Plasmazusammensetzung als pures Metalldampf [37] mit einer Temperatur entsprechend dem Siedepunkt [38] (2483 K für Silber) angenommen.

Abbildung 2.107 zeigt das Blockschema des Modells. Nach der Festlegung der Rand- und Anfangsbedingungen werden gas- und materialspezifische Daten eingelesen. Der eingebaute null-dimensionale Boltzmann-Solver berechnet und speichert alle benötigten Daten für plasmachemischen Prozesse und Transportparameter. Der zeitabhängige Fluid-Poisson-Solver löst alle Gleichungen unter der Benutzung einer iterativen Kopplung für jeden Zeitschritt. Die

Zeitschrittweite Δt wird automatisch gesteuert. Durch die starke Nichtlinearität des Gleichungssystems liegt Δt im Bereich $10^{-12} - 10^{-8}$ s. Die numerische Diskretisierung der Gleichungen wurde auf einem nichtlinearen Gitter mit Gitterverfeinerung in den Elektrodengebieten durchgeführt. Die Anzahl der Gitterstützstellen (räumliche Auflösung in axialer Richtung) lag zwischen 100 und 250.

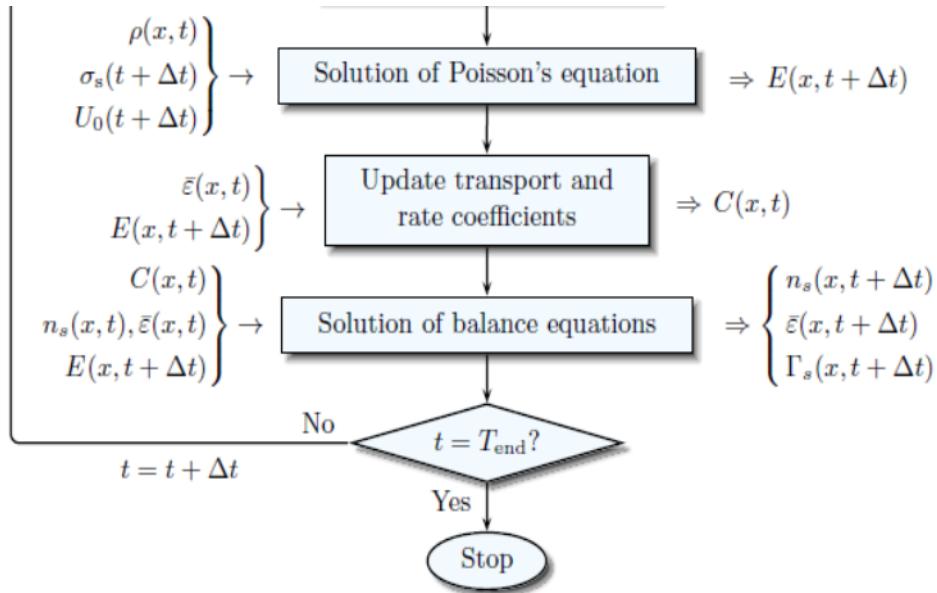


Abbildung 2.107: Blockschema des physikalischen Modells.

Ergebnisse der Modellierung

AP 5.1.5 Durchführung von Simulationsszenarien sowie der Kombination beider Modelle

Abbildung 2.108 präsentiert den zeitlichen Verlauf der Elektronendichte bei festen Parametern und variablem Elektrodenabstand. Der Abstand beträgt am Anfang 2 μm . Unter diesen Bedingungen findet die Durchzündung erst nach ca. 100 μs statt. Nach ca. 120 μs konserviert sich das räumliche Profil. Steile Dichtegradienten treten nur in der Nähe der Elektroden auf. Die Elektronendichte in der Säule ist nahezu konstant.

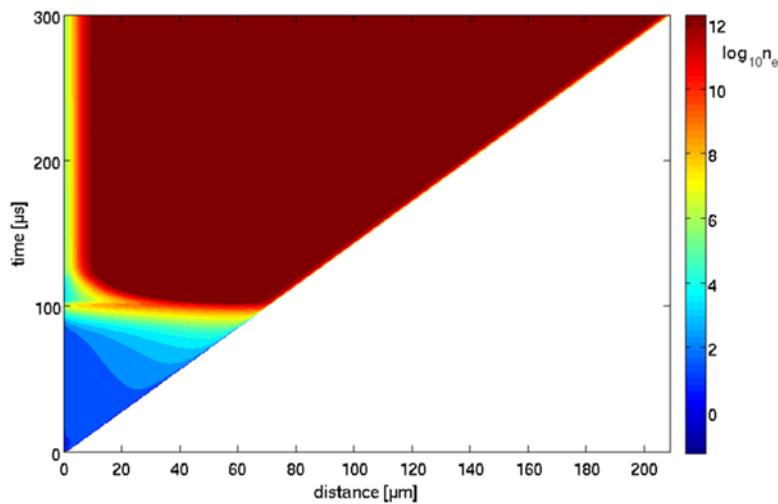


Abbildung 2.108: Zeitlicher Verlauf der Elektronendichte für den Fall mit vorgegebener Gasdichte $n_0=10^{19} \text{ cm}^{-3}$, Gastemperatur 3000 K, Elektroden temperatur 2400 K, Entladungsspannung 5 V.

Die räumliche Verteilung des elektrischen Potentials für verschiedene Parameterkombinationen bei festen Plasmaparametern ist in der Abbildung 2.109 dargestellt.

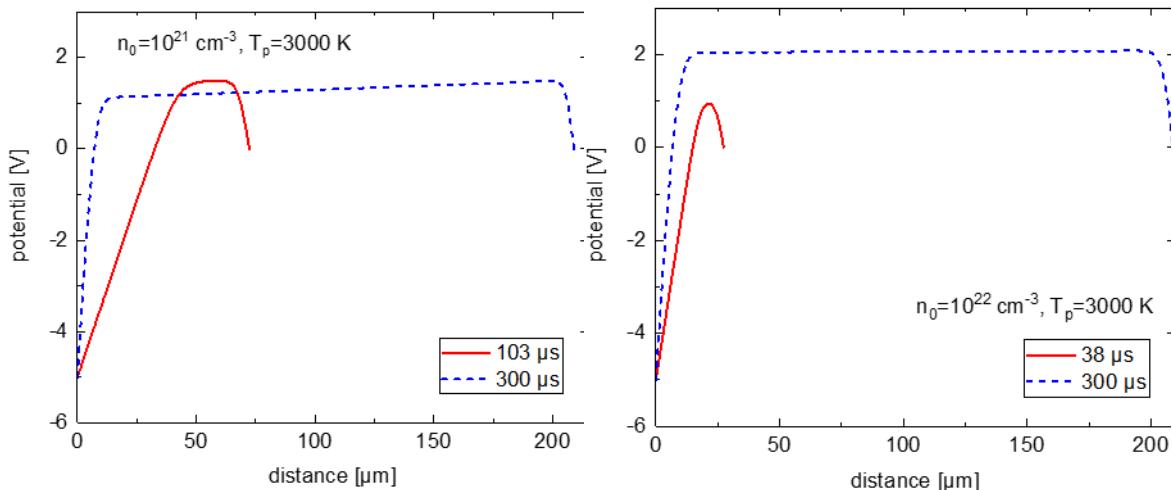


Abbildung 2.109: Räumliche Profile des elektrischen Potentials zu ausgewählten Zeitpunkten für verschiedene Parameterkombinationen.

Für den gesamten untersuchten Parameterbereich übersteigt die Kathodenfallspannung die angelegte Spannung. Im dargestellten Beispiel beträgt die Kathodenfallspannung ca. 7 V. Als Folge entsteht an der Anode ein negativer Anodenfall 1 - 2 V. Die Entladungssäule ist bei kleineren Elektrodenabständen nicht vorhanden. Räumlich gesehen besteht das Plasma aus überlappenden Fallgebieten – dem Kathoden- und dem Anodenfallgebiet. Erst bei einem Elektrodenabstand über 40 μm formiert sich das für die Entladungssäule typisches

Gebiet. Der Potentialverlauf ist in der Säule linear, d.h. die elektrische Feldstärke ist konstant.

AP 5.1.6 Verifizierung der Modelle anhand der Ergebnisse des AP 3

In dem Experiment liegen die Spannungsabfälle über die Schaltstrecke im Bereich 10-30 V. Eine verbesserte Modellvariante berechnet die Dichte- und Temperaturverteilungen selbstkonsistent. Ein Beispiel der Dichteverteilung bei festem Elektrodenabstand im DC-Zustand ist in der Abbildung 2.110 dargestellt. Im Gegensatz zu den Ergebnissen aus reduziertem Modell (Abb. 2.108, 2.109) sind schon für den kleinsten Spalt (20 µm) die typischen räumlichen Gebiete einer klassischen Gasentladung erkennbar: Kathodenfallgebiet, Entladungssäule und Anodenfallgebiet. In den Fallgebieten ist eine deutliche Abweichung vom Quasineutralität sichtbar. Die Dichten von Ladungsträger sind wesentlich kleiner als die Grundgasdichte. Das elektrische Potential (Abb. 2.111) zeigt einen hohen Kathodenfall (ca 22 V). Diese Spannung ist nötig, um genug Ladungsträger zu produzieren (u.a. das kalte Kathodenmaterial zu ionisieren). Der dadurch entstehende Elektronenteilchenfluss ist aber viel zu hoch in der Nähe der Anode. Ein Sperrpotential (negativer Anodenfall, ca. 12 V) sorgt dafür, dass die überflüssigen Elektronen abgewiesen werden und die Stromerhaltung erfüllt ist.

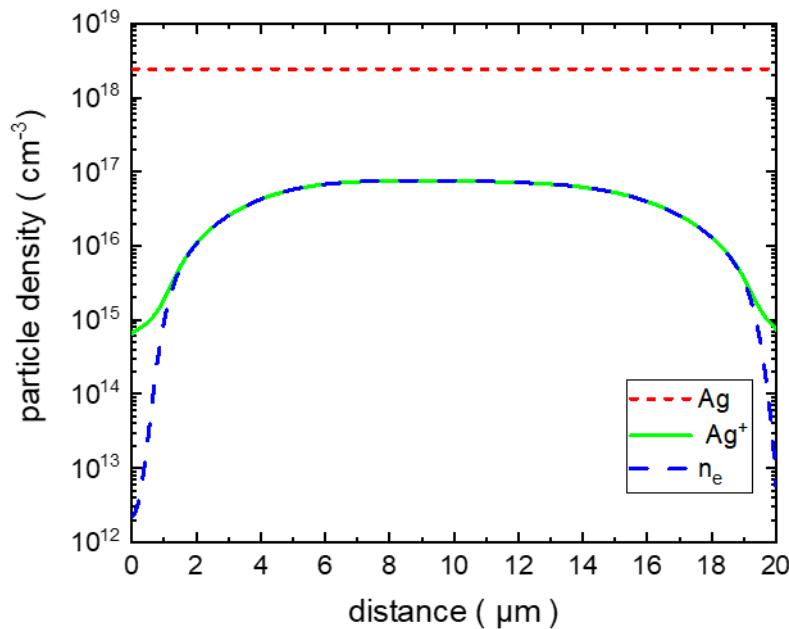


Abbildung 2.110: Räumliche Profile der Teilchendichten für 20 µm Spalt, U=10 V. Kathode links. [26]

Die spezifische Potentialverteilung wurde durch Variation der Parameter untersucht. Abbildung 2.112 stellt die Abhängigkeit der räumlichen Verteilung von angelegten Spannung bei festgehaltenem Elektrodenabstand von 100 µm dar. Die Charakteristika des Potentialprofils bleiben prinzipiell erhalten. In allen Fällen wurde

ein negativer Anodenfall vorhergesagt. Der Betrag des maximalen Anodenfalls sinkt mit der ansteigenden Spannung von ca 1.5 V bei $U_0=2$ V bis ca 0.7 V bei $U_0=24$ V. Die Kathodenfallspannung zeigt eine umgekehrte Tendenz. Bei Erhöhung der angelegten Spannung steigt auch der Kathodenfall. Für höhere Werte von U_0 entsteht ein Gebiet mit Feldumkehr, was auf Überproduktion der Elektronen im Kathodengebiet deutet.

Räumliche Profile des elektrischen Potentials in Abhängigkeit vom Elektrodenabstand bei fester Spannung sind in der Abbildung 2.113 zusammengefasst. Der Kathodenfall sinkt bei größeren Elektrodenabständen von ca 14 V bei 100 μm bis ca 6 V bei 800 μm . Der Anodenfall wird auch geringer. Bei dem Elektrodenabstand von 800 μm verschwindet der Anodenschicht nahezu komplett - die Anodenfallspannung ist gleich Null.

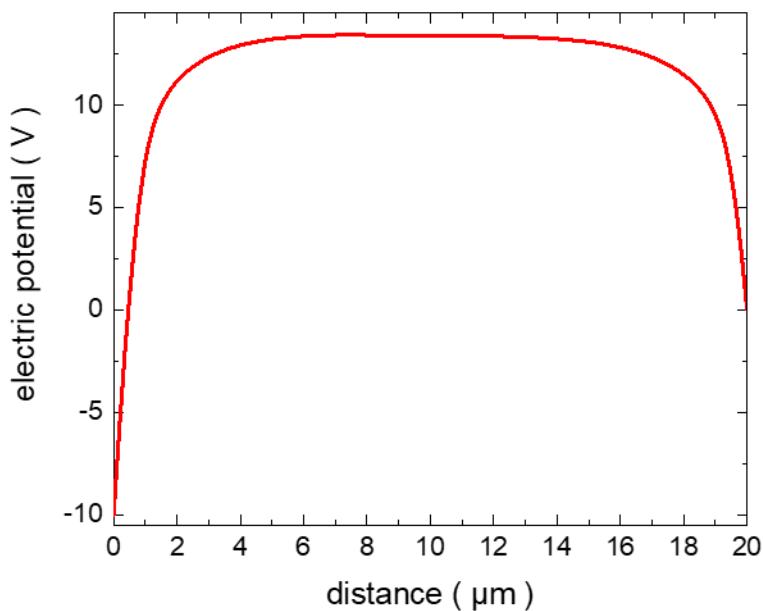


Abbildung 2.111: Räumliches Profil des elektrischen Potentials. Konditionen wie in Abbildung 4.

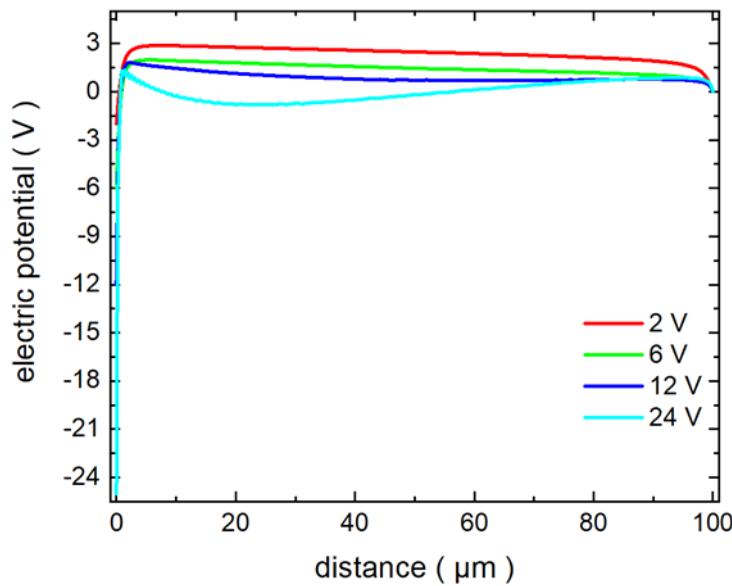


Abbildung 2.112: Räumliche Profile des elektrischen Potentials in Abhängigkeit von angelegter Spannung. Kathode links. Elektrodenabstand 100 μm , Elektrodentemperatur 2483 K.

AP 5.1.7 Ableitung eines elektrischen Bogenmodells für das Netzwerkmodell in AP. 5.10

Für die im AP vorgesehenen Simulation wurde einen 2-pol elektrisches Modell anhand Tabellendaten erstellt, welche in AP 5.2 im das elektrischen Netzwerkmodell eingebaut werden können.

AP 5.1.8 Erweiterung des Modells und Berücksichtigung der Temperaturen an den Elektrodengebiete

Die Plasmen in Schaltgerätetechnik werden oft als Schaltlichtbogen bezeichnet, was eine Annahme eines Gleichgewichtzustandes impliziert. Dadurch ergibt sich eine Reihe von Vereinfachungen, die eine Ableitung der reduzierten elektrotechnischen Modelle (Blackbox-Modelle) erlaubt. Die Ergebnisse des aktuellen physikalischen Modells verdeutlichen, dass in dem Fall von betrachteten Mikroentladungen eine Abweichung von Ionisationsgleichgewicht vorliegt. Eine weitere Annahme des Gleichgewichtzustandes setzt die gleiche Temperatur aller Plasmaspezies vor. Abbildung 2.114 stellt die Temperaturprofile der Elektronen und des Gases im eingestellten Zustand bei einem Elektrodenabstand von 20 μm dar. Eine deutliche Abweichung beider Temperaturen voneinander ist offensichtlich. Die Gasheizung durch Elektronen ist zu schwach, um einen Ausgleich der Temperaturen zu erreichen. Die maximale Gastemperatur in Abhängigkeit von Strom/Stromdichte für einen festen Elektrodenabstand von 100 μm ist in der Abbildung 2.115 dargestellt. Eine Aufheizung des Gases beginnt erst bei einer Stromdichte von $4 \cdot 10^7 \text{ A/m}^2$. Jedoch selbst bei höchster Stromdichte wird der Wert

für mittlere Elektronentemperatur (ca. 20000 K) nicht erreicht. Das Plasma ist im thermischen Ungleichgewicht. Die Herleitung eines vereinfachten Modells wird durch diese Tatsache stark erschwert.

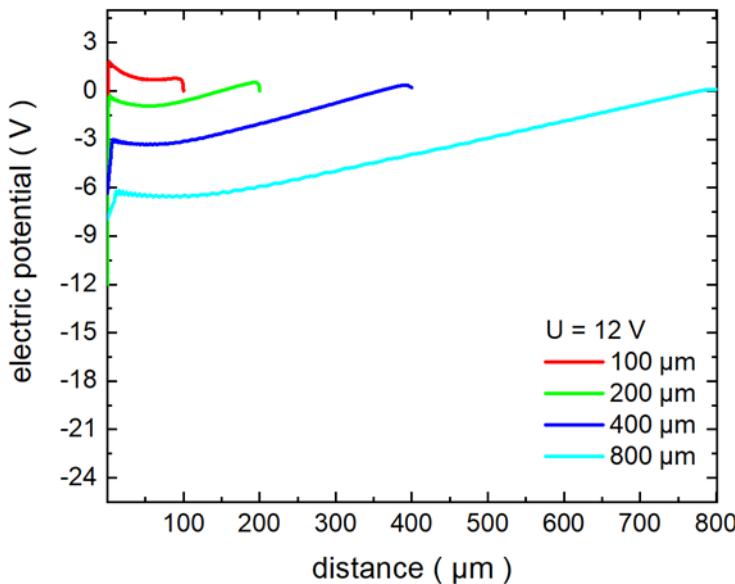


Abbildung 2.113: Räumliche Profile des elektrischen Potentials in Abhängigkeit vom Elektrodenabstand. Kathode links. Angelegte Spannung 12 V, Elektrodentemperatur 2483 K.

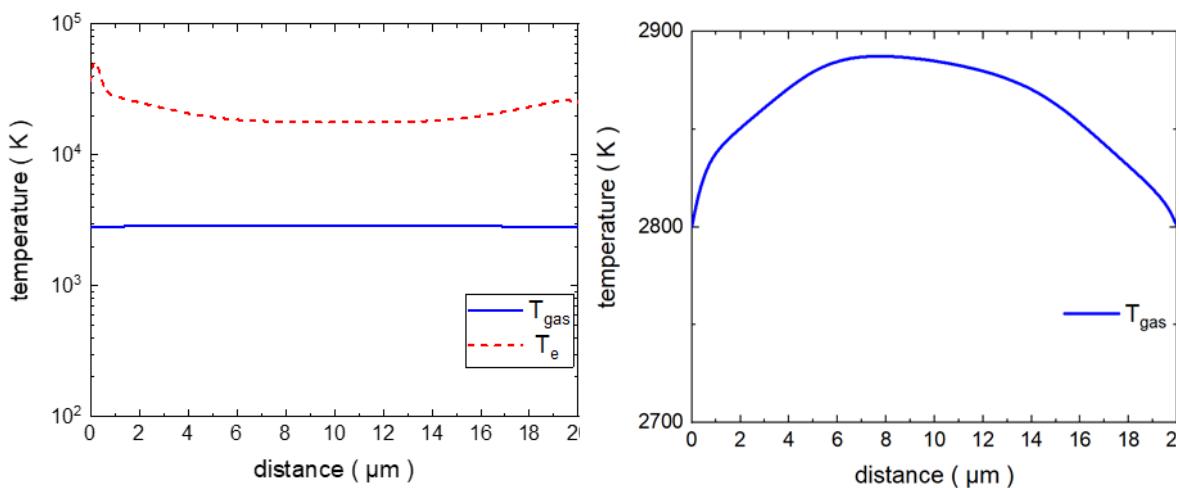


Abbildung 2.114: (a) räumliche Temperaturprofile für Elektronen (T_e) und Gas (T_{gas}). (b) Profil der Gastemperatur im linearen Maßstab. Kathode links (bei 0 μm). Angelegte Spannung 12 V, Elektrodentemperatur 2483 K.

Die Abbildung 2.116 zeigt die Abhängigkeit von Entladungsstrom an Elektronenabstand für verschiedene angelegte Spannungen. Die effektive Stromfläche wurde als 1 mm grob angenommen. Bei festem Spannungswert wird der Strom mit steigendem Elektrodenabstand kleiner. Höhere Spannungswerte führen zu höherem Entladungsstrom.

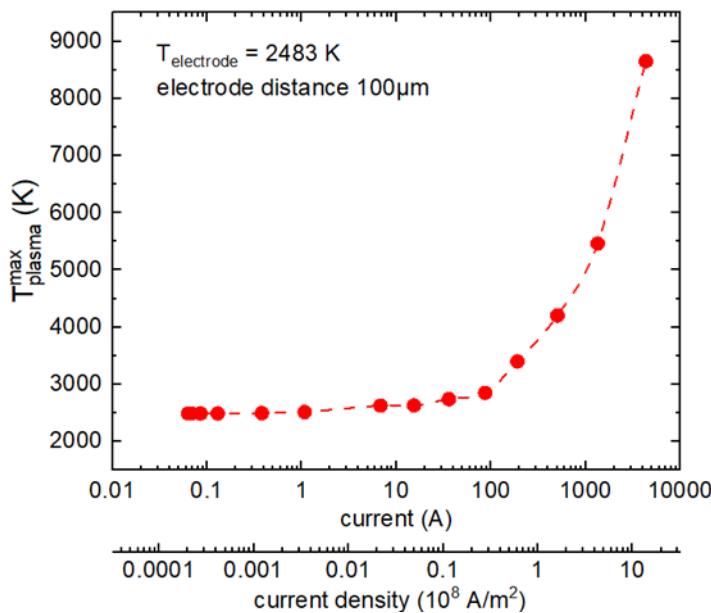


Abbildung 2.115: Abhängigkeit der Gastemperatur an Strom/Stromstärke. Fester Elektrodenabstand von 100 μm , angelegte Spannung 12 V, Elektrodentemperatur 2483 K.

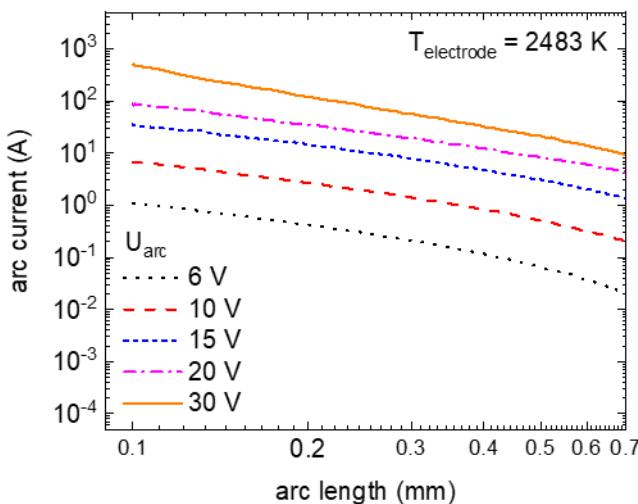


Abbildung 2.116: Abhängigkeit des Entladungsstroms vom Elektrodenabstand für variable angelegte Spannung.

Der Spannungsbedarf für festgelegte Stromwerte und Elektrodenabstände ist in der Abbildung 2.117 dargestellt. Die Charakteristik ist positiv – höherer Strom erfordert eine höhere Spannung. Der Spannungsbedarf steigt mit dem Abstand an. Die heiße Elektrodenoberfläche begünstigt Elektronenemission und führt zu messbaren Stromstärken selbst bei kleiner angelegten Spannungen. Für die Stromunterbrechung soll somit die Aufheizung der Elektrode reduziert und der Elektrodenabstand erhöht werden. Eine schnelle Abkühlung der

Elektrodenoberfläche ist ebenfalls erforderlich, um eine Wiederzündung der Entladung nach Stromunterbrechung zu vermeiden.

AP 5.1.9 Simulationstechnische Bestimmung der elektrischen Festigkeit entsprechende auftretender Spannungen bzw. resultierende Feldstärke bei DC

Die Abkühlodynamik der Oberfläche hängt mit der Elektrode gespeicherter Wärme zusammen, welche an Dauer der Strombelastung und an kommenden Wärmefluss gekoppelt ist. Abhängig von diesen beiden Größen stellen sich bei DC Belastung zwei typische Temperaturprofile innerhalb der Elektrode ein (Abbildung 2.118). Langsames Aufheizen mit geringerem Wärmefluss führt zu einem breiten Profil (Profil 1). Kurze Entladungsdauer mit hohem Energiefluss regen eine Sublimation des Materials an. Das Temperaturprofil wird dadurch schmal (Profil 2), das Durchheizen der Elektrode wird vermieden.

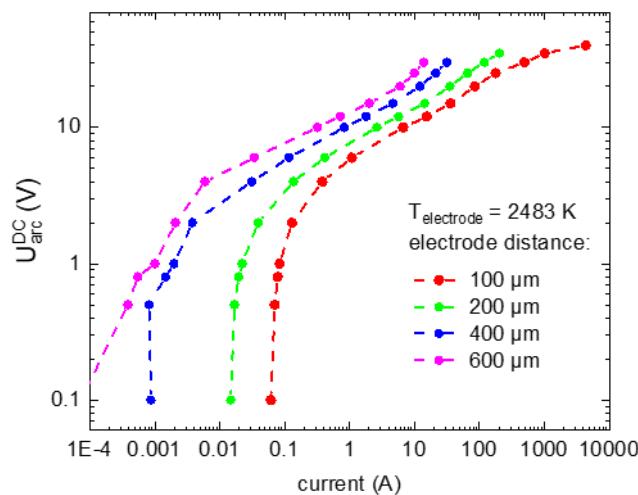


Abbildung 2.117: Spannungsbedarf einer Entladung für festgelegte Stromwerte und Elektrodenabstände.

Abbildung 2.119 präsentiert den Spannungsverlauf beim typischen Abschaltvorgang. Der Strom wird innerhalb weniger Mikrosekunden auf den Leistungselektronikpfad umgeschaltet. Das Abklingen des Metallplasmas führt zum Anstieg des Widerstandes der Schaltstrecke. Die ersten 10 μ s nach dem Stromabschalten sind in der Abbildung 2.119 dargestellt. In dem Fall von Sublimationsprofil steigt die Spannungsfestigkeit schnell an. Der Widerstand erreicht 10 k Ω bereits nach 3 μ s. Die Wiederverfestigung im Fall von Profil 1 verläuft langsam. Nach den ersten 10 μ s beträgt der Widerstand der Schaltstrecke nur 20 Ω . Eine wiederkehrende Spannung mit vergleichbar kleinen Anstiegszeit kann zu einem elektrischen Durchbruch führen.

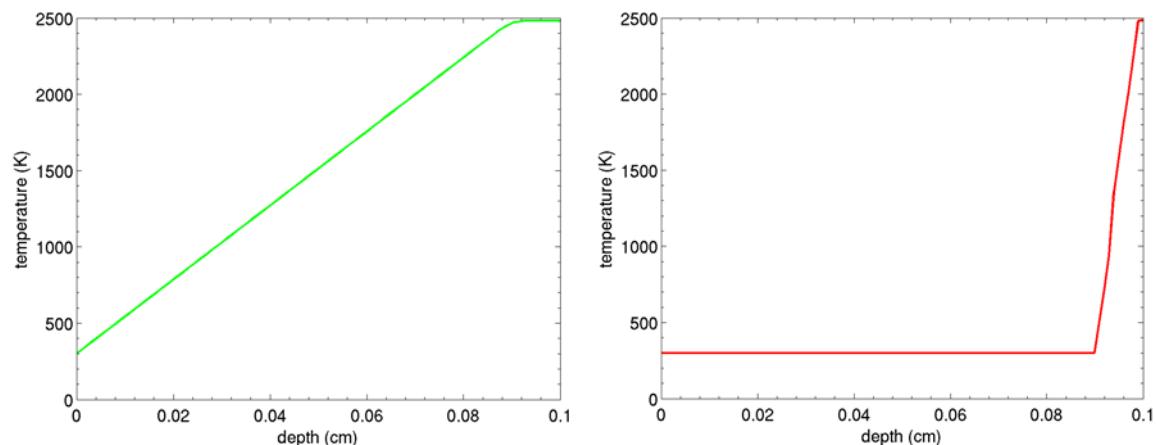


Abbildung 2.118: Typische Temperaturprofile in der Elektrode nach Strombelastung. (a) langsames Aufheizen, geringer Wärmefluss; (b) Sublimation infolge kurzer Belastung bzw. hohes Wärmeflusses. Die Grenze zur Plasma befindet sich rechts.

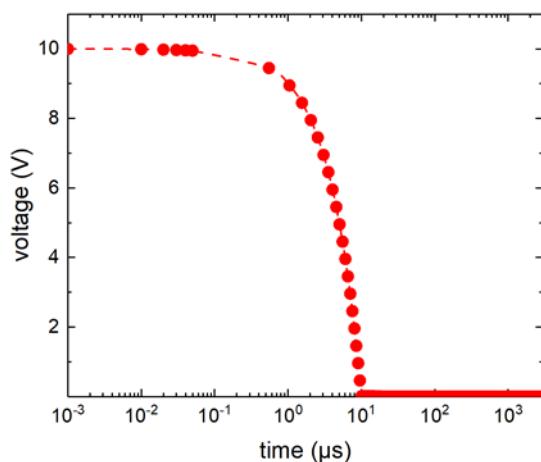


Abbildung 2.119: Abschaltvorgang für Spannung an der Schaltstrecke.

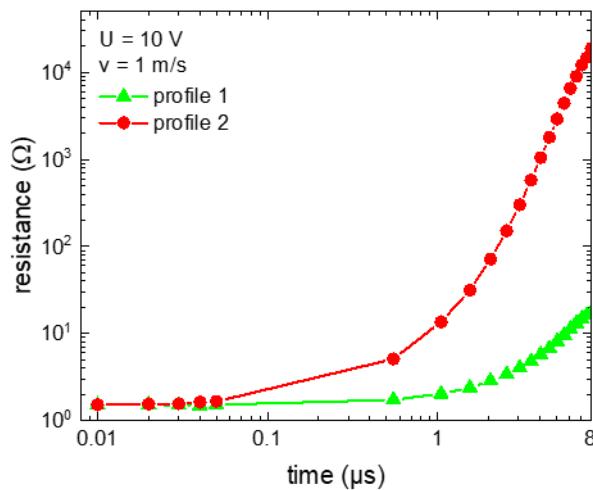


Abbildung 2.120: Anstieg des Widerstandes nach der Stromabschaltung für Elektroden temperaturprofile aus Abbildung 2.118.

AP 5.1.10 Erarbeitung der theoretischen Kennfelder für die Schaltzeitpunkte der Hybridelektronik in AP 4 und AP 7 sowie Abgleich mit den Ergebnissen aus AP. 3.7

Eine genauere Betrachtung der Wiederverfestigung mit Hilfe des physikalischen Modells wird durch die Abwesenheit von angelegten Spannung auftretenden numerischen Instabilitäten und damit verbundener kleinen Zeitschrittweite erschwert. Aus diesem Grund wurde für die Analyse der Wiederverfestigung ein anderer Ansatz angewendet. Die wiederkehrende Spannung tritt auf ein Restplasma mit erhöhter Temperatur (300 – 5000 K) und komplizierter Zusammensetzung (Luft mit Metalldampfanteil). Aufgrund der geringen Dimensionen des Plasmas kann als erste Näherung angenommen werden, dass eine Thermalisierung instantan stattfindet. Die Zusammensetzung des heißen Gases ist dann nur von Druck, Temperatur und Metalldampfanteil abhängig. Der Anteil des Metalldampfs lässt sich aus der (zeitabhängigen) Temperatur der Elektrodenoberfläche mittels der Dampfdruckkurve ermitteln. Bezogen auf das Verhältnis zwischen dem Plasmavolumen und dem Gesamtvolumen der Schaltkammer kann der Druck als Atmosphärendruck angenommen werden. Der Durchbruch/die Wiederzündung findet statt, wenn in der Anwesenheit des elektrischen Feldes die Erzeugung von Ladungsträgern deren Vernichtung überwiegt. Die Elektronen spielen dabei eine entscheidende Rolle, denn sie können die Energie des Feldes rasch aufnehmen und in diversen Stoßprozessen umsetzen. Eine gängige Methode zur Berechnung der dielektrischen Festigkeit besteht in der Lösung der kinetischen Gleichung der Elektronen (Boltzmann-Gleichung) bei gegebener Gaszusammensetzung für ein gegebenes Bereich von elektrischen Feldstärken. Die kritische Feldstärke E/N_{crit} (Durchbruchsfeld) wird

aus der Auswertung der effektiven Ionisationskoeffizienten berechnet. Diese Größe ist positiv im Fall des Durchbruches und negativ für Abklingen des Plasmas. Mit bekannten Umgebungsparametern und Geometrie der Schaltstrecke lässt sich aus dem E/N_{crit} die Wiederzündspannung berechnen.

Für die Beschreibung der Wiederverfestigungsphase wurde im ersten Schritt die kritische Feldstärke für Gasgemische aus Luft und Silberdampf mit variablem Metalldampfanteil berechnet. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 2.121 dargestellt. Im Fall von reiner Luft bleibt das kritische Feld im Temperaturbereich 300 – 2100 K nahezu konstant, sinkt mit weiter ansteigender Temperatur bis zu Faktor 2. Die Abhängigkeit vom Metalldampfanteil hat einen nichtmonotonen Charakter. Schon bei einer Beimischung von 0.1 % reduziert sich der Wert E/N_{crit} bei kleinen Temperaturen um 20%. Im Fall von 1% Beimischung erreicht die Minderung sogar den Faktor 3. Ein weiterer Anstieg des Silberanteils führt zur Erhöhung des kritischen Feldes. Dabei spielen zwei Faktoren eine entscheidende Rolle. Zu einem, sind die elastischen Verluste (Gasheizung) im Silberdampf deutlich höher als in der Luft und, zum anderem, die chemische Zusammensetzung des Gemisches ändert sich stark. Erhöht sich die Beimischung vom Silberdampf über 80% sinkt das kritische Feld erneut. Die steigende Temperaturabhängigkeit im Fall von reinem Metalldampf kommt durch höhere Rekombinationsverluste zustande.

Im zweiten Schritt wurden realistische zeitabhängige Temperaturprofile in der Elektrode berechnet. Der variable Parameter war die Leistungsdichte Q_{heat} . Dieser wurde im Bereich 103 – 105 W/mm² variiert. Abbildung 2.122 zeigt die Temperaturprofile nach 1 ms Aufheizung.

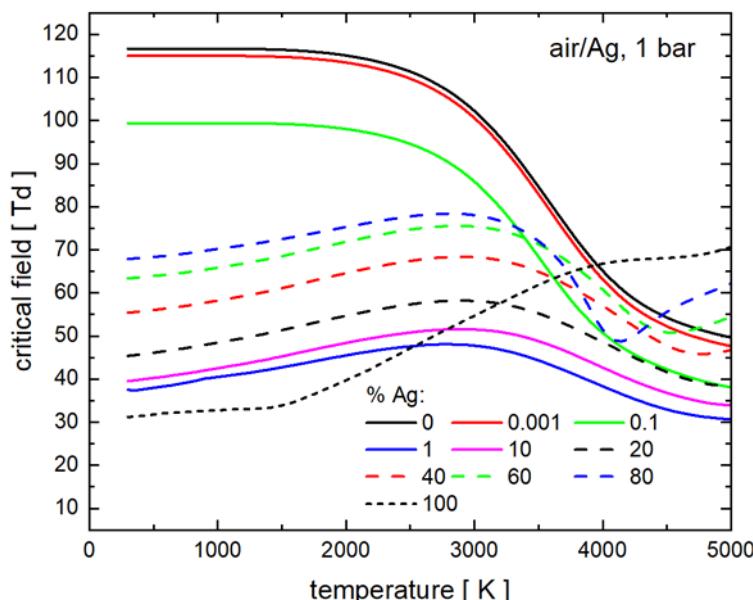


Abbildung 2.121: Kritisches elektrisches Feld für Luft-Silber-Gemische mit unterschiedlicher Anteil vom Silberdampf in Abhängigkeit von Temperatur.

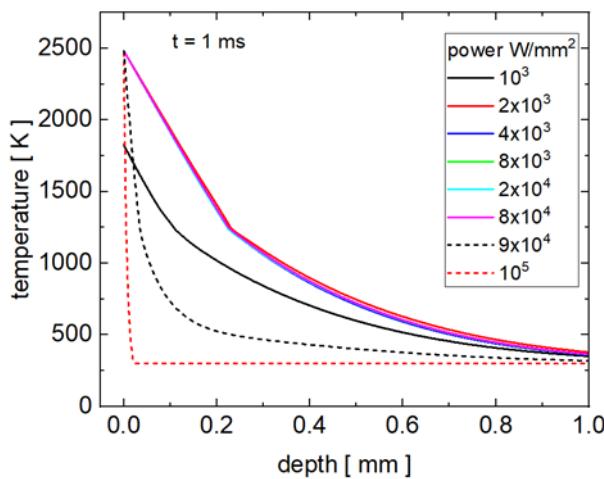


Abbildung 2.122: Temperaturprofile in der Elektrode nach 1 ms Aufheizung durch externe Wärmequelle.

Sobald der Siedepunkt erreicht ist, ändert sich das Profil nicht mehr. Die zwei Typen von Modellprofilen (cf. Abbildung 2.118) sind deutlich erkennbar. Bei der kleinster Leistungsdichte von 10^3 W/mm^2 ist der Siedepunkt nach 1 ms noch nicht erreicht. Für die Leistungen im Bereich $2 \times 10^3 - 8 \times 10^3 \text{ W/mm}^2$ sind die eingepiegelten Profile gleich. Bei höherer Leistungsdichten wechselt die Temperaturverteilung zum Sublimationsprofil.

Abbildung 2.123 demonstriert die zeitliche Entwicklung der Temperaturverteilung in der Elektrode für $Q_{heat}=104 \text{ W/mm}^2$. Der Siedepunkt wird nach ca 20 μs erreicht. Die Profile sind vergleichbar mit Profil 2 (Abbildung 2.118) in den ersten 30 μs und wechseln danach zu Profil 1.

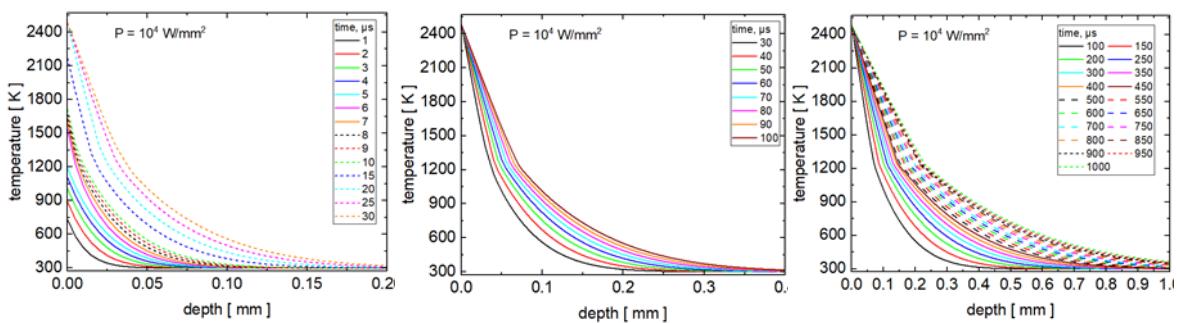


Abbildung 2.123: Temperaturprofile einer Ag-Elektrode zu verschiedenen Zeitpunkten bei der Aufheizung mit $Q_{heat}=104 \text{ W/mm}^2$.

Im dritten Schritt wurden die berechneten Temperaturprofile in der Elektrode eingesetzt, um das Wiederverfestigungsverhalten nach der Stromunterbrechung zu untersuchen. Je nach Entladungsdauer wurde als Startprofil die entsprechende Temperaturverteilung eingesetzt. Die Oberflächentemperatur klingt in der

Abwesenheit von externer Wärmequelle mit der Zeit. Im Gasgemisch wird dadurch der Metalldampfanteil geringer.

Zusammenfassung:

Dieser Berichtteil fasst die verschiedenen Schritte zusammen, die für die Erstellung, Simulation und Parameter-Variierung ein physikalisches Modell der Elektrodenstrecke beim hybriden Schalten sowie für ein 2-Pol-Modell zur Integration in einem Netzwerkmodell zur Untersuchung und Erarbeitung der theoretischen Kennfelder für die Schaltzeitpunkte der Hybridelektronik in AP4 und AP 7 sowie Abgleich mit den Ergebnissen aus AP3.7 notwendig waren.

Ausgehend von einer Analyse der existierenden theoretischen Modelle für Schaltlichtbögen bzw. elektrische Entladungen hinsichtlich ihre Vor- und Nachteile sowie Anwendbarkeit für die abgezielte Fragestellung wurde eines räumlich eindimensionalen zeitabhängigen Fluid-Poisson-Modells mit beweglichen Elektroden entwickelt. Hierbei wurde dieses Modells als vorteilhaft erachtet, da es die Betrachtung von möglichen Nichtgleichgewichteffekten, die Analyse der Entladungsdynamik sowohl in der aktiven Phase als auch in der Abklingphase und die selbstkonsistente Beschreibung der Elektrodengebiete ermöglicht.

Durch verschiedene Parametervariationen bezüglich Spannung, Stromdichten, Elektrodenstrecke, etc. wurden mehrere Scenarios simuliert, die sowohl für das hybride Schalten mit beweglichen Kontakten (mit Ag-Elektroden) als auch für das hybride Schalten bei festen Kontaktabständen (mit Cu-Elektroden) anwendbar sind.

Basierend auf die errechneten Verläufe der kritischen elektrischen Feldstärke in Abhängigkeit von Lichtbogendauer, Zeit und Zusammensetzung des Restplasmagas können die notwendigen Durchschlagsspannungen berechnet werden, welche für zur Vermeidung einer Wiederzündung einzuhalten wären. Daraus ergibt sich als Ergebnis aus, dass sehr kurze Bogenphasen im Zusammenhang mit einer ausreichenden Elektrodenstrecke ein sehr schnelles Abklingen der Temperatur vom Plasmagas und an den Elektroden ermöglichen kann, so dass ein sicheres Ausschalten und optimierte Auslegung der Schaltzeitpunkt für die Hybridelektronik ermöglicht werden. Dies deckt sich mit den experimentellen Ergebnissen aus AP3, bei denen eine Begünstigung der Wiederversfestigung im Zusammenhang mit einem Mindestabstand zwischen den Elektroden für 300 A sowie 400 A Lichtbogen gefunden wurden.

2.6 AP 6 - Qualifizierung der Messeinrichtungen

2.6.1 PTB:

Vorgaben und Umsetzung aus dem ProjektantragIm AP. 6.1 wurden die beteiligten Prüflabore auf die hohen Anforderungen bzgl. der elektrischen Messtechnik bei den Untersuchungen zur elektrischen Wiederverfestigung am Hybridschalter und den Modellschaltkammern überprüft. Und in den Unterarbeitspaket AP. 6.1.1 eine Bestandsaufnahme der Messmittel bei den Projektpartnern E-T-A, EGA, Dehn und INP für die Strom- und Spannungsmesstechnik erstellt worden. Die Bewertung der Messtechnik erfolgte unter Berücksichtigung der Messung von DC Größen bei gleichzeitigem Auftreten von schnellen Transienten. In dem AP. 6.1.2 ist die Bestandsaufnahme mit Bewertung der Messtechnik und Mindestanforderungen an die Messtechnik für die Messaufgabe beschrieben worden. Das Ziel ist dabei, die Auslegung so zu gestalten, dass die Laboratorien hinsichtlich verlässlicher Messtechnik für kombinierte Strom- und Spannungsverläufe aus DC und schnellsten Schaltvorgängen unter hoher Feldbelastung ertüchtigt werden. Dabei wurden die in den vorhergehenden Lastenheft-Arbeitspaketen ermittelten Grenzwerte für Amplituden und Frequenzkomponenten der Strom- und Spannungsverläufe als Voraussetzung genommen.

2.6.1.1 Definition der technischen Randbedingungen

Die vorhandene Messtechnik bei den Projektpartnern ist wie folgt aufgelistet:

2.6.1.1.1 TU Ilmenau

Im Labor der TU Ilmenau FG EGA sind die folgenden Messeinrichtungen vorhanden:

Stromsensoren:

Pearson-Spule Typ 101, Typ 110, Typ 1423

Standardmesswiderstände 60/150 mV

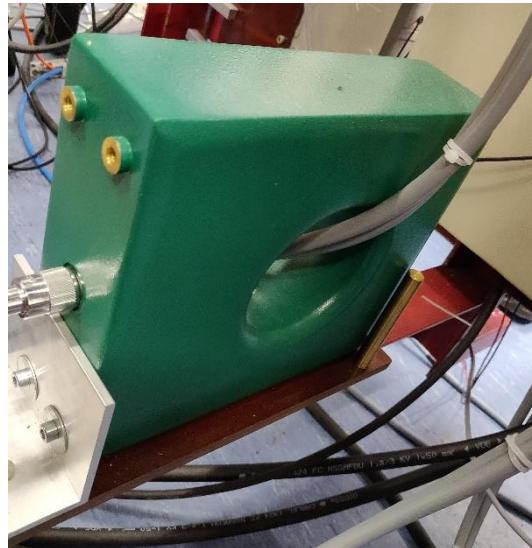


Abbildung 2.124: Eine Messspule der TU Ilmenau

Hilo-Shunt:	Stromzange	Spannungssensor	Oszilloskope
ISM 5P/20	Fluke i1010 1kA	Lecroy PPE 6 kV 1000:1	LeCroy LT 264
ISM 100		Lecroy PPE 4 kV 100:1	LeCroy 6030
ISM 3P/200		Tektronix P6015A 1000:1 40 kV	LeCroy 44 xi
ISM 250			
ISM 350			LeCroy 44 xi-a
ISM 800			LeCroy HDO 4000 12bit
WSM 600			NI PXIe
WSM 2500			

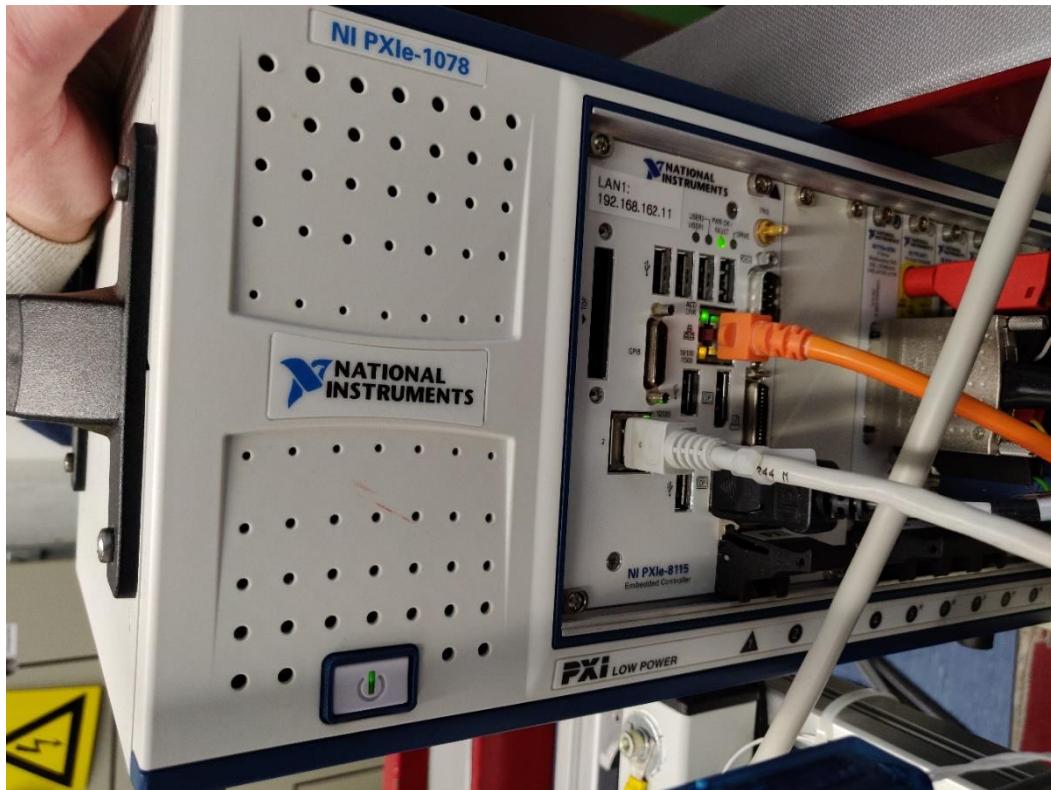


Abbildung 2-125 Ein Digitizer der TU Ilmenau

2.6.1.1.2 DEHN

In dem Labor von DEHN sind die folgenden Messeinrichtungen vorhanden:

Tabelle 2.19: Vorhandene Messeinrichtungen der DEHN

Name	Model	max. rise time [ns]	max. Nennstrom [A]	Strom- peak [A]	Teil- verhältnis [V/A]	Band- breite [MHz]
Stromteiler Pearson 1:10	110A	20	65	10000	0.1	20
Stromteiler Pearson 1:10	3464	20	100	5000	0.1	20
Stromteiler Pearson 1:10	7460	20	65	10000	0.1	20
Strommessshunt 1:1000	ISM 100	1.8	120	40000	0.001	200
Stromzange AC/DC	TCP0150	<=17.5	150	500	0.2	20
Stromteiler Pearson 1:100	411C	20	50	5000	0.1	20
Stromteiler Pearson 1:100	5046	20	100	25000	0.01	20
Stromteiler Hallsensor 1:500	Doe 2005	< 1000	2000	20000	0.002	0.1

Stromteiler Pearson 1:100	2879	20	25	2000	0.01	20
Stromteiler Hallsensor 1:100	Doe 600	<1000	3000	600	0.01	>0.1
Stromteiler Hallsensor 1:2000	Doe 5000	< 1000	4000	5650	0.0005	0.1
Stromteiler Pearson 1:10	2878	5	10	400	0.1	70

2.6.1.1.3 INP

In dem Labor vom INP sind die folgenden Messeinrichtungen vorhanden:

Tabelle 2.20: Vorhandene Messeinrichtungen des INPs

Name	Model	max. rise time [ns]	max. Nennstrom [A]	Strom-peak [A]	Teil-verhältnis [V/A]	Band-breite [MHz]
Stromteiler Pearson 1:10	110A	20	65	10000	0.1	20
Stromteiler Pearson 1:10	3464	20	100	5000	0.1	20
Stromteiler Pearson 1:10	7460	20	65	10000	0.1	20
Strommessshunt 1:1000	ISM 100	1.8	120	40000	0.001	200
Stromzange AC/DC	TCP0150	<=17.5	150	500	0.2	20
Stromteiler Pearson 1:100	411C	20	50	5000	0.1	20
Stromteiler Pearson 1:100	5046	20	100	25000	0.01	20
Stromteiler Hallsensor 1:500	Doe 2005	< 1000	2000	20000	0.002	0.1
Stromteiler Pearson 1:100	2879	20	25	2000	0.01	20
Stromteiler Hallsensor 1:100	Doe 600	<1000	3000	600	0.01	>0.1
Stromteiler Hallsensor 1:2000	Doe 5000	< 1000	4000	5650	0.0005	0.1
Stromteiler Pearson 1:10	2878	5	10	400	0.1	70

Technische Randbedingungen

Nach Rücksprache mit den Projektpartnern wurde der zu messende Nennstrom auf 63 A festgelegt. Für die Charakterisierung der Stromsensoren wird ein Messshunt gebaut.

Die Ausgangsspannung des Spannungsteilers sollte maximal 100 V und die Nenneingangsspannung des Spannungsteilers 5 kV betragen.

2.6.1.2 AP 6.2 - Vorgaben aus dem Projektantrag

In AP. 6.2 Hat die PTB wie geplant mobile Kalibriereinrichtungen für Impulsströme und Sprungspannungen aufgebaut, getestet und verifiziert. Hierfür wurden die zu beschaffenden Komponenten durch Simulationen in AP. 6.2.1 festgelegt und beschafft. Als Grundlage für die Auslegung der Kalibriereinrichtung wurde die Planung aus dem Forschungsvorhaben FASS herangezogen. Durch die im Projekt „AutohybridS“ zu messenden Vorgängen im Nanosekundenbereich war es jedoch notwendig signifikante Änderungen an dem Design vorzunehmen um die Anforderungen in diesem Projekt erzielen zu können. In dem AP. 6.2.2 wurde wie in dem Projektantrag beschrieben der Aufbau durchgeführt und ein Kabelgeneratorbasierter Messplatz für Stromimpulse mit Stirnzeiten unterhalb einer Mikrosekunde realisiert. Die Referenzmesseinrichtung ist mittels eines Digitizers mit der für diese Frequenzbereiche noch eine ausreichender Abtastrate und vertikaler Auflösung besitz umgesetzt worden. Die Auswertung der Daten erfolgt in eine eigens dafür programmierten Software und selbstgebauten Stromsensoren. Neben dem Impulsstromgenerator ist In AP. 6.2.3 auch eine Kalibriereinrichtung für Impulsspannungen geplant und aufgebaut worden die es ermöglicht Impulse von wenigen Nanosekunden zu erzeugen. Darüber hinaus ist in diesem Generator auch die Referenzmesstechnik bestehend aus in der PTB entwickelten Spannungsteilern die es ermöglichen in mehreren Zeitbereichen abgeglichen zu werden integriert. Die Spannungsteiler weisen dabei eine Bandbreite von mindestens 100 MHz auf. Der Sprungspannungsgenerator zusammen mit der Referenzeinrichtung bildet dann ein Reisenormal für die Vorort-Qualifizierung der Messeinrichtungen in den Laboratorien der Projektpartner. Abschließend wurde ein Bericht in Form einer Arbeitsanweisung für beide mobilen Kalibriereinrichtungen verfasst und als Bestandteil des Qualitätsmanagements in der PTB verwendet.

2.6.1.3 Aufbau einer mobilen Stoßstromkalibriereinrichtung

Um das dynamische Verhältnis von schnellen Stromsensoren wie z.B. koaxialen Messshunts zu messen, wurde ein kabelgeneratorbasierter Strommessplatz

aufgebaut. Der Messplatz besteht aus einer 6 kV-Hochspannungsquelle, einem 1000 m RG 58 Kabel und einer Funkenstrecke. Die Hochspannungsquelle lädt über einen Dämpfwiderstand von $30 \text{ M}\Omega$ das RG 58 Kabel auf. Sobald die Spannung ausreichend ist, um die Funkenstrecke zu zünden, wird die andere Seite des RG 58 Kabels über die Funkenstrecke kurzgeschlossen und entladen. Dadurch wird eine sehr steile Stromflanke mit einer Anstiegszeit von einigen wenigen Nanosekunden erzeugt der von dem Stromsensor erfasst und vom Digitizer aufgenommen wird. Durch die Auswertung der Stromverläufe kann das dynamische Verhältnis ermittelt werden. Da die Impedanz eines RG 58 Kabels 50Ω beträgt, beträgt der theoretische maximale Stromwert des Strommessplatzes bei einer Ladespannung von 6 kV 120 A. Die Impedanz der zu messenden Stromsensoren reduziert jedoch den maximalen Stromwert.

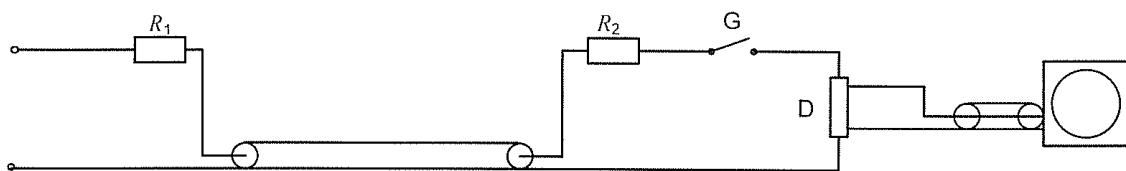


Abbildung 2-126 Schaltung zur Erzeugung einer rechteckförmigen Stromwelle mit einem Koaxial-kabel ([39] DIN EN 62475)

In der nachfolgender Darstellung wird eine Messung mit dem Kabelgenerator im Labor dargestellt.

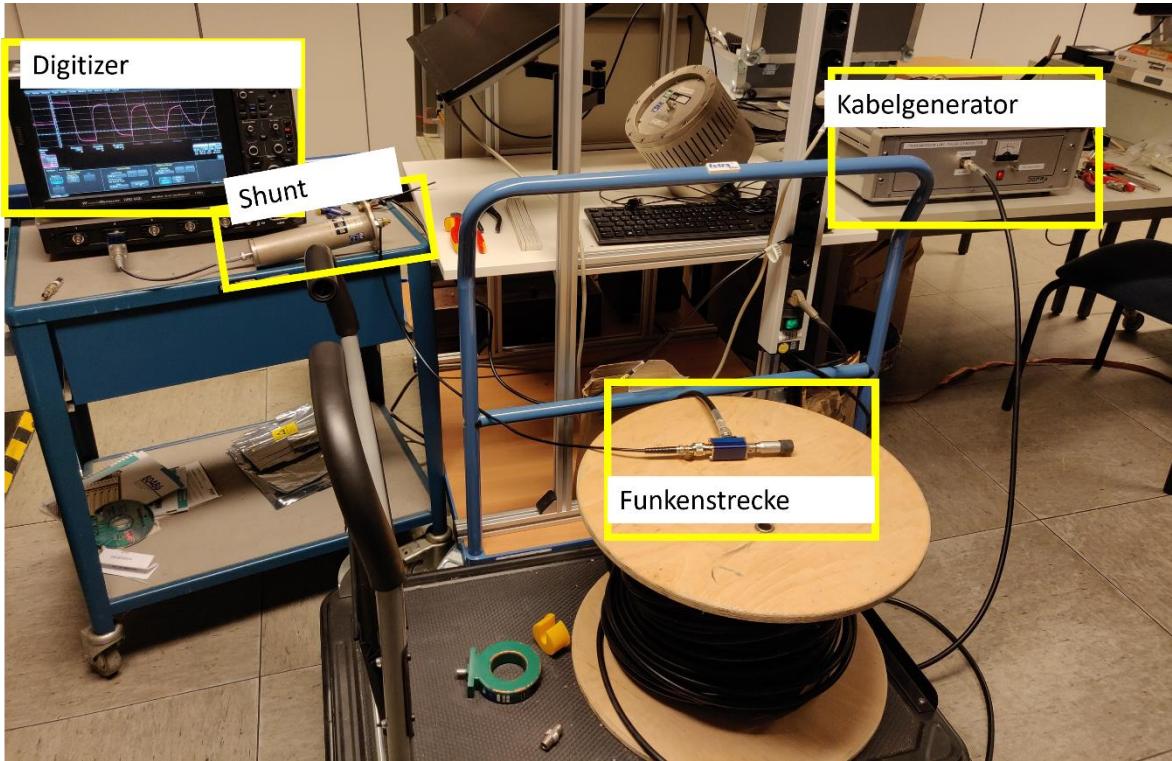


Abbildung 2-127 Messung mit dem Kabelgenerator

Um die Messspulen auch mit dem Kabelgenerator charakterisieren zu können, wurde ein niederinduktiver Adapter (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) angefertigt.

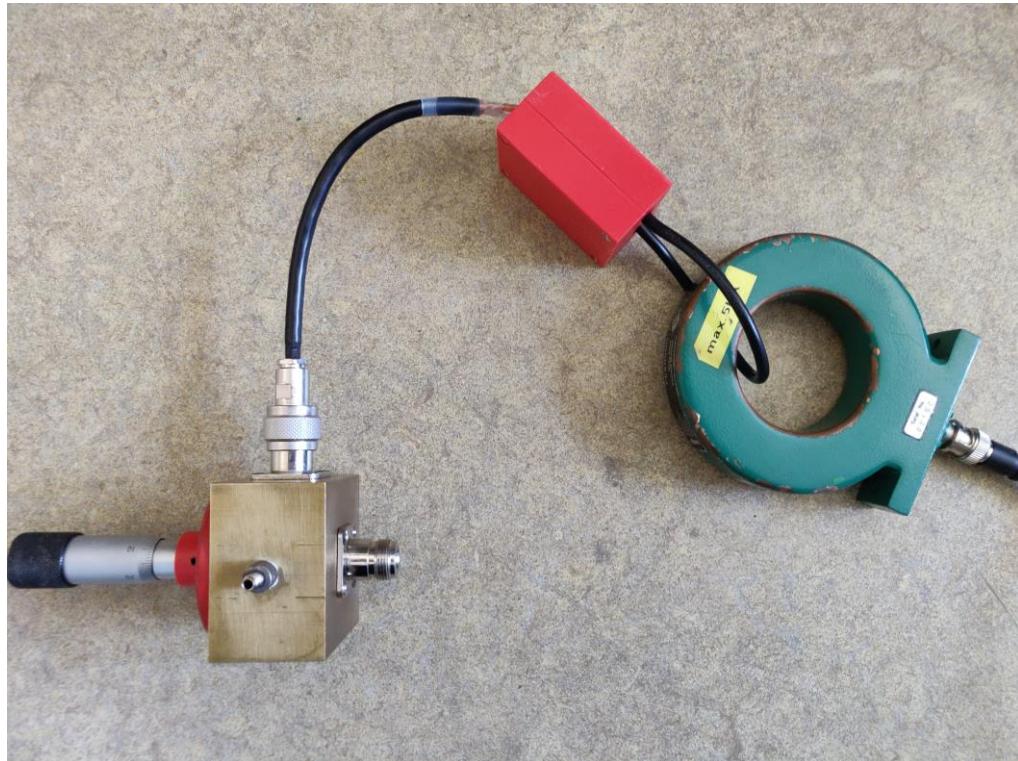


Abbildung 2-128 Adapter für die Messspule

2.6.1.4 Messshunt

Im Rahmen des Projekts wurde ein koaxialer Messshunt Abbildung 2-129 aus Manganin-Folien aufgebaut. Die Dicke der Manganin-Folien beträgt lediglich $10\text{ }\mu\text{m}$. Nach dem Grenzlastintegral beträgt die absorbierte Energie bei einem Temperaturanstieg von 10 Kelvin beim dem Shunt $4,37\text{ J}$, was einen maximalen Strom von 4389 A (Rechteckstrom mit einer Dauer von $20\mu\text{s}$) entspricht.

Der Widerstand des Shunts wurde mit einem Stoßstrom gemessen und beträgt $11,71\text{ m}\Omega$.



Abbildung 2-129 Messshunt

2.6.1.5 Aufbau einer mobilen Kalibriereinrichtung für Spannungssprünge

In diesem Arbeitspaket ist ein Spannungssprunggenerator integriert, der mittels einer Gleichspannungsquelle und einem Reed-Relais eine Rechteckspannung ermöglicht. Der Messaufbau ist in Abbildung 2-130 dargestellt. Die Periodendauer und der Tastgrad lassen sich mit dem Funktionsgenerator einstellen. In Abbildung 2-131 ist eine Periode der Rechteckspannung dargestellt. Die Abfallzeit kann je nach Sensor bis zu ein paar Nanosekunden betragen (Abbildung 2-132), wodurch eine Bandbreite bis ca. 100 MHz validiert werden kann.

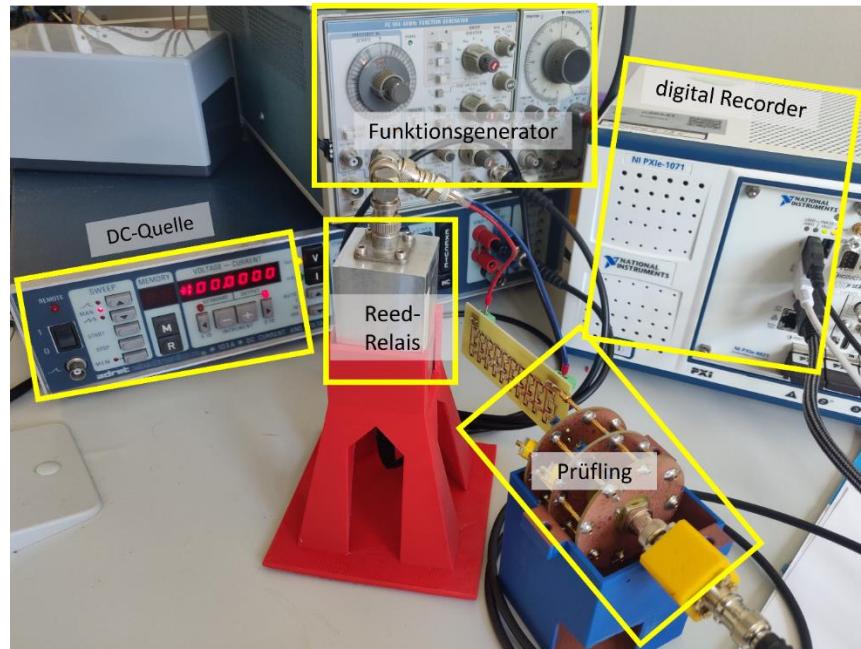


Abbildung 2-130 Versuchsaufbau: Spannungssprunggenerator für eine Rechteckspannung

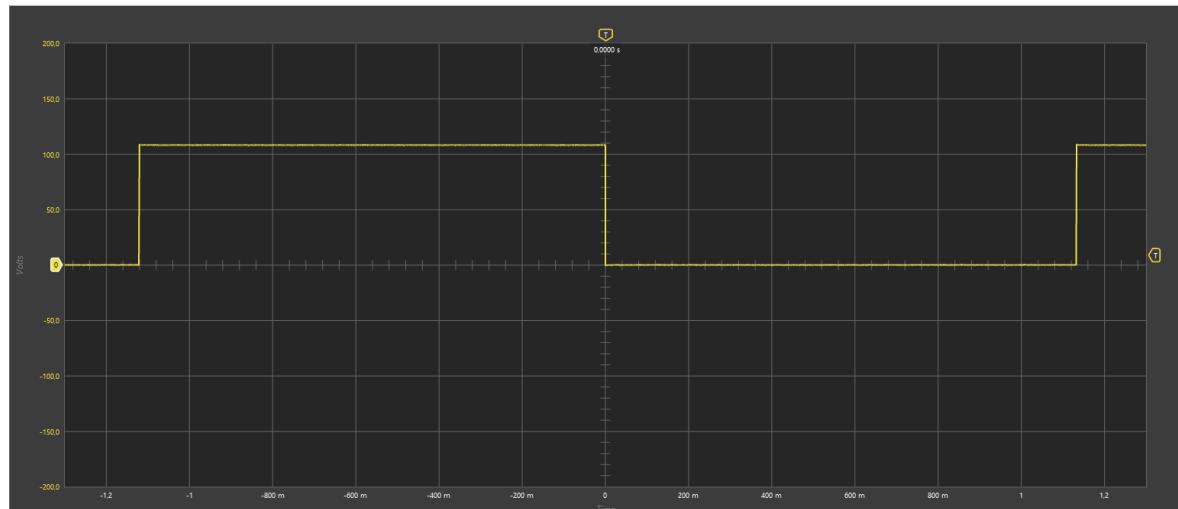


Abbildung 2-131 Eine Periode der Rechteckspannung. Gemessen mit einem für das Projekt gebauten Spannungsteiler

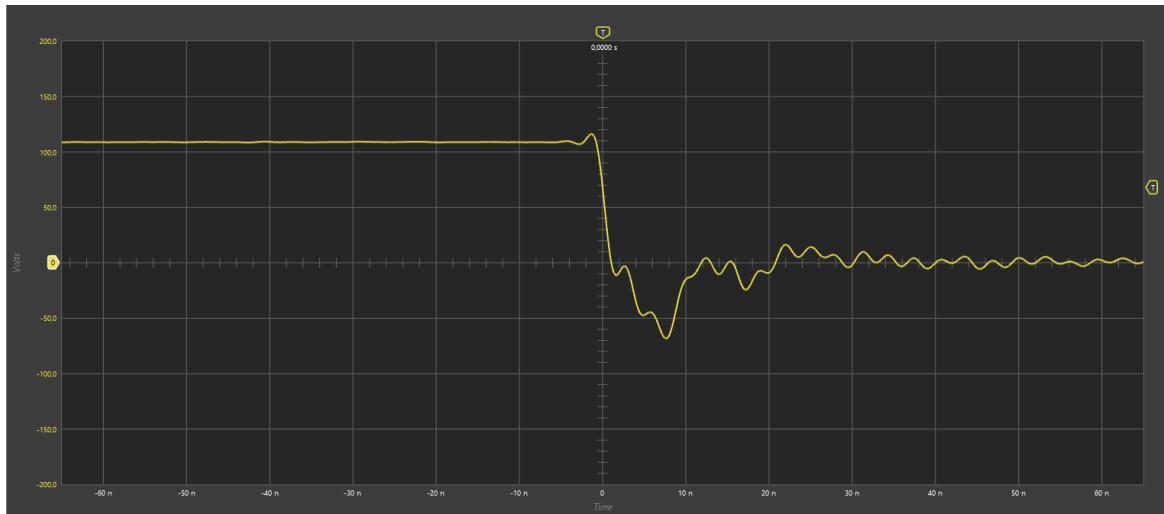


Abbildung 2-132 Abfallzeit der Rechteckspannung. Gemessen mit einem für das Projekt gebauten Spannungsteiler

2.6.1.6 Referenzspannungsteiler

Für die Kalibrierung der Spannungssprünge wurde ein Referenzspannungsteiler aufgebaut. Folgende Darstellung zeigt die Parameter des Spannungsteilers. Der Spannungsteiler hat vier Zeitkonstanten von 4,7 ns 47 ns 200 ns und 4 μ s wodurch eine genaue Justage der Sprungantwort durch einen Abgleich an den Digitizer ermöglicht wird.

Um die Spannungsteiler für die Projektpartner vor Ort charakterisieren zu können, wurde ein Universalspannungsteiler aufgebaut. Er besteht aus einem Hochspannungsteil und einem Niederspannungsteil. Der Hochspannungsteil besteht aus 10 identischen Baugruppen wodurch eine Spannungsfestigkeit von insgesamt 6 kV erreicht wird. Der Spannungsteiler ist ohmsch und kapazitiv gemischt aufgebaut. Der ohmische Anteil des Hochspannungsteilers beträgt jeweils 50 M Ω und der ohmische Teil des Niederspannungsteils 1 M Ω . Weil jedoch der Eingangswiderstand des Digitizers ebenfalls 1 M Ω bezitzt und dieser mit dem Niederspannungsteil parallelgeschaltet ist, beträgt der effektive Gesamtwiderstand 500 k Ω , sodass der theoretische Teilungsfaktor des Spannungsteilers 101:1 beträgt.

Neben dem ohmschen Teil sind noch vier Zeitkonstanten mit gedämpftem kapazitivem Anteil eingebaut worden. Die Zeitkonstanten betragen 4,7 ns, 47 ns, 200 ns und 4 μ s und sind so ausgewählt worden, dass die Imperfektionen des dynamischen Verhältnisses des Digitizers hinreichend genau korrigiert werden können. Die Kapazität des kapazitiven Teils ist im Niederspannungsteil einstellbar, wodurch das dynamische Verhältnis des Spannungsteilers fernjustiert

werden kann. In Abbildung 2-133 ist das Schaltbild des Referenzspannungsteilers dargestellt.

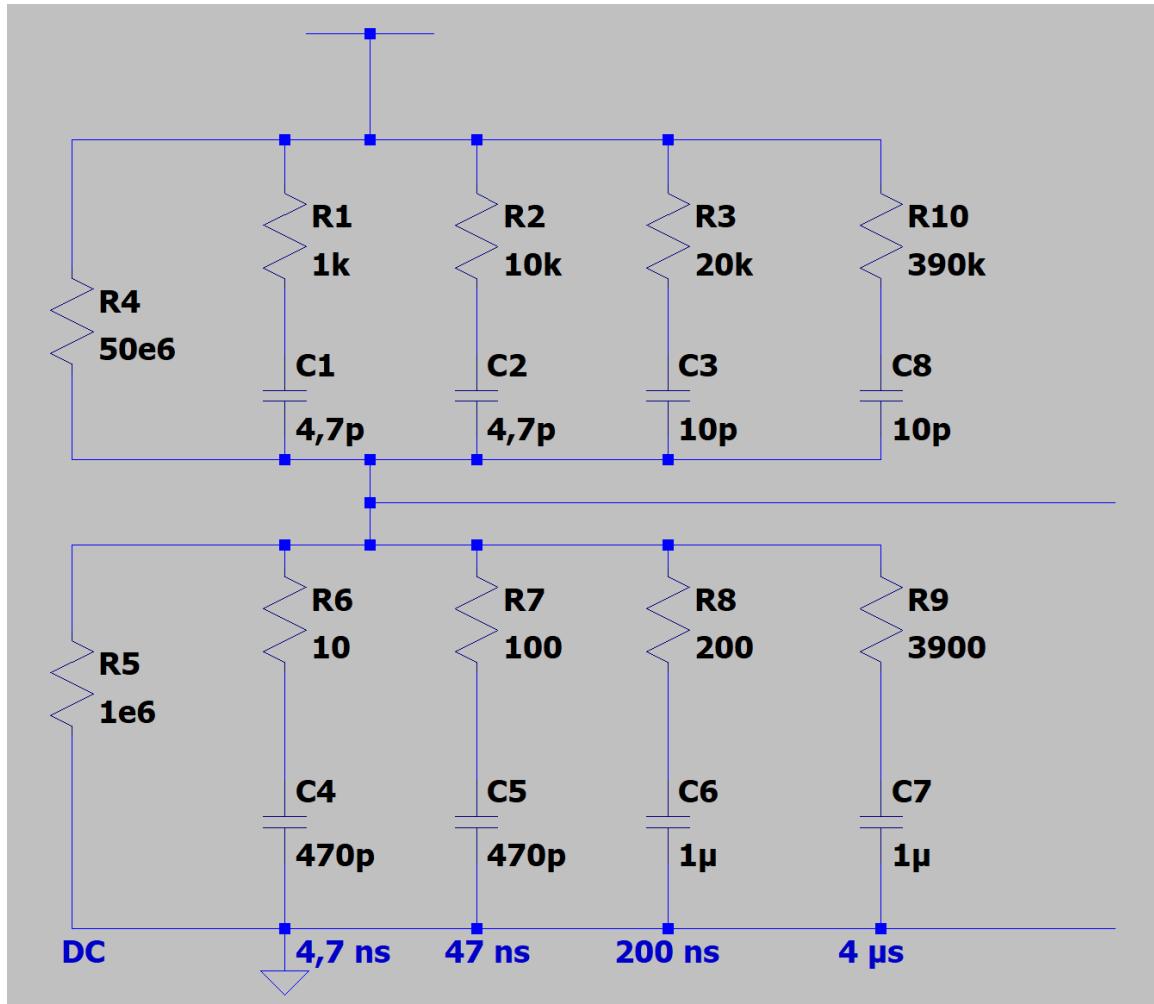


Abbildung 2-133 Schaltbild des Referenzspannungsteilers. Jeder Widerstand bzw. Kondensator in dem Hochspannungsteil besteht aus 10 gleichen Bauteilen, damit die Spannung auf jedem Bauteil klein bleibt. Die Widerstands- und Kondensatorwerte im Niederspannungsteil sind mit Hilfe von Trimmer einstellbar.

Mit dem in Abbildung 2-130 dargestellten Messaufbau wurde der Referenzspannungsteiler abgeglichen.

2.6.1.7 AP 6.3 - Projektantrag und Umsetzung

Für die Messung aller elektrischen Größen wurden in der PTB platzsparende und gleichzeitig breitbandige Sensoren für die Ausstattung der Labore und Schaltgeräte entwickelt und messtechnisch zurückgeführt. In AP. 6.3.1 wurden wie geplant, die Komponenten für die Strom- und Spannungsmesseinrichtungen nach den Ergebnissen aus AP. 6.1 ausgewählt und beschafft. Hierfür ist die in anderen Projekten gewonnene Marktkenntnis bezüglich der Eigenschaften von Sensoren und Einzelkomponenten hilfreich. In AP. 6.3.2 wurden wie geplant die Sensoren

aufgebaut oder kommerzielle Stromsensoren, z.B. Nullflusswandler, mit jeweils einer Präzisions-Sekundärelektronik erweitert. Diese Aufbauweise soll potentialfreies Messen ermöglichen und Durch die in der PTB entwickelte Sekundärelektronik konnte eine Beeinflussung der der Sensoren in den Prüflaboren vermindert werden. In AP. 6.3.3 sind wie geplant die Stromsensoren in Betrieb genommen und hinsichtlich der Amplitudengenauigkeit, der Linearität und des Frequenzverhaltens in der PTB mittels der in AP. 6.2 entwickelten Kalibriereinrichtungen charakterisiert worden. In AP. 6.3.4 wurden analog zu den Stromsensoren die breitbandigen Spannungssensoren entwickelt und aufgebaut. Weil es keine geeigneten Spannungssensoren für diese Anwendung auf dem Markt gibt, wurden diese in der PTB angefertigt. Das Ziel war es einen Spannungsbereich von 380 V bis 5 kV abzudecken. Im Falle der Lichtbogenspannung besteht die Anforderung an die Messtechnik darin, sowohl reine DC Spannungen und Ströme als auch überlagerte Kombinationen mit Transienten bis in den MHz-Bereich erfassen zu können. Nach dem Aufbau der Spannungsmesseinrichtungen wurde diese wie geplant in AP. 6.3.5 in Betrieb genommen und charakterisiert. Hier war geplant einen zeitliche Auflösung $< 0,1 \mu\text{s}$ zu erreichen

2.6.1.8 Aufbau der Strommesseinrichtungen für die Laboratorien der Projektpartner

Im Laufe des Projektes ist für die wissenschaftlichen Auswertungen eine neue Anforderung bei der Strommessung notwendig geworden, die Messung kleiner Stromwerte Werte am Anfang eines Schaltvorgangs. Der Hintergrund der Herausforderung war, dass der Messbereich der Kanäle des Digitizers für den maximalen Wert eingestellt werden musste, um ihn vor Zerstörung durch das Messsignal zu schützen. Die Ströme am Anfang des Schaltvorgangs für den eingestellten Messbereich sind so klein, dass der Digitizer keine präzisen Ergebnisse liefern kann und der Messwert im Rauchen des Digitizers bzw. der begrenzten Auflösung untergeht.

Um das Problem zu lösen, wurden Zwei Hall-Sensoren (Honeywell CSLA1CD und LEM CTSR 0.3 p) von der PTB getestet, um zuverlässig die kleinen Messströme erfassen zu können und ein definiertes maximales Ausgangssignal bei der Übersteuerung der Sensoren zu erhalten. Diese Kombination ermöglicht es präzise Messwerte für die Untersuchungen des Schaltvorgangs zu erhalten, sofern der Strom noch nicht groß ist, dass der Sensor übersteuert wird. Um das dynamische Verhalten der Hallsensoren zu testen, wurde der in Abbildung 2-134 dargestellten Messaufbau aufgebaut. In diesem Messaufbau simulierte der 8/20 Stoßstrom die großen Stromwerte, während der Schaltvorgänge und das 360 mA AC Signal die kleinen Stromwerte zum Beginn der Schaltvorgänge.

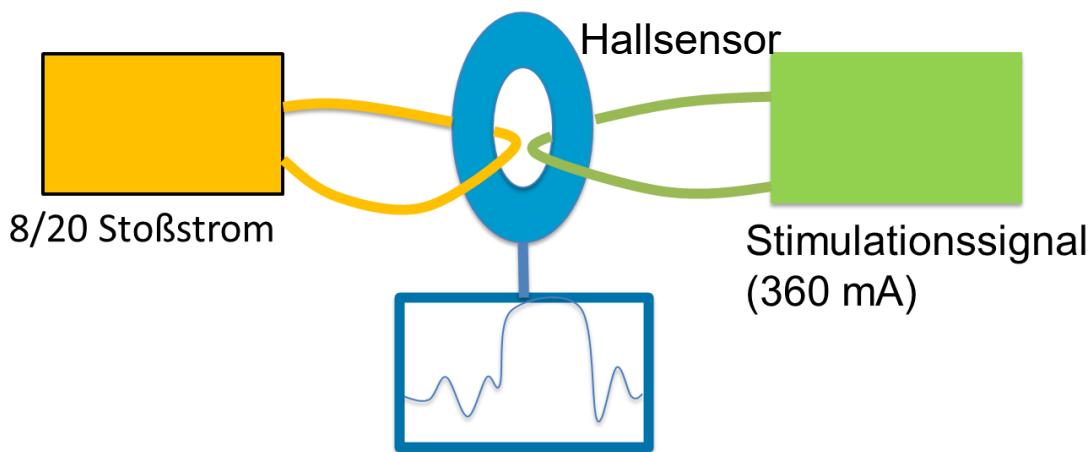


Abbildung 2-134 Messaufbau zum Testen des dynamischen Verhältnisses der Hallsensoren

In Abbildung 2-135 werden die Signalverläufe einer Messung mit dem LEM CTSR 0.3 p dargestellt. Der rote Signalverlauf ist der 8/20 Stoßstrom mit einem Maximalwert von 700 A. Er wurde mithilfe eines Shunts gemessen. Der schwarze Signalverlauf ist das Ausgangssignal des Hall-Sensors. Man kann feststellen, dass der Hallsensor das kleine AC-Signal vor dem Stoßstrom gut nachbilden konnte. Der Stoßstrom führte den Hallsensor jedoch zur Sättigung. Ungefähr 300 μ s nach dem Stoßstrom konnte der Hallsensor das kleine AC-Signal wieder messen.

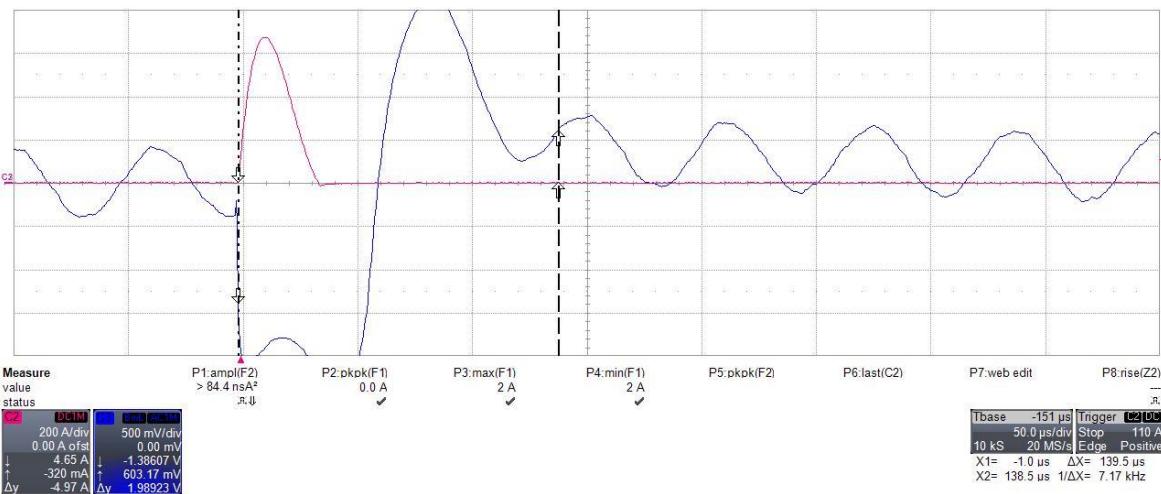


Abbildung 2-135 dynamisches Verhältnis des LEM CTSR 0.3 p

2.6.1.9 Aufbau der Spannungsmesseinrichtungen für die Laboratorien der Projektpartner

Der Spannungstastkopf für die Laboratorien der Projektpartner ist in Abbildung 2-136 dargestellt und besteht aus einem Hochspannungsteil und einem Niederspannungsteil. Der Hochspannungsteil besteht aus 10 identischen Stufen,

die jeweils eine Spannungsfestigkeit von 600 V aufweisen, sodass insgesamt eine Spannungsfestigkeit von 6 kV erreicht wird.

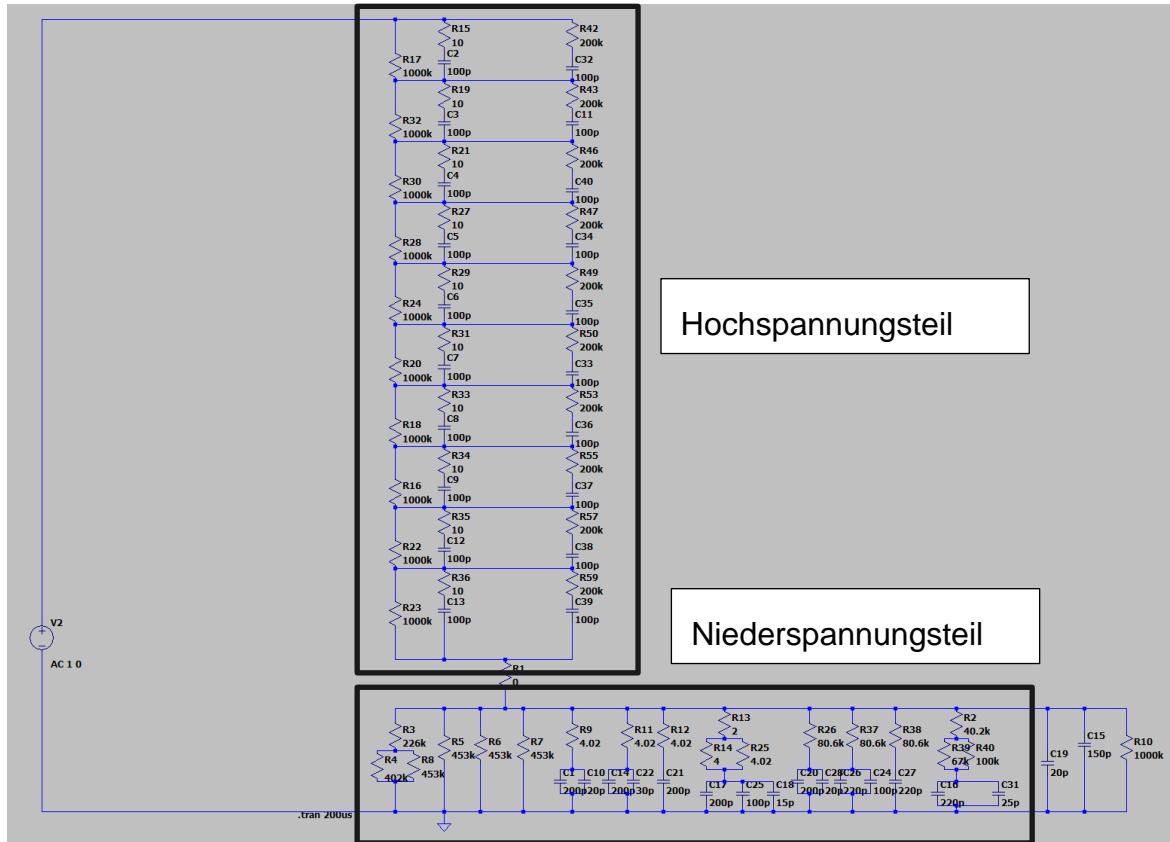


Abbildung 2-136 Schaltbild des finalen Hochspannungsteilers für die Projektpartner

Der Spannungsteiler ist ein ohmsch-kapazitiv gemischter Spannungsteiler. Der ohmsche Widerstand des Hochspannungsteils beträgt insgesamt $10 \text{ M}\Omega$. Zusammen mit dem internen Widerstand des Digitizers von $1 \text{ M}\Omega$ bildet der Niederspannungsteil einen ohmschen Widerstand von 101010Ω . Dadurch ergibt sich ein Teilungsfaktor des Tastkopfs von 100:1.

Neben dem ohmschen Teil besitzt der Tastkopf zwei parallele, kapazitive Teile mit Dämpfwiderständen. Dadurch entstehen zwei Zeitkonstanten von 1 ns und 20 μs . Die Teilungsfaktoren sind denen des ohmschen Teils exakt nachempfunden, können aber durch die Trimmkondensatoren auf der Niederspannungsseite feinjustiert werden, so dass die Imperfektion des gesamten Messsystems akzeptabel korrigiert werden kann. In den nachfolgenden Abbildungen sind alle drei Niederspannungsteile mit den unterschiedlichen Zeitkonstanten dargestellt.

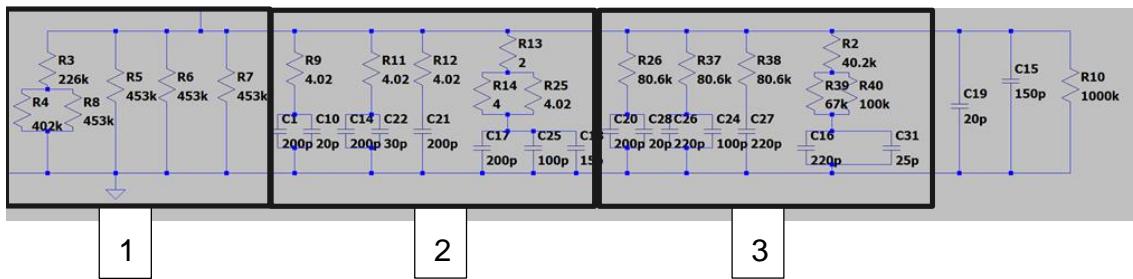


Abbildung 2-137 Schaltbild des Niederspannungsteils des Spannungsmessgerätes (1: DC-Teil. 2: Zeitparameter 1 ns. 3. Zeitparameter 20 µs)

sind alle drei Teile in der Niederspannungsseite dargestellt.

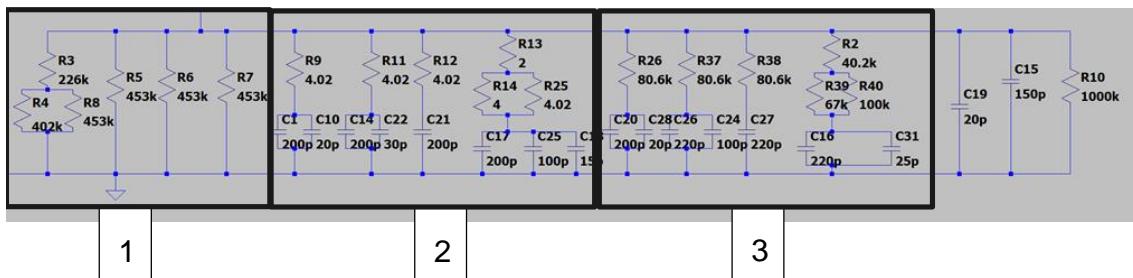


Abbildung 2-137 Schaltbild des Niederspannungsteils des Spannungsmessgerätes (1: DC-Teil. 2: Zeitparameter 1 ns. 3. Zeitparameter 20 µs)

In Abbildung 2-138 ist ein der Hochspannungsteilers ohne Gehäuse dargestellt.



Abbildung 2-138 Ein Spannungsteiler ohne Gehäuse. (A) Niederspannungsteil. (B) Hochspannungsteil

Das Gehäuse eines Spannungsteilers wird mithilfe eines 3D-Druckers hergestellt und besteht aus einem Innengehäuse, das die Platine sicher befestigt, sowie einem Außengehäuse. (Abbildung 2-139). Die Innenseite des Außengehäuses wird mit EMV-Lack beschichtet, um die Beeinflussung der Umgebung und insbesondere der Arbeitsfläche auf das Messergebnis zu unterdrücken. Darüber hinaus bietet die

Konstruktion den Vorteil, dass der Spannungsteiler nicht vor jedem Einsatz neu abgeglichen werden muss.

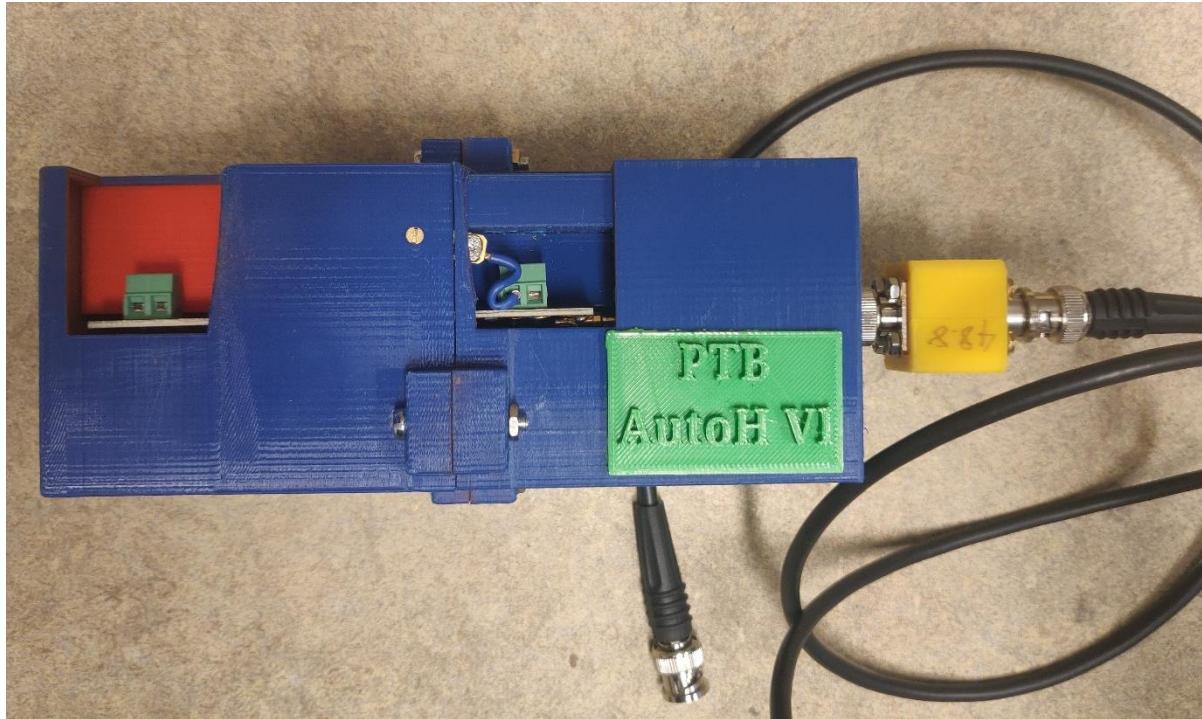


Abbildung 2-139 Hochspannungsteiler mit Gehäuse

2.6.2 E-T-A:

In AP. 6 wird die Strom- und Spannungsmesstechnik für schnellste Transienten entwickelt und vorhandene Messeinrichtungen in den Prüflaboren angepasst bzw. neu entwickelt und beschafft. Bei schnellen Schaltvorgängen in DC-Netzen überlagern sich DC Spannungen und Ströme mit hohen Frequenzanteilen. So enthält zum Beispiel eine Lichtbogenspannung Frequenzanteile bis in den hohen Kilohertzbereich. In der Metrologie und der Hochspannungstechnik werden vergleichbare Spannungsverläufe bei den kombinierten und zusammengesetzten Spannungen für die Prüfung von Geräten für den Einsatz in elektrischen Netzen verwendet. Hierbei werden Gleichspannungen oder Wechselspannungen mit Blitzstoß- oder Schaltstoßspannungen gleicher oder unterschiedlicher Polarität überlagert. Zudem sollen die extrem schnellen Änderungen im Plasma bewertet werden und benötigen daher eine entsprechend schnelle, zuverlässige und rückführbare elektrische Messtechnik.

AP. 6.1 Definition der technischen Randbedingungen

Im AP. 6.1 werden die beteiligten Prüflabore auf die hohen Anforderungen bzgl. der elektrischen Messtechnik bei den Untersuchungen zur elektrischen

Wiederverfestigung am Hybridschalter und den Modellschaltkammern überprüft. E-T-A stellt hierfür Personal und Laboratorien zur Verfügung.

Ausgehend vom Messaufbau nach Abbildung 2.140 wurde seitens der E-T.A in Abstimmung mit den Partnern unter Leitung der PTB der Anforderungskatalog an Spannungs- und Strom-Messtechnik bestimmt.

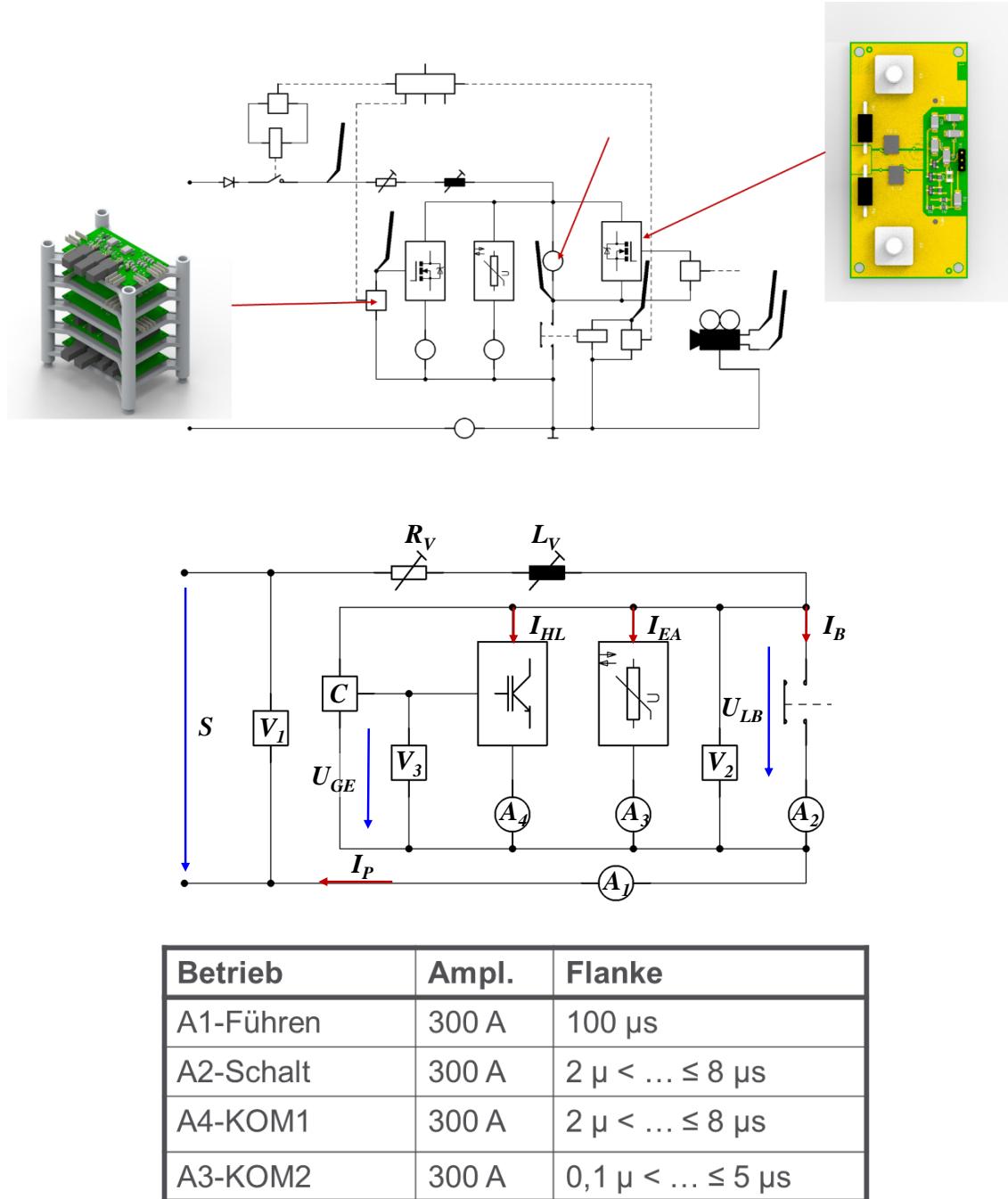


Abbildung 2.140: Modulare Aufbau Messaufbaus – Anforderungen Strommesstechnik [27]

Spannungs- und Stromsensoren ergeben sich wie in AP 4 beschrieben. Die Spannungssensoren V_1 , V_2 und V_3 dienen der Erfassung der Prüfspannung S , der

Spannung über dem Schaltgerät U_{LB} und der Steuerspannung U_{GE} des Halbleiterschalters S_{HL} . Ströme werden mit den Stromsensoren A_1 bis A_4 erfasst. Hierbei handelt es sich in den Fällen A_1 , A_2 und A_4 um koaxiale Messwiderstände. Je nach Stromhöhe werden Widerstände zwischen $0,5 \text{ m}\Omega$ bis $100 \text{ m}\Omega$ verwendet. Lediglich im Fall des Stromsensors A_4 kommen berührungslos messende Nullflusswandler zum Einsatz.

AP. 6.4 Einrichten der Messausrüstung in den beteiligten Laboren & AP. 6.5 Optimierung der Messeinrichtungen in den beteiligten Laboren

Für den Einsatz der analogen Strommesstechnik wurden seitens der E-T-A im Projekt Autohybrids 3 unterschiedliche Typen von koaxialen Messwiderständen in Abstimmung mit der PTB entwickelt. Die PTB übernahm im Rahmen des Projekts ebenfalls die Aufgabe die erstellten Messwiderstände bzgl. Bandbreite und Auflösung zu vermessen.

Type 1 -

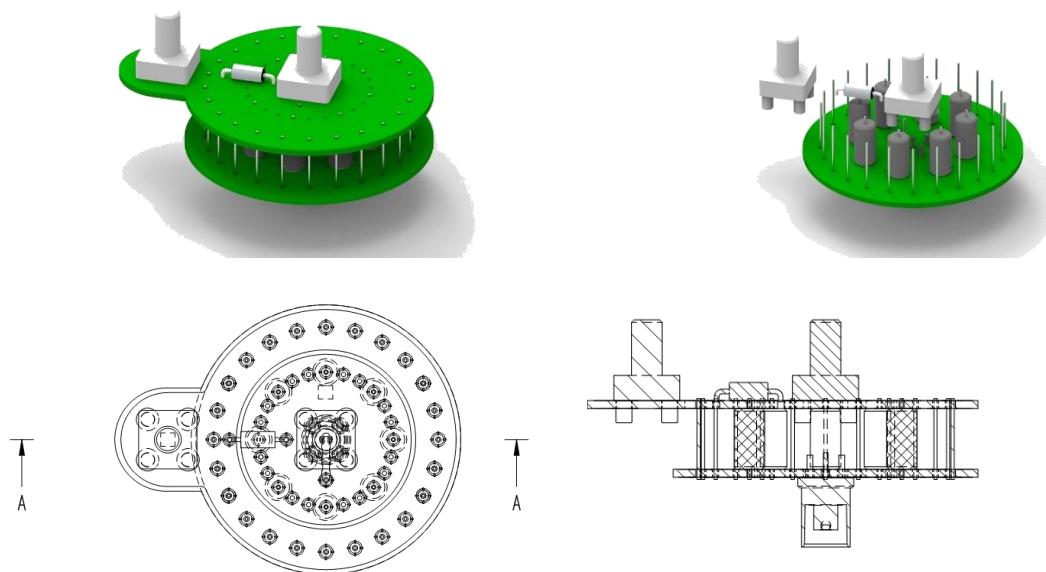


Abbildung 2.141: Aufbau Messhund Typ 1

Hierbei wurden folgende Varianten umgesetzt:

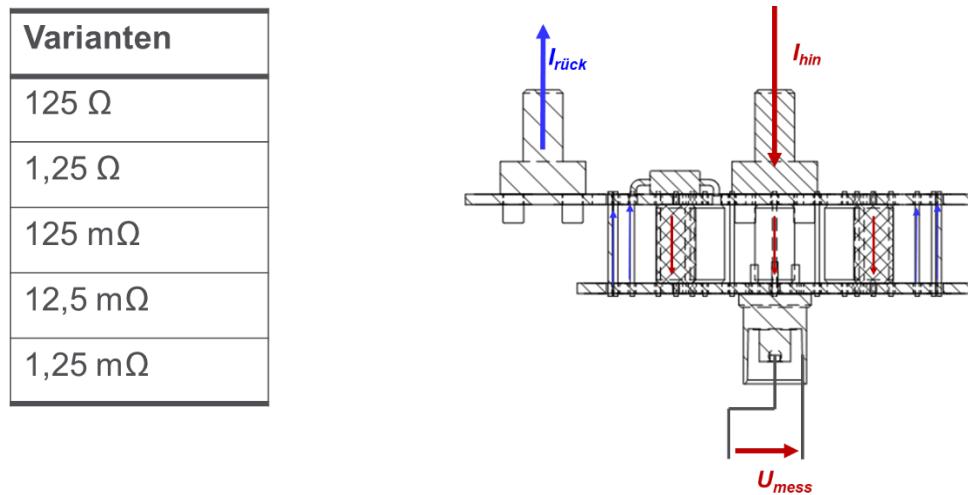
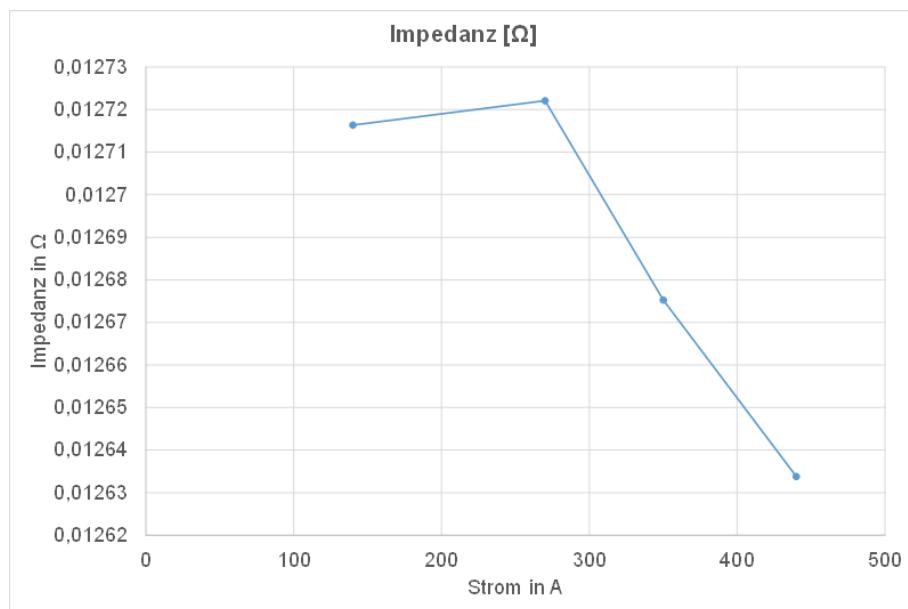


Abbildung 2.142: Funktion und Ausführungen - Messshunts Typ 1

Die Partner INP und DEHN wurden mit entsprechenden Messshunts für die Durchführung des Projekts auf Basis von Leihgaben unentgeltlich ausgestattet.

Nachfolgende Messungen der PTB zeigen beispielhaft die Vermessung der Messshunts mit Hilfe eines 8 μ s / 20 μ s -Soßstroms.



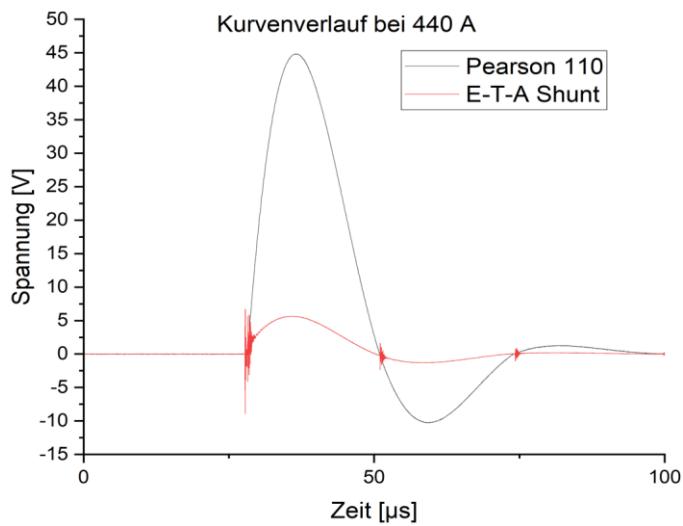


Abbildung 2.143: Vermessung der koaxialen Messshunts

- 1.) Werte des Widerstandswerts eines $12,5 \text{ m}\Omega$ -Messshuts über der Strom-Amplitude
- 2.) Stromverlauf eines $8 \mu\text{s} / 20 \mu\text{s}$ – Stoßstroms über dem $12,5 \text{ m}\Omega$ -Messshunts über Zeit

Type 2 -

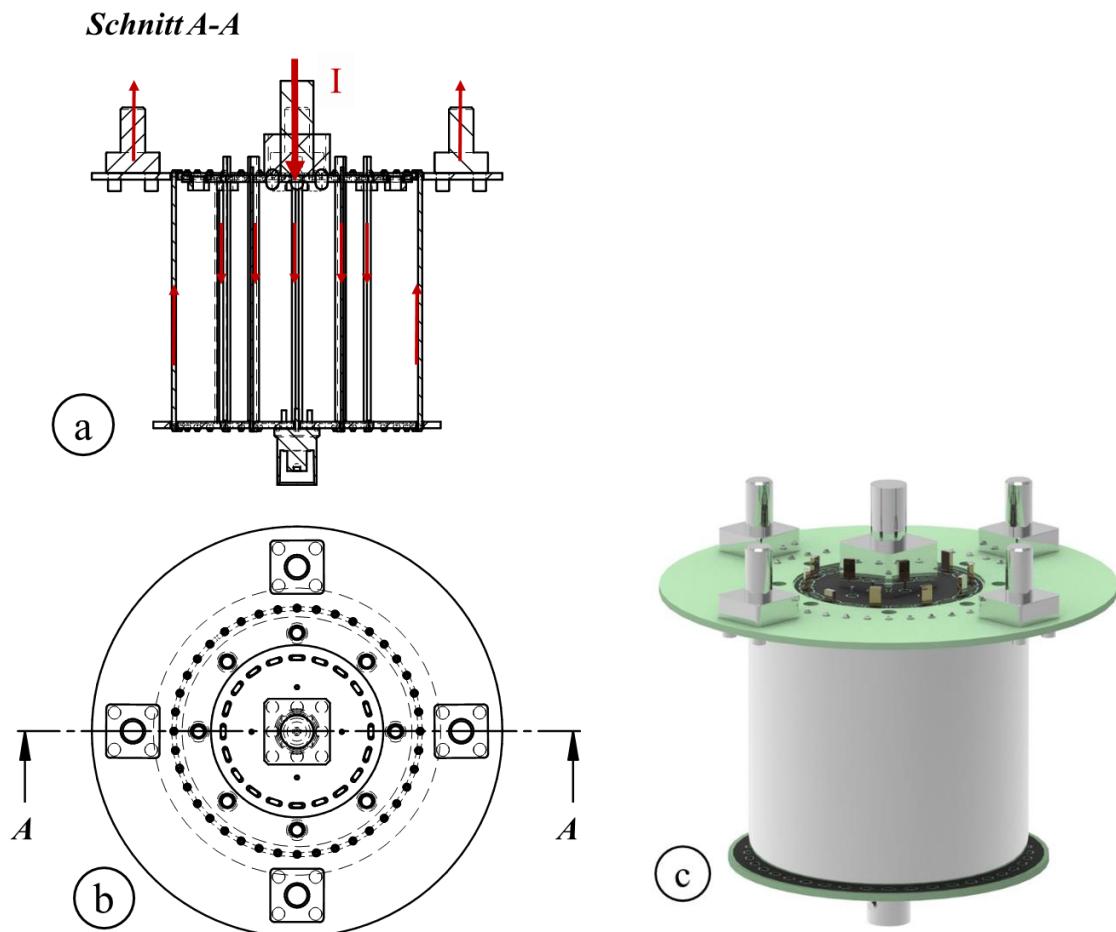


Abbildung 2.144: Aufbau Messhund Typ 2

Hierbei wurden folgende Varianten umgesetzt:

Varianten
100 mΩ
50 mΩ
25 mΩ
10 mΩ
5 mΩ
1 mΩ
0,5 mΩ

Abbildung 2.145: Funktion und Ausführungen - Messshunts - Typ 2

2.6.3 DEHN:

Es wurde bei DEHN eine Übersicht der vorhandenen Messmittel inklusive der technischen Daten, welche für Gleichstrommessungen geeignet sind, zusammengestellt. Die Liste wurde der PTB zur Verfügung gestellt. Da die am besten geeigneten Messmittel noch kalibriert waren, entfiel die zusätzliche Kalibrierung durch die PTB vor Ort.

Im Rahmen des Arbeitspakets 6 wurden außerdem von der E-T-A Messshunts (100mΩ- und 50mΩ-Shunt) entwickelt, welche von der PTB kalibriert wurden und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt wurden. Die Shunts wurden von DEHN im eigenen Prüffeld in Betrieb genommen. Die Messshunts wurden des Weiteren während der im Projekt durchgeführten Messkampagnen verwendet, um Stromnull im Modellschalter bestimmen zu können.

Die Messergebnisse wurden zudem bei gemeinsamen Messungen mit einem hochwertigen Shunt des Partners INP verglichen. Im untersuchten Strombereich (Höhe, Änderungsgeschwindigkeit) bei den für das Projekt relevanten Belastungen wurden keine relevanten Unterschiede ermittelt, so dass die entwickelten Messshunts und die Abschneide- elektronik für die Messaufgaben im Projekt verwendet werden können.

Zur Inbetriebnahme der Shunts:

Zu Beginn wurde experimentell die Belastbarkeit der Shunts überprüft, indem ein Einzelwiderstand, welcher im Shunt verbaut ist, für max. 1 ms mit einem Strom

belastet wird. Im Anschluss wurde der Widerstand auf Beschädigungen durch Messung des Widerstands überprüft. Das Ergebnis der Belastungstests war, dass Messungen bis zu 700 A für 300 μ s oder bis zu 380 A für 1 ms im zulässigen Erwärmungsbereich des Shunts liegen und damit zulässig sind.

Vor Einsatz der Shunts wurden diese noch mit einem Überspannungsschutz und einer Abschneideelektronik versehen. Der Überspannungsschutz ist zum Schutz des Oszilloskops vorgesehen. Die Abschneideelektronik bestehend aus einer Diode wird benötigt, um das Einsatzziel der Shunts zu erreichen, ohne das Oszilloskop in Sättigung zu treiben, da es dann zu fehlerhaften Messungen kommt. Dieses Ziel ist das Feststellen von „Stromnull“ im Modellschalter. Dementsprechend wird auch nur ein kleiner Messbereich für die Auswertung der Messung benötigt (-100 mA bis 1 A). Im Anschluss an diese genannten Maßnahmen wurde ein 8/20-Impuls der Stromstärke 240 A mit dem Messshunt mit Abschneideelektronik gemessen und mit der Messung eines kalibrierten Persons verglichen. Ein Vergleich hierzu ist in Abbildung 2.146 zu sehen. Dabei ist ein nahezu deckungsgleiches Messergebnis festzustellen. Der in der Abbildung gekennzeichnete Bereich 1 ist dabei verfälscht, da dort die Abschneideelektronik aktiv ist. Im Bereich 2 ist die Messung dagegen richtig.

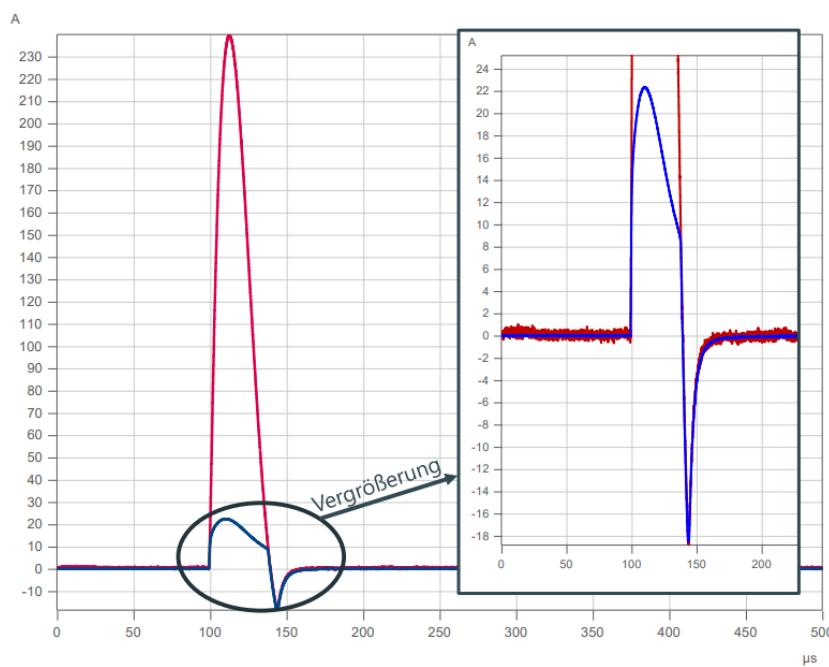


Abbildung 2.146: Vergleichsmessung zwischen dem Messshunt und einem Pearson

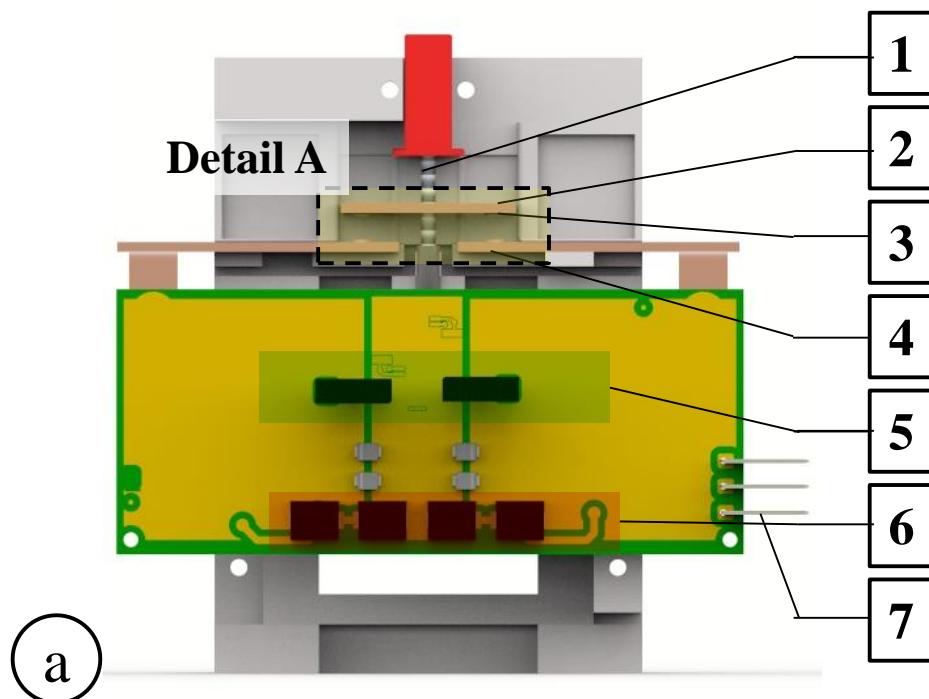
2.7 AP 7 - Funktionsüberprüfung

2.7.1 E-T-A:

Das Ziel dieses Arbeitspaketes ist die Übertragung der Erkenntnisse aus den vorangegangenen APs in einen realen Hybridschaltgerätedemonstrator. Dieser wird für die 850 V DC Spannungsebene entwickelt. Es wird die Möglichkeit eines Schaltgeschwindigkeitsgewinns bei Hybridschaltern durch die Auswertung der Wiederverfestigungsspannung und die darüber erfolgende intelligente Ansteuerung des elektronischen Leistungsteils im Hybridschalter untersucht. Aufgrund der Komplexität und des wirtschaftlichen sowie wissenschaftlichen Aufwands liegt der Schwerpunkt des Arbeitspaketes auf den aus **AP. 2**, **AP. 3** und **AP. 4** resultierenden Ergebnissen.

Zu Beginn des Arbeitspakets **AP. 7.1** wurden basierend auf den Ergebnissen in orientierenden Messreihen nach **AP. 2.1** Messkampagnen festgelegt.

Die Ausgangsform des entwickelten Demonstrators des Bypassschalters in Kombination mit der Hybridelektronik zeigt Abbildung 2.147. Im Folgenden wurde der Demonstartorschalter weiter an die Anforderungen hinsichtlich Spannung und Strom angepasst.



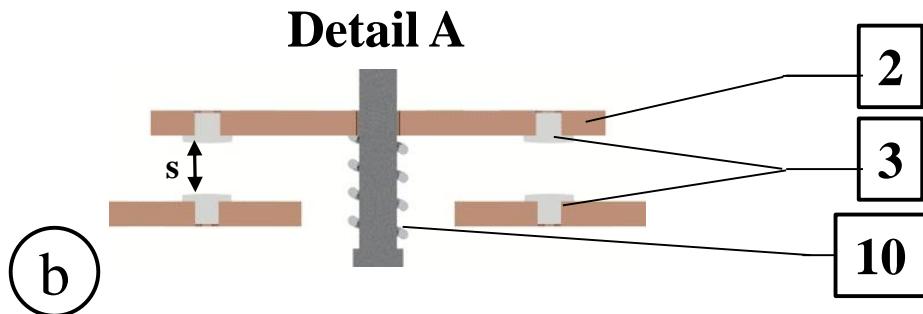


Abbildung 2.147: Bypassschalter [27]

Der Schwerpunkt der Auslegung lag nicht auf der Ausgestaltung des mechanischen Bypassschalters, sondern auf der modular aufgebauten Hybridelektronik und Steuerung nach Kapitel 2.4. Abbildung 2.147-a zeigt den Hybridschalter komplett. Es handelt sich um eine Schalteranordnung mit seriell Doppelkontakt. Eine separate Ansicht in Abbildung 2.147-b zeigt das Kontaktensystem im Detail. Die bewegliche Kontaktbrücke 2 ist mit einer Welle 1 mechanisch an einen Antrieb angekoppelt. Die Lagerung der Kontaktbrücke in vertikaler Richtung erfolgt über die Kontaktdruckfeder 10. Im Fall der Kontaktstücke 3 handelt es sich um eine symmetrische AgNi 80/20-Kontaktpaarung. Das Material AgNi 80/20 dient im Rahmen der Messreihen als Basis-Material und damit als Bezugspunkt weiterer Untersuchungen zur Auswahl geeigneter Kontaktmaterialien. Die unteren Laufschiene sind mit 4 gekennzeichnet. Der Hub s der Kontakte im offenen Zustand ist auf 4 mm dimensioniert.

Der Halbleiterzweig auf der Platine im Lastpfad ist mit 5 gekennzeichnet. Der Energieabsorber S_{EA} ist mit 6 markiert. Die Regeleinheit C ist mit dem Gate-Anschluss verbunden. Die Steuer und Regeleinheit ist für die experimentellen Untersuchungen im Leistungsprüfstand modular aufgebaut. Die Regel- und Steuereinheit besteht aus einer Logikeinheit 1, der Treiberschaltung 2, einer Rückkopplungseinheit 3, dem Netzteil 4 sowie einer Kommunikationseinheit 5. Die Gatespannung kann variabel von 0 V bis 50 V vorgegeben werden. Getestet wird in nachfolgend beschriebenen Untersuchungen mit 30 V.

2.7.2 Halbleiterschalter

Das Schaltkonzept des Demonstrators ist derart ausgeführt, dass es mit unterschiedlichen Leitungshalbleiterkonzepten bestückt werden kann. Hierbei ist im Rahmen des Projekts ein bidirektionales Konzept vorgesehen. Zwei mögliche Halbleiterkonzepte sind in Abbildung 2.148 zu sehen.

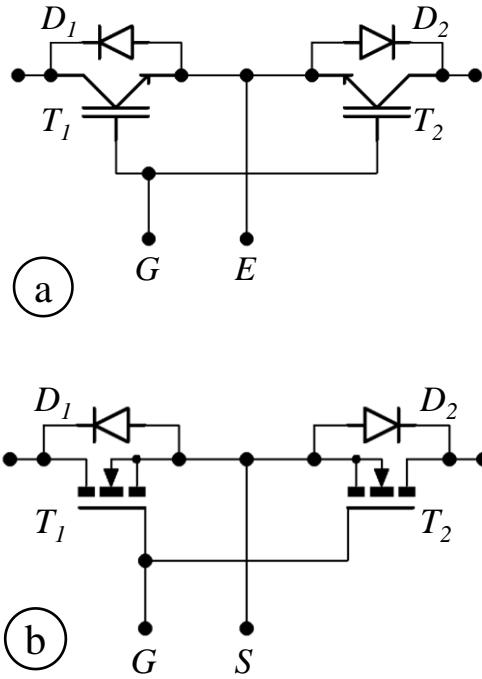


Abbildung 2.148: Common Emitter- oder Common Source -Halbleiterschalter S_{HL} in bipolarer und FET-Ausführung [27]

Neben Konzepten in bipolarer Ausführung mit Si-IGBTs Abbildung 2.148-a ist eine Bestückung mit MOSFETs auf SiC-Basis nach Abbildung 2.148-b möglich. Aufgrund der zunehmenden Preisreduzierung der SiC-MOSFETs wird in dieser Veröffentlichung ein Vergleich bezüglich Einsetzbarkeit und Nutzen gezogen. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen werden folgende HL-Schalter untersucht und verglichen:

Tabelle 2.21: Parameter - Leitungshalbleiter

	SiC-MOSFET	Si-IGBT
Max. Sperrspannung	1200 V	1200 V
Strom 100°C	60 A	103 A
Max. Gatespannung	15 V	20 V

Funktionsfähigkeit und Reproduzierbarkeit der experimentellen Untersuchungen werden in einer ersten Messreihe überprüft. Die orientierende Messreihe hat zwei Ziele:

1. Bestimmung der notwendigen Mindesteinschaltzeiten des Halbleiterschalters t_{HL}
2. Bewertung der Messverfahren

Prüfkreisparameter von 400 V und Ströme bis 200 A werden im Rahmen der Messung getestet und ausgewertet. Eine einzelne Messreihe besteht aus jeweils 10 Einzelmessungen. Nachfolgend wird zu Beginn der Prüfaufbau vorgestellt. Anschließend werden die untersuchten Schaltkonzepte beschrieben und die Ergebnisse der Messreihen zusammengefasst.

Konzeptstudie und Ergebnisse

Ausgehend von den Ergebnissen aus Kapitel 2 wird deutlich, dass für einen Vergleich der Hybridschaltkonzepte eine Bestimmung der Leistungs- und Energiebilanzen der Komponenten des Hybridschaltkonzepts notwendig ist. Für gute Vergleichbarkeit wird die Einschaltdauer der Leistungshalbleiter für alle Hybridschaltkonzepte auf 350 µs festgelegt.

Die Ströme durch sämtliche Komponenten diskret aufgenommen. Ein Vergleich unterschiedlicher Halbleiterschalter-Technologien wird durch eine unidirektionale Bestückung möglich. Zusätzlich wird nach [40] eine relative Zeitsynchronität der Messkanäle überprüft.

Beobachtung

Nachfolgend werden die wichtigsten Beobachtungen der Messreihen veranschaulicht.

Messung - Hybridschaltkonzept 2-a-ii

Bezogen auf das Oszillogramm eines kompletten Schaltvorgangs von **Schaltkonzept 2-a-ii** in Abbildung 2.149 einen Ausschnitt des Schaltvorgangs. Abbildung 2.149 beinhaltet das Ein- und das Ausschalten des Halbleiterschalters S_{HL} sowie die zwei Kommutierungsprozesse des Stroms.

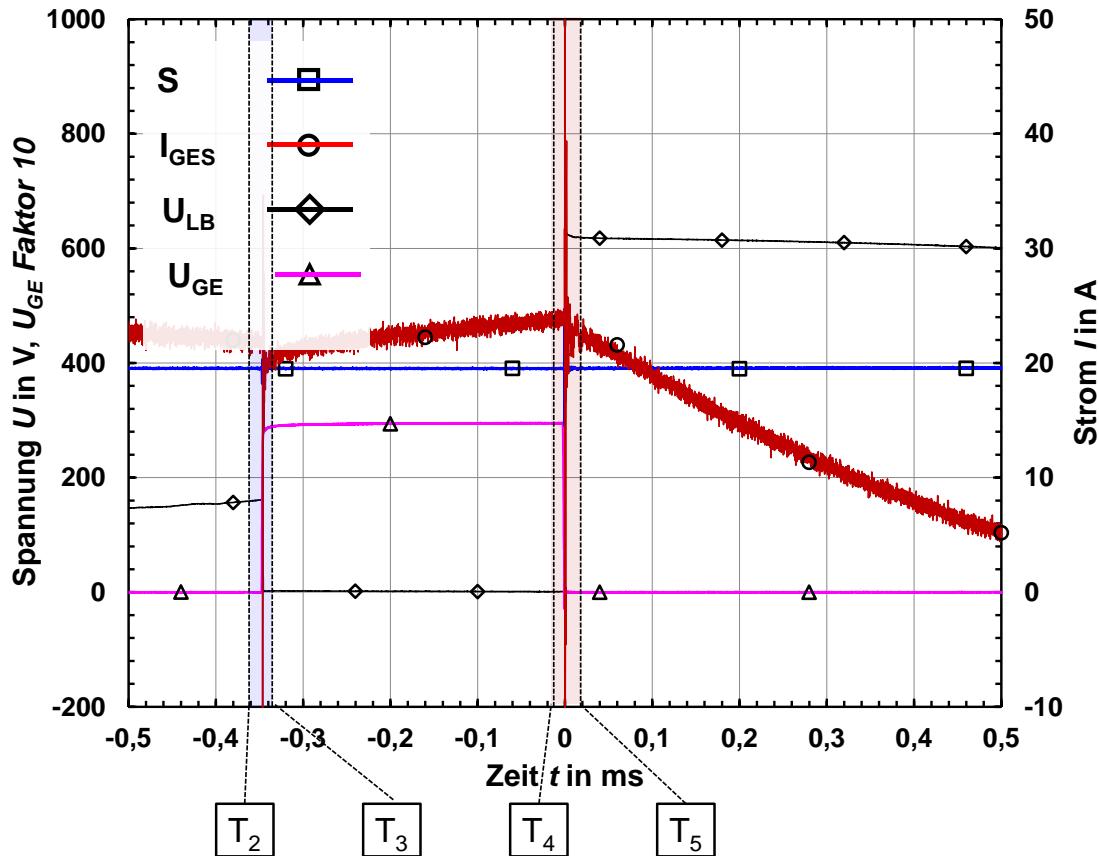


Abbildung 2.149: Hybridschaltkonzept 2-a-ii – Lichtbogenreduziert – 400 V, 32 A und $\tau = 1$ ms – Ausschnitt 1 [27]

Kommutierungsprozess 1

Der Strom kommutiert im Fall des **Schaltkonzepts 2-a-ii** auf den Halbleiterschalter S_{HL} während Schaltlichtbögen brennen und gleichzeitig der Halbleiterschalter eingeschaltet wird. Eine gezoomte Detailansicht zeigt Abbildung 2.150.

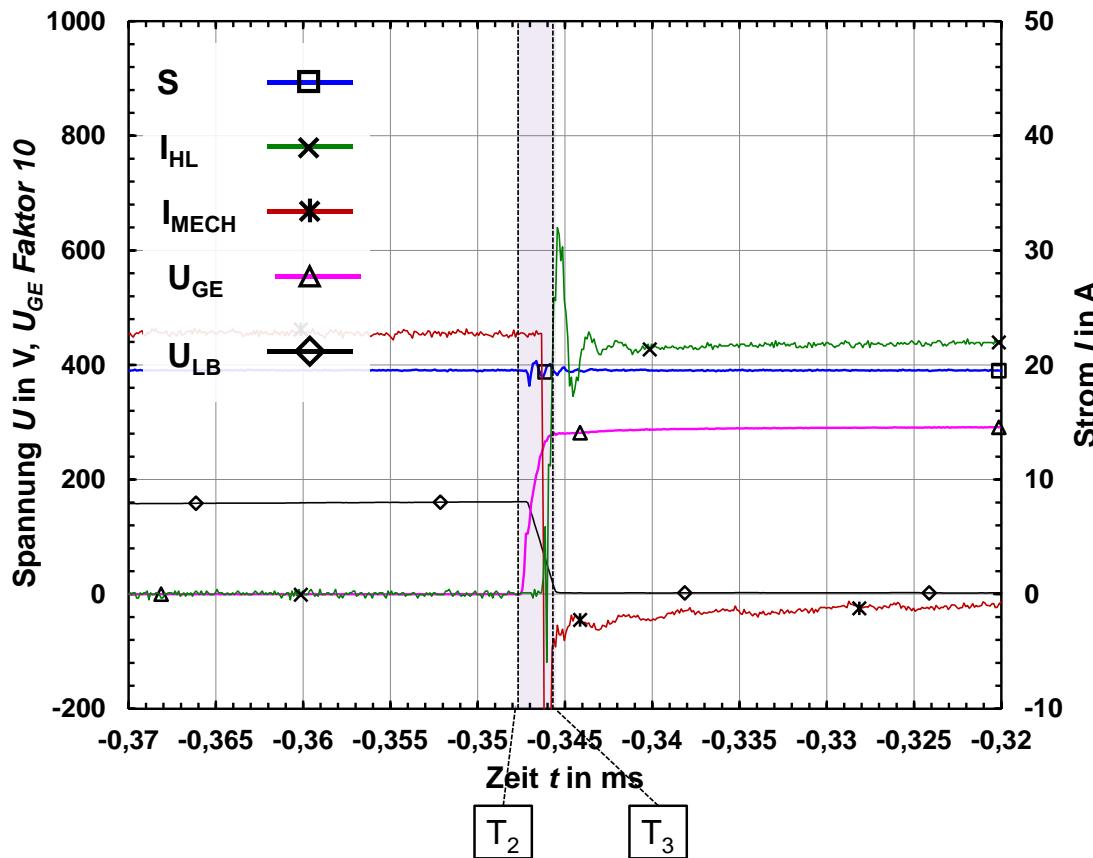


Abbildung 2.150: Hybridschaltkonzept 2-a-ii – Lichtbogenreduziert – 400 V, 32 A und $\tau = 1$ ms – Ausschnitt 2 [27]

Zum Zeitpunkt T_2 brennen 2 Schaltlichtbögen im Bypassschalter S_B . Zwischen den Zeitpunkten T_2 und T_3 wird der Halbleitereschalter S_{HL} eingeschaltet. Im Augenblick T_2 wird die Gatespannung U_{GE} auf 30 V geladen. Mit Erreichen der Schwellspannung des IGBT bricht die Lichtbogenspannung U_{LB} auf 0 V zusammen. Der Strom kommutiert in der Kommutierungszeit t_{K1} . Die Kommutierung und das Einschalten des Leistungshalbleiters sind Teil des Prozesses t_{LB_AUS} . Der Prozess ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt.

Abbildung 2.151: Ablaufdiagramm Lichtbogenlöschung – Hybridschaltkonzept 2-a-ii [27]

An den Kommutierungsprozess schließt sich der Prozess der Wiederverfestigung des Bypassschalters an.

Kommutierungsprozess 2

Der Strom kommutiert auf den Energieabsorber S_{EA} . Eine gezoomte Detailansicht des Signalverlaufs zeigt Abbildung 2.152.

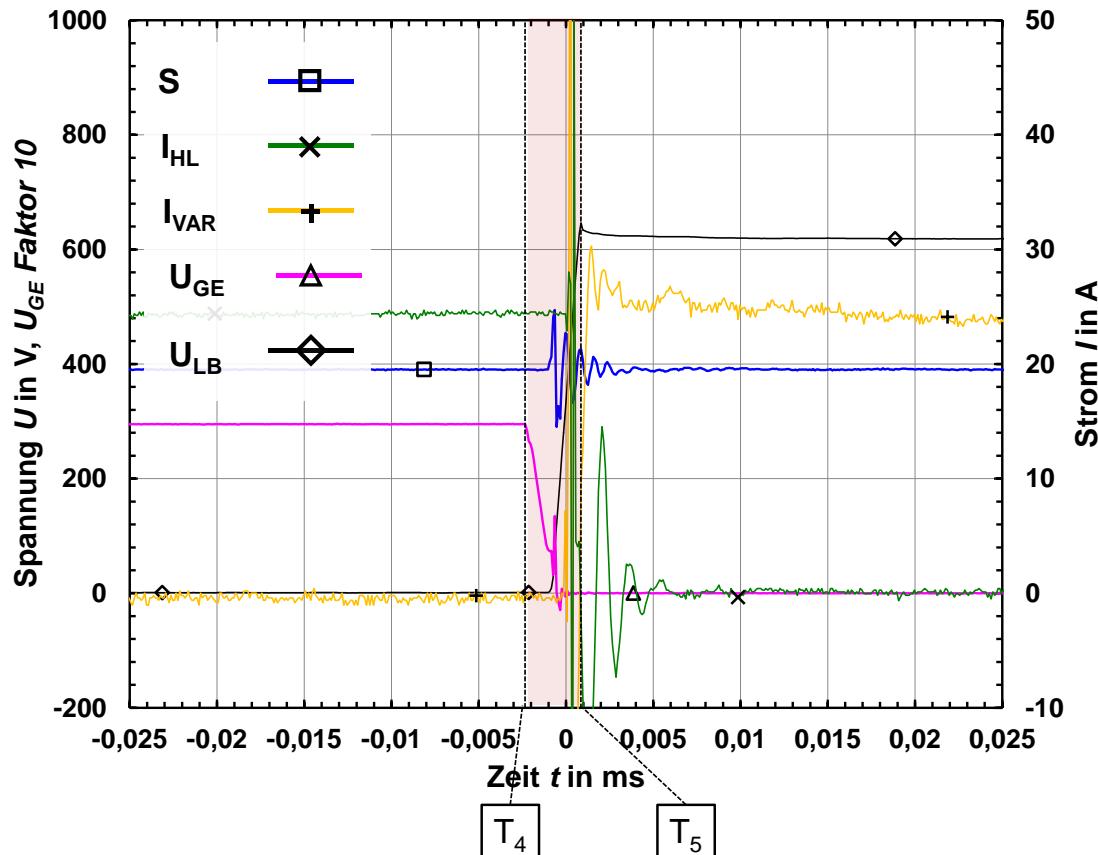


Abbildung 2.152: Hybridschaltkonzept 2-a-ii – Lichtbogenreduziert – 400 V, 32 A und $\tau = 1 \text{ ms}$ – Ausschnitt 3 [27]

Zum Zeitpunkt T_4 wird die Entladung der Gatespannung gestartet. Mit Erreichen der Schwellspannung s beginnt der Spannungsfall über dem IGBT zu steigen. Nach t_{HL_AUS} von $2 \mu\text{s}$ ist die Gatespannung U_{GE} abgebaut. Mit Erreichen der Schwellspannung, hier ungefähr 460 V, des Energieabsorbers S_{EA} , kommutiert der Strom vom Halbleiterschalter S_{HL} auf den Energieabsorber S_{EA} in kleiner $1 \mu\text{s}$. Ein vereinfachtes Ablaufdiagramm zeigt Abbildung 2.153.

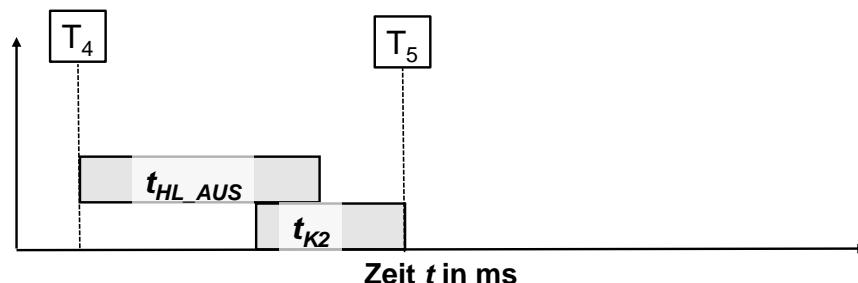


Abbildung 2.153: Ablaufdiagramm Kommutierungsprozess 2 - Hybridschaltkonzept 2-a-ii [27]

Energieumsätze:

Die Energieumsätze der einzelnen Komponenten W sowie die gesamte Verlustleistung des Schaltkonzeptes P_{GES} sind in Abbildung 2.154 zu sehen.

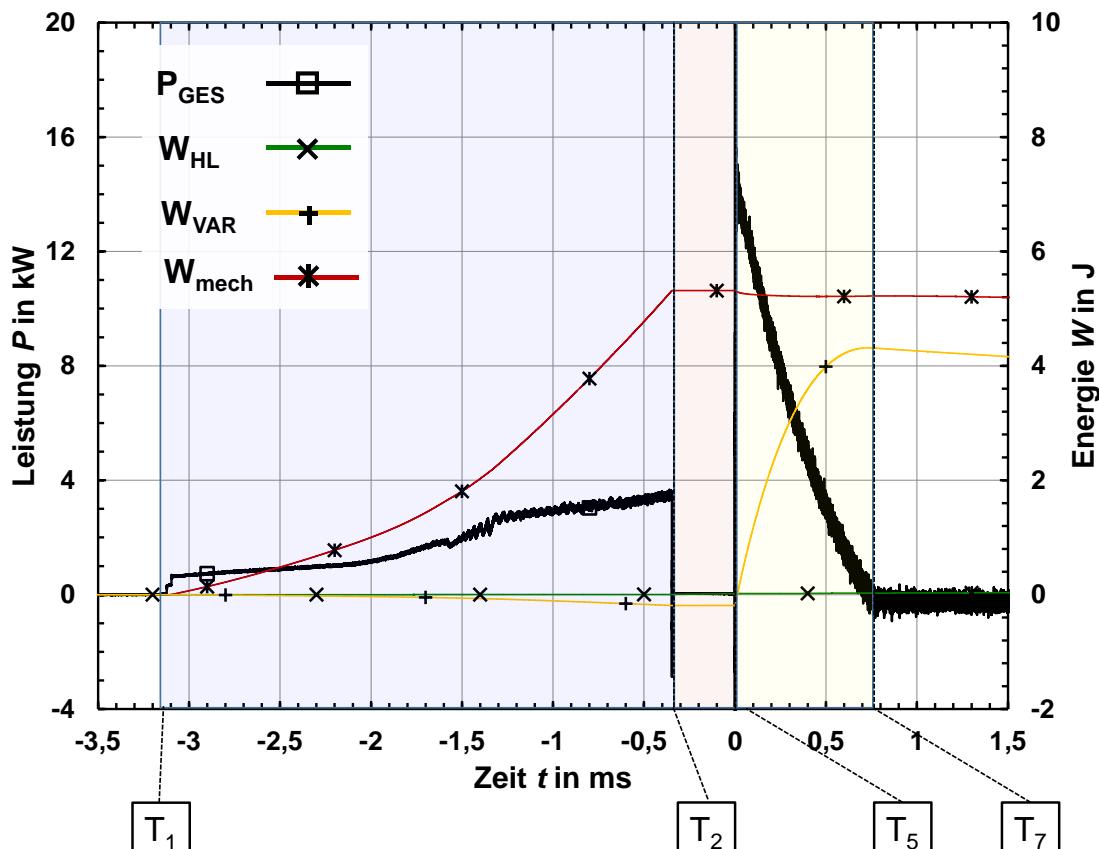


Abbildung 2.154: Hybridschaltkonzept 2-a-ii – Lichtbogenreduziert – 400 V, 32 A und $\tau = 1$ ms – Energie und Leistung [27]

Folgende Energieumsätze stellen sich ein:

Tabelle 2.22: Energieumsätze Hybridschaltkonzept 2-a-ii – Lichtbogenreduziert – 400 V, 32 A und $\tau = 1$ ms

	Energien
Bypassschalter S_B	5,52 J
Halbleiterschalter S_{HL}	0,018 J
Energieabsorber S_{EA}	4,55 J

Messung - Hybridschaltkonzept 2-a-iii

Ausgehend von dem Oszillogramm eines kompletten Schaltvorgangs von **Schaltkonzept 2-a-iii** zeigt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** einen Ausschnitt des Schaltvorgangs.

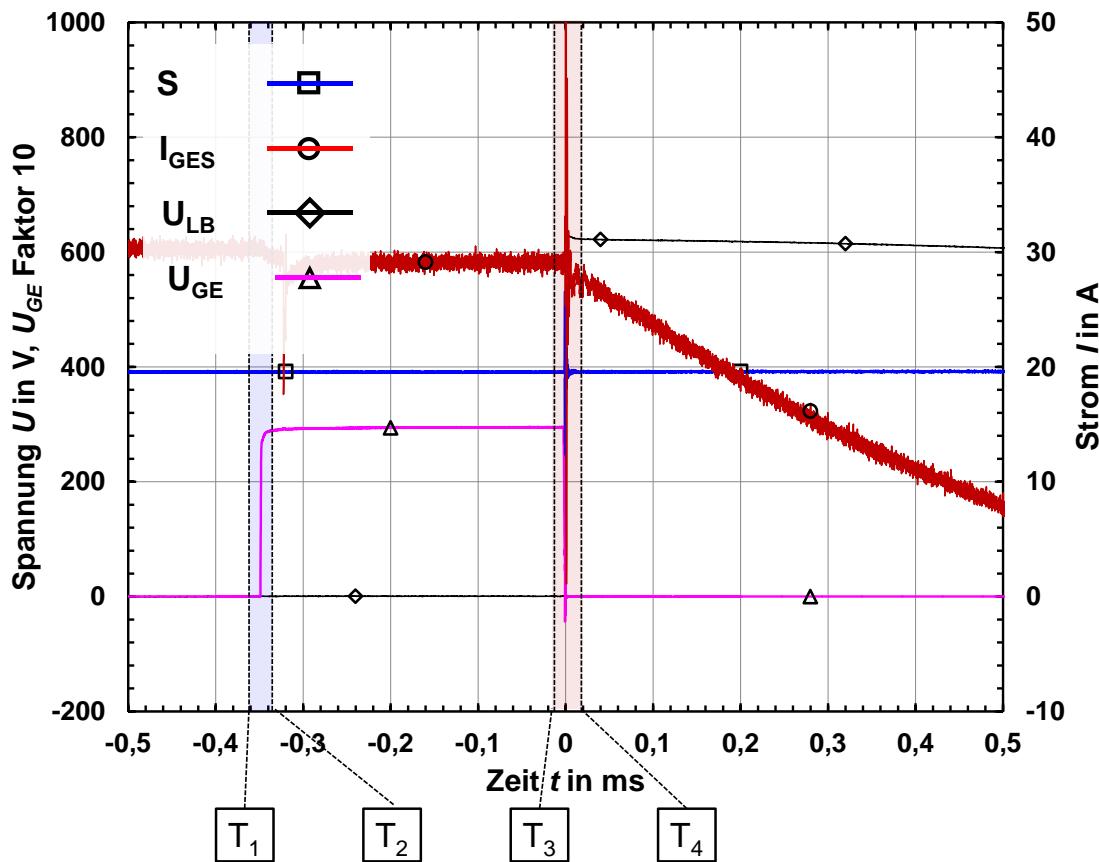


Abbildung 2.155: Hybridschaltkonzept 2-a-iii – Lichtbogenreduziert – 400 V, 32 A und $\tau = 1 \text{ ms}$ – Ausschnitt 1 [27]

Kommutierungsprozess 1

Der erste Kommutierungsprozess unterscheidet sich abhängig vom Hybridschaltkonzept grundlegend. Abbildung 2.156 zeigt einen gezoomten Ausschnitt.

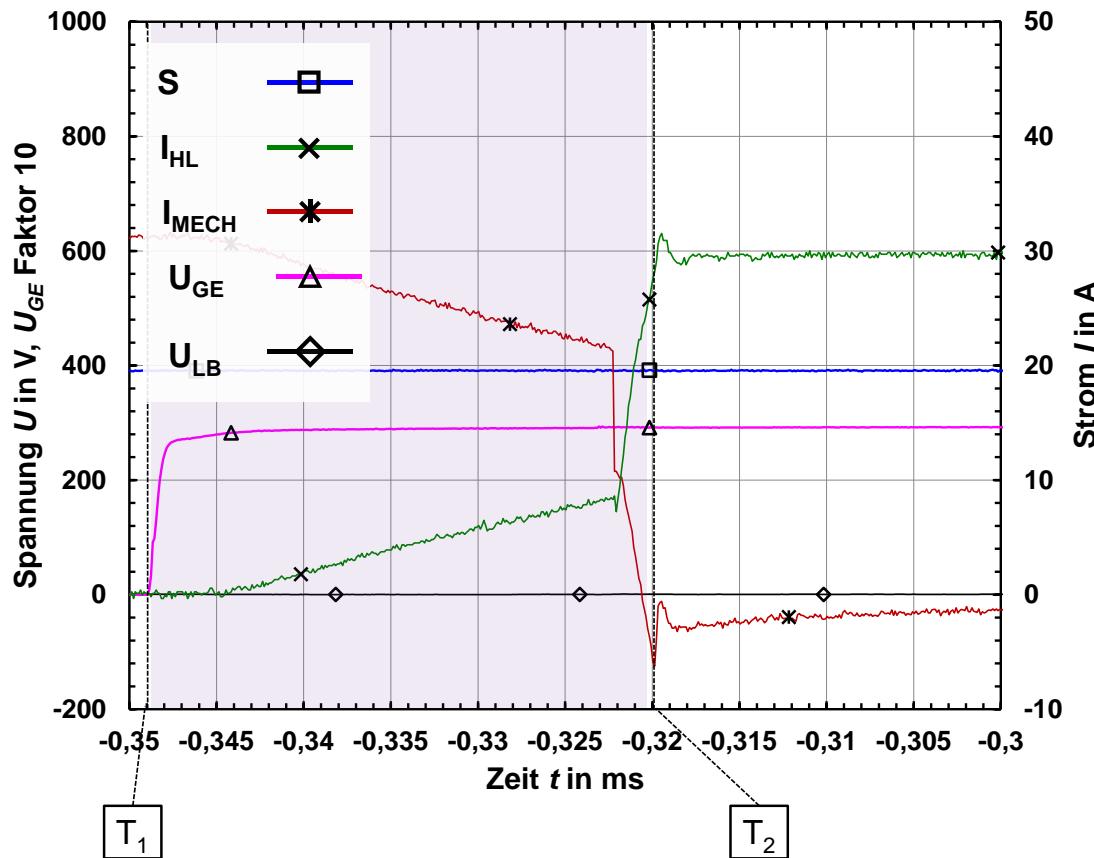


Abbildung 2.156: Hybridschaltkonzept 2-a-iii – Lichtbogenreduziert – 400 V, 32 A und $\tau = 1 \text{ ms}$ – Ausschnitt 1 [27]

Startend in T_1 wird die Gate-Spannung in einer Dauer t_{HL_EIN} auf 30 V geladen. Nach ungefähr 3 μs ist anhand der Stromverläufe der Start der Stromkommutierung erkennbar. Die Stromkommutierung dauert bis zum Abschluss im Zeitpunkt T_3 insgesamt 25 μs . Der Prozess ist abgeschlossen bevor das mechanische Kontaktssystem des Bypassschalters S_B öffnet und eine Lichtbogenzündung initiiert wird. Die beginnende Öffnung des Kontaktssystems und die wirkenden Spannungsfälle über den Kontakten bewirken eine Gegenspannung die zur Stromkommutierung reicht.

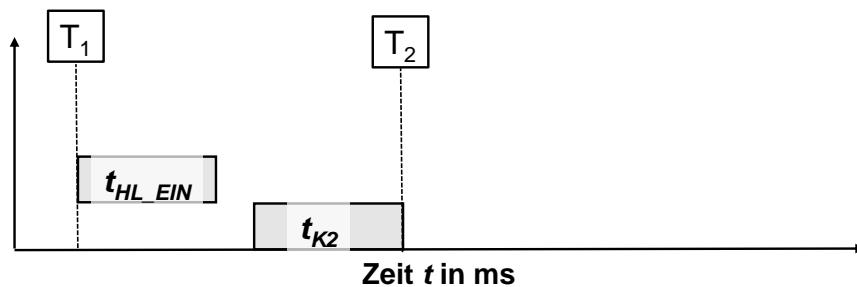


Abbildung 2.157: Ablaufdiagramm Kommutierungsprozess 1 - Hybridschaltkonzept 2-a-iii [27]

Kommunikationsprozess 2 des **Hybridschaltkonzepts 2-a-iii** unterscheidet sich nicht von Kommunikationsprozess 2 des **Hybridschaltkonzepts 2-a-ii** weshalb an dieser Stelle auf eine Erläuterung verzichtet wird.

Energieumsätze:

Die Energieumsätze der einzelnen Komponenten W sowie die gesamte Verlustleistung des Schaltkonzeptes P_{GES} sind in Abbildung 2.158 zu sehen.

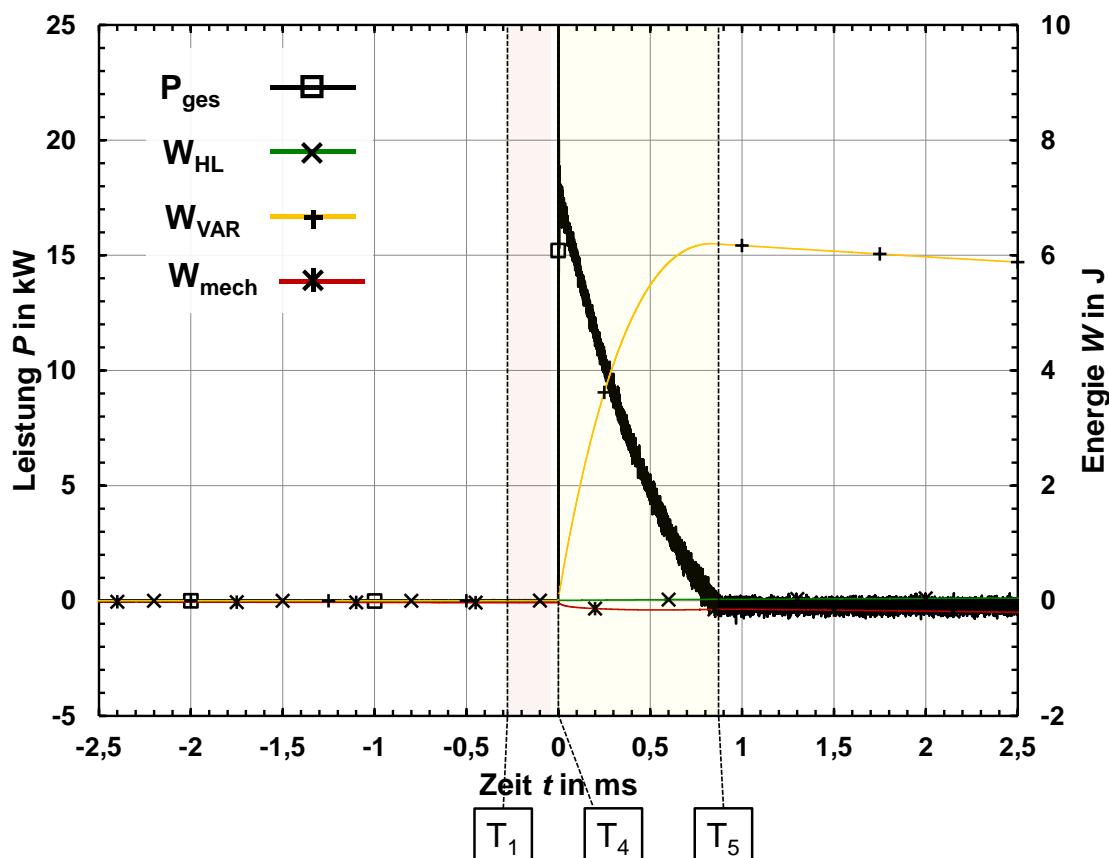


Abbildung 2.158: Hybridschaltkonzept 2-a-iii – Lichtbogenreduziert – 400 V, 32 A und $\tau = 1$ ms – Energie und Leistung [27]

Folgende Energieumsätze stellen sich ein:

Tabelle 2.23: Energieumsätze Hybridschaltkonzept 2-a-ii – Lichtbogenreduziert – 400 V, 32 A und $\tau = 1$ ms

	Energien
Bypassschalter S_B	Ungefähr 0 J
Halbleiterschalter S_{HL}	0,013 J
Energieabsorber S_{EA}	6,17 J

2.7.3 DEHN:

Im Rahmen des Arbeitspakets 7 sollte DEHN bei der Durchführung von Versuchen unterstützen und seine Prüffelder - insbesondere das DC-Prüffeld - für Projektpartner zur Verfügung stellen. Da sich die Projektpartner insbesondere als Konsequenz von Corona selbst Möglichkeiten zur Überprüfung der Schaltgeräte geschaffen haben, wurde die Möglichkeit der Durchführung von Tests bei DEHN nur von INP (siehe AP 3.3) genutzt. Dementsprechend hat DEHN die freigewordenen Kapazitäten einerseits für die umfangreicher als angenommen ausgefallenen Messkampagnen mit INP, aber auch für weitere Untersuchungen am eigenen Modellschalter mit zugehörigem Hybridschalter genutzt. Des Weiteren wurde der von E-T-A entwickelte und DEHN zur Verfügung gestellte Hybridschalter inklusive Ansteuerung zu Vergleichszwecke in Betrieb genommen. Die zusätzlich in AP 7 bearbeiteten Punkte werden nachfolgend kurz vorgestellt.

Analog zu dem von DEHN in AP 2.3 entwickelten Hybridschalter (Schaltanordnung feste Kontakte) entwickelte auch E-T-A einen Schalter (bewegte Kontakte). Dieser wurde DEHN für Vergleichsmessungen zur Verfügung gestellt und in AP 7 in Betrieb genommen. Hierfür wurde die Steuerungseinheit des E-T-A-Hybridschalters in einem ersten Versuch mithilfe eines Arduinos angewiesen, den Hybridschalter zu aktivieren und eine Schaltstrecke kurzzuschließen, bzw. dass der Hybridschalter den Kurzschluss beendet und den fließenden Strom abschaltet. Getestet wurde der E-T-A-Hybridschalter parallel zu einem Modellschalter von DEHN. Im Anschluss an diesen Test wurden Spannung und Strom beim Abschaltvorgang mit einem solchen Vorgang bei der Kombination DEHN-Modellschalter parallel zu DEHN-Hybridschalter verglichen. Da die Verläufe unabhängig der Kombination ähnlich sind, können auch die Ergebnisse im Projekt verglichen werden. Außerdem wurde INP eine Hilfestellung zur Inbetriebnahme des E-T-A-Hybridschalters für beide Schaltanordnungen (feste, bewegliche Kontakte) aufgrund der eigens gewonnenen Erfahrungen mit diesem gegeben.

Als weitere Aufgabe in AP7 standen finale Tests zum Hybridschalter von DEHN an. So musste nachgewiesen werden, dass der Schalter in der Lage ist, die zu Projektbeginn festgelegten Parameter mit einem Strom von 1 kA bei einer Zeitkonstante von 1 ms zu schalten. Da dieser Versuch aufgrund des zu langsamen Stromanstiegs bedingt durch die Zeitkonstante nicht in Kombination mit dem Modellschalter durchgeführt werden kann, wurde hierfür ein extra Versuchsaufbau entwickelt. Bei diesem Aufbau fließt der Strom über einen zum Hybridschalter parallel geschalteten Leitungsschutzschalter so lange, bis dieser 1 kA erreicht. Dann schaltet der Leitungsschutzschalter, welcher Spannungsgesteuert ist, ab und der bereits durchgeschaltete Hybridschalter übernimmt den Strom. Nach

vollständiger Stromübernahme schaltet nun der Hybridschalter ab und es ist gelungen, einen in der Realität vorliegenden Strom von 1,1 kA bei einer Zeitkonstante von 1,1 ms abzuschalten.

Die Stromflussdauer und die Höhe des Stromes, welche den Schalter belasten, konnten durch diesen Hilfsaufbau weitestgehend unabhängig gesteuert werden, wodurch die Vergleichbarkeit der Lichtbogenbelastung und der Belastung des Hybridkreises bzgl. der Einflussgrößen Stromhöhe, Zeitdauer des Lichtbogens, Zeitdauer der Erholungsphase und Schaltarbeit des Hybridkreises realisiert werden konnte.

2.8 Veröffentlichungen

1. Methling, R., Gonzalez, D., Schmausser, S., Kellermann, M., & Ehrhardt, A. „Optical Investigation of a Spark Gap for DC Protection around Current Zero.“ In: 24th Symposium on Physics of Switching Arc (FSO). 2023, pp. 1-5. DOI: 10.14311/ppt.2023.3.154
2. Methling, R., Gonzalez, D., Schmausser, S., Kellermann, M., & Ehrhardt, A. „Optische Untersuchungen zur Wiederverfestigung einer DC-Schaltstrecke bei hybriden Schaltvorgängen.“ In: 27. Fachtagung Kontaktverhalten und Schalten Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe, 2023. 2023, pp. 37–43.
3. Gonzalez, D., Methling, R., Köpf, H., Steegmueller, P., Holbe, S., & Gortschakow, S. (2023). „Characterization of arc plasma during hybrid-switching using a DC-Hybrid model switch.“ In: 68th Holm Conference on Electrical Contacs.
4. Gortschakow, S., Gonzalez, D., Methling, R., & Uhrlandt, D. (2023). MODELLING OF SWITCHING ARCS AT SHORT ELECTRODE. International Conference on Gas Discharges and their Applications - GD.
5. Methling, R., Gonzalez, D., Schmausser, S., Kellermann, M., & Ehrhardt, A. „Investigation of Post Arc Radiating Behaviour of a Spark Gap for DC Protection.“ In: International Conference on Electrical Contacts- ICEC2022 Sapporo. 2022, pp. 17-23.
6. Gonzalez, D., Metling, R., Gortschakow, S., Koepf, H., Steegmueller, P., & Holbe, S. (2022). Investigation of the Plasma of a DC hybrid-switch model at beginning of contact separation. In I. EPS (Hrsg.), 67th Holm Conference on Electrical Contacs.
7. Köpf, Hendrik, Steegmüller, Peter, Labs, Alexander, Holbe, Stefan, Bernhard, Arno, Guo, Xiaofei und Schilling, Florian. 2023. Hybride Schaltkonzepte - Vorteile und Nachteile. [Hrsg.] Schoepf. 27 Albert Keil Kontaktseminar - AKK. Karlsruhe : VDE VERLAG GMBH - Berlin - Offenbach, 2023. [27]
8. Arno Bernhardt et al. „Metrological acquisition of electrical and optical variables for optimization of the hybrid switching process“ In: xxx, 2024, pp. xx-xx.
9. Ralf Methling, Diego Gonzalez, Sergey Gortschakow, Sebastian Schmausser, Marco Kellermann, Arnd Ehrhardt, Annapolis, MD, USA, "Post Arc Conductance Determination of a Spark Gap for DC Protection by UV Spectroscopy", 32nd International Conference on Electrical Contacts - ICEC2024 and 69th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 6.- 11. Oktober 2024,

Literaturverzeichnis

- [1] A. Erk und M. Schmelzle, Grundlagen der Schaltgerätetechnik, D- 3300 Braunschweig: Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 1974.
- [2] S. Greitzke, Untersuchung an Hybridschaltern, Braunschweig, 1992.
- [3] C. Klosinski, N. Hemdan, M. Hilbert und M. Kurrat, „Smart Modular Switchgear for DC Systems,“ in 23. *Albert-Keil-Kontaktseminar - AKK*, T. Schoepf, Hrsg., Karlsruhe, VDE VERLAG GMBH · Berlin · Offenbach, 2015.
- [4] H. Stammerger und H. Köpf, „DC2019 Industrielle Gleichstromnetze, TH OWL, Lemgo,“ in *DC-Netz schützen und sicher schalten*, Lemgo, 2019.
- [5] B. Weiß, „Überblick Systemkonzept Verbundvorhaben: DC-Industrie – Intelligentes offenes DC-Netz in der Industrie für hocheffiziente Systemlösungen mit elektrischen Antrieben,“ in *Gleichstrom für die Industrie - Mit DC-Versorgung zur Energieeffizienz und Energieflexibilität am*, Frankfurt am Main, 2017.
- [6] O. Settensdal, „Siemens PD SLN - BlueDrive Plus C (DC power grid for marine and offshore vessel) - Gleichstrom für die Industrie - Mit DCVersorgung,“ Frankfurt am Main, 2017.
- [7] C. Klosinski, N. Hemdan, M. Kurrat, J. Meisner, S. Passon und F. Gerdinand, „A new software-based control unit for fault detection and isolation in LV DC systems,“ in *Electrical Contacts 1953 to 2017*, T. Schöpf, Hrsg., Edinburgh, VDE Verlag, 2016.
- [8] J. Jebramcik und F. Berger, „Switching characteristics of arc chutes in DC contactors,“ in 22. *Albert-Keil-Kontaktseminar - AKK*, T. Schoepf, Hrsg., Karlsruhe, VDE VERLAG GMBH · Berlin · Offenbach, 2013.
- [9] H. Köpf, C. Klosinski, E.-D. Wilkening und M. Kurrat, „Experimental research on direct current switchgear,“ in *60th Holm Conference on Electrical Contacts - IEEE*, T. Schöpf, Hrsg., New Orleans, VDE VERLAG GMBH - Berlin - Offenbach, 2014.

- [10] A. Sauer, Hrsg., Die Gleichstromfabrik. Energieeffizient. Robust. Zukunftsweisend., Carl Hanser Verlag, 2020.
- [11] International Electrotechnical Commission (IEC), „IEC 60947 - 10 - Low-voltage switchgear and controlgear - Part 10: Semiconductor circuit-breakers,“ International Electrotechnical Comission (IEC), 2020.
- [12] A. M. S. Atmadji und J. G. J. Sloot, „Hybrid switching: A review of current literature,“ in *International Conference on Energy Management and Power Delivery 1998 - EMPD*, Singapore, IEEE, 1998.
- [13] D. Bösche, E.-D. Wilkening, H. Köpf und M. Kurrat, „Breaking performance investigations of hybrid DC circuit breakers: An experimental Approach,“ in *60th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, T. Schoepf, Hrsg., VDE Verlag, 2015.
- [14] A. Virdaq, N. A. Khan, R. W. DeDoncker und T. Hager, „Performance Analysis of Hybrid Circuit Breaker based on Counter-Current Injection Method for Low-Voltage DC Grids,“ *2019 IEEE Third International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, 2019.
- [15] K. Askan, M. Bartonek und K. Weichselbaum, „Power Module for Low Voltage DC Hybrid Circuit Breaker,“ in *2019 IEEE Third International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, Matsue, Japan, 2019.
- [16] Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen - TU-Braunschweig, 2012. [Online]. Available: https://www.tu-braunschweig.de/fileadmin/Redaktionsgruppen/Institute_Fakultaet_5/Energie/institut/Jahresbericht/Jahresbericht_2012.pdf. [Zugriff am 08 2023].
- [17] P. Meckler, F. Gerdinand, R. Weiss, U. Boeke und A. Mauder, „Hybrid switches in protective devices for low-voltage DC grids at commercial used buildings,“ *ICEC 2014; The 27th International Conference on Electrical Contacts*, 2014.
- [18] W. Hauer, M. Bartonek und H. Stammberger, „A Novel Low Voltage Grid Protection Component for Future Smart Grids,“ in *2016 51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 2016.
- [19] T. Ströhla, Vorlesungskript AT-Vorlesung, TU Ilmenau / Fak. Maschinenbau, 2012.

- [20] D. Gonzalez, R. Metling, S. Gortschakow, H. Koepf, P. Steegmueller und S. Holbe, „Investigation of the Plasma of a DC hybrid-switch model at beginning of contact separation,“ in *67th Holm Conference on Electrical Contacts*, 2022.
- [21] R. Methling, D. Gonzalez, S. Schmausser, M. Kellermann und A. Ehrhardt, „Investigation of Post Arc Radiating Behaviour of a Spark Gap for,“ in *International Conference on Electrical Contacts- ICEC*, 2021.
- [22] D. Gonzalez, R. Methling, H. Köpf, P. Steeegmueller, S. Holbe und S. Gortschakow, „Characterization of arc plasma during hybrid-switching using a DC-Hybrid model switch,“ in *Holm Conference in Electrical Contacts*, 2023.
- [23] A. Kramida, K. Olsen und Y. Ralchenko, „NIST LIBS Database“.
- [24] D. Bösche, P. Vieth und a. et, „Test Setup Design for Measuring the Conductance in the Mechanical Part of Hybrid-Circuit-Breakers Before and After Current Commutatio“. *IEEE TPCM*.
- [25] R. Methling, S. Schmausser, m. Kellermann, A. Ehrhardt, S. Gortschakow, D. Uhrlandt und D. Gonzalez, „Optical investigation of spark gap for DC protection around current zero,“ *Plasma Physics and Technology*,, September 2023.
- [26] S. Gortschakow, D. Gonzalez, R. Methling und D. Uhrlandt, „MODELLING OF SWITCHING ARCS AT SHORT ELECTRODE DISTANCES,“ in *International Conference on Gas Discharges and their Applications - GD*, 2023.
- [27] H. Köpf, P. Steegmüller, A. Labs, S. Holbe, A. Bernhard, X. Guo und F. Schilling, „Hybride Schaltkonzepte - Vor- und Nachteile,“ in *27 Albert Keil Kontaktseminar - AKK*, Schoepf, Hrsg., Karlsruhe, VDE VERLAG GMBH - Berlin - Offenbach, 2023.
- [28] A. Bernhardt, „Experimentelle Untersuchungen zum Schaltprozess bei hybriden LVDC-Schaltgeräten,“ in *27. Fachtagung Kontaktverhalten und Schalten Albert-Keil-Kontaktseminar*, Karlsruhe, 2023.
- [29] M. M. Becker und D. Loffhagen, „Enhanced reliability of drift-diffusion approximation for electrons in fluid models for nonthermal plasmas,“ *AIP Advances*, March 2013.

- [30] M. . M. Becker und D. Loffhagen, „Derivation of Moment Equations for the Theoretical Description of Electrons in Nonthermal Plasmas,“ *Adv. Pure Math.* Vol.3 No.3, , May 2013.
- [31] M. Baeva, *private Kommunikation*, Greifswald, 2022.
- [32] H. Drawin, Atomic Cross Sections for Inelastic Electronic Collisions,, Cadarache, France: Association Euratom-CEA. Rept.EUR-CEA-FC 236, 1963.
- [33] R. S. Freund, R. C. Wetzel, R. . J. Shul und T. R. Hayes, „Cross-section measurements for electron-impact ionization of atoms,“ *Phys. Rev. A* 41, pp. 35-75, April 1990.
- [34] D. Gupta, R. Naghma und B. Antony, „Electron impact total and ionization cross sections for Sr, Y, Ru, Pd, and Ag atoms,“ *Can. J. Phys.*, pp. 744-750, September 91.
- [35] Y. P. Raizer, *Gas Discharge Physics*,, Berlin, Heidelberg: Springer, 1991.
- [36] M. Panisch, *Journal of Chemical % Engineering Data* Vol. 6, pp. 592-594, 1961 .
- [37] J. Swingler und A. Sumpton, „rc erosion of AgSnO₂ electrical contacts at different stages of a break operation,“ *Rare metals* Vol. 29,, pp. 248-254, May 2010.
- [38] M. Hu und B. R. Kusse, „Experimental measurement of Ag vapor polarizability using optical interferometry and x-ray radiography,“ *Phys. Rev. A*, December 2002.
- [39] D. D. K. E. E. I. i. D. u. VDE, *DIN EN 62475 Hochstrom-Prüftechnik - Begriffe und Anforderungen für Hochstrom-Messungen*, 2010.
- [40] O. Binder, Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Verlustbestimmung an HGÜ-Mehrpunkt-Stromrichtermodulen - Dissertation Technische Universität Braunschweig, München: Dr. Hut Verlag, 2019.
- [41] G. Burkhard, *Schaltgeräte der Elektroenergietechnik - Grundlagen und technische Ausführung*, Berlin: VDE-Verlag Technik GmbH, 1985.
- [42] V. v. Döhlen, *Lichtbogenverhalten beim Ausschalten von Gleichströmen - Experimente und Simulation*, D-38106 Braunschweig: VDI Verlag GmbH Düsseldorf, 1998.

- [43] H. Köpf, J. Kaiser, S. Holbe, A. Gerngross und S. Dietz, „Schalten höherer Gleichspannungen bis 800 V in DC-Applikationen,“ in *27 Albert Keil Kontaktseminar - AKK*, Schoepf, Hrsg., Karlsruhe, VDE VERLAG GMBH - Berlin - Offenbach, September 2023.
- [44] B. Koetzold, „Rotierende Lichtbögen in gekreuzten elektrischen und magnetischen Feldern,“ *Elektrotechnische Zeitschrift - ETZ*, Bd. 90, Nr. H. 22, pp. 587-589, 1959.
- [45] M. Lindmayer, „Simulation of Switching Arcs Under Transverse Magnetic Fields for DC Interruption,“ *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE*, Bd. 44, Nr. 2, pp. 187-194, 2016.
- [46] H. Köpf, Schalten von Gleichströmen in automobilen HV-Bordnetzen bis 500 V, unter Berücksichtigung der Lichtbogenwanderung im Doppelkontakteinsystem, München: Dr. Hut , 2019.

A Anhang

A.1 Anhang 2. Ebene

Tabelle 2.24: Ergebnisse der Schutzrechtsrecherche

Dokumentennummer	Rechtsstand	Titel	Prioritätsdatum	Anmeldedatum	Inhaber
DE 102017122218 A1	Published	Niederspannungs-Schutzschaltgerät	26.09.2017	26.09.2017	Eaton Industries (Austria) GmbH
DE 102016121835 A1	Dead	Niederspannungs-Schutzschaltgerät	15.11.2016	15.11.2016	EATON INTELLIGENT POWER LIMITED, IE
DE 102016120070 A1	Published	Niederspannungs-Schutzschaltgerät	21.10.2016	21.10.2016	EATON INTELLIGENT POWER LIMITED, IE
EP 3242367 A1	Granted (alive)	GLEICHSTROMSCHUTZSCHALTER	29.12.2014	24.12.2015	HYOSUNG HEAVY INDUSTRIES CORPORATION
DE 102016117003 A1	Dead	Schutzschaltgerät	09.09.2016	09.09.2016	EATON INTELLIGENT POWER LIMITED, IE
EP 3041016 A1	Granted (alive)	GLEICHSTROMLEISTUNGSSCHALTER UND AUSSCHALTUNGSVERFAHREN DES GLEICHSTROMLEISTUNGSSCHALTERS	31.12.2014	08.12.2015	LSIS Co., Ltd.
DE 102017101452 A1	Dead	Niederspannungs-Schutzschaltgerät	25.01.2017	25.01.2017	EATON INTELLIGENT POWER LIMITED, IE
EP 3915127 A1	Granted (alive)	GLEICHSTROM-SCHUTZSCHALTGERÄT	21.01.2019	21.01.2019	Eaton Intelligent Power Limited
DE 102016120071 A1	Dead	Niederspannungs-Schutzschaltgerät	21.10.2016	21.10.2016	EATON INTELLIGENT POWER LIMITED, IE
DE 102017101451 A1	Published	Niederspannungs-Schutzschaltgerät	25.01.2017	25.01.2017	EATON INTELLIGENT POWER LIMITED, IE
EP 3475963 A1	Granted (alive)	HYBRIDER GLEICHSTROMSCHUTZSCHALTER	22.06.2016	16.06.2017	Eaton Intelligent Power Limited
DE 102018101677 A1	Dead	Niederspannungs-Schutzschaltgerät	25.01.2018	25.01.2018	Eaton Intelligent Power Limited

EP 3091626 A1	Granted (alive)	HOCHSPANNUNGS-GLEICHSTROMSCHUTZSCHALTER	30.12.2013	30.12.2014	HYOSUNG HEAVY INDUSTRIES CORPORATION
DE 102016123955 A1	Dead	Niederspannungs-Schutzschaltgerät	09.12.2016	09.12.2016	EATON INTELLIGENT POWER LIMITED, IE
DE 102016117004 A1	Published	Schutzschaltgerät	09.09.2016	09.09.2016	EATON INTELLIGENT POWER LIMITED, IE
DE 102016117005 A1	Dead	Schutzschaltgerät	09.09.2016	09.09.2016	EATON INTELLIGENT POWER LIMITED, IE
DE 10315982 A1	Dead	Hybrides elektromagnetische Gleichstromschütz	12.04.2002	08.04.2003	LG INDUSTRIAL SYSTEMS CO. LTD.
DE 102018101311 A1	Published	Elektrische Schutzschaltanordnung	22.01.2018	22.01.2018	Eaton Intelligent Power Limited
EP 3664116 A1	Granted (alive)	SCHUTZSCHALTER	07.12.2018	06.08.2019	Eaton Intelligent Power Limited
EP 3651175 A1	Granted (alive)	LEISTUNGSSCHALTER MIT VERRINGERTER ANFORDERUNG AN DIE DURCHBRUCHSPANNUNG	12.11.2018	06.08.2019	Eaton Intelligent Power Limited
DE 102016117006 A1	Dead	Schutzschaltgerät	09.09.2016	09.09.2016	EATON INTELLIGENT POWER LIMITED, IE
EP 3664117 A1	Published	HYBRIDER SCHUTZSCHALTER	07.12.2018	20.11.2019	Eaton Intelligent Power Limited
DE 102018108138 A1	Published	Niederspannungs-Schutzschaltgerät	06.04.2018	06.04.2018	Eaton Intelligent Power Limited
US 2014078623 A1	Granted (alive)	Two Terminal Arc Suppressor	12.03.2010	20.11.2013	ARC SUPPRESSION TECHNOLOGIES, LLC, MINNESOTA
DE 102020102399 A1	Published	SCHALTUNGSSCHUTZVORRICHTUNG UND - SYSTEM MIT STROM VERSORGUNGSWANDLUNG UND - STEUERUNG FÜR DC-LASTEN	31.01.2020	31.01.2020	Eaton Intelligent Power Limited
DE 502007003419 D1	Granted (alive)	Lasttrenner-Anordnung	12.10.2007	12.10.2007	SMA SOLAR TECHNOLOGY AG
DE 102011056577 B3	Granted (alive)	Schaltungsanordnung zur Unterdrückung eines bei einem Schaltvorgang auftretenden Lichtbogens	19.12.2011	19.12.2011	SMA SOLAR TECHNOLOGY AG
KR 20120081163 A	Granted (alive)	HYBRID RELAY	27.10.2009	26.10.2010	PANASONIC CORPORATION

DE 102014108657 A1	Dead	Schutzschaltgerät	20.06.2014	20.06.2014	EATON INDUSTRIES AUSTRIA GMBH
DE 112017006826 B4	Granted (alive)	Lichtbogenlöscheinrichtung für Gleichstromschalter	13.01.2017	20.10.2017	OMRON CORPORATION
EP 2904625 A1	Granted (alive)	GLEICHSPANNUNGSLEISTUNGSSCHALTER	07.12.2012	07.12.2012	SIEMENS ENERGY GLOBAL GMBH & CO. KG, DE
WO 2020253989 A1	Published	HYBRID CIRCUIT BREAKER ASSEMBLY	19.06.2019	12.06.2020	EATON INTELLIGENT POWER LIMITED
EP 2810290 A1	Granted (alive)	VORRICHTUNG ZUM SCHALTEN EINES GLEICHSTROMS IN EINEM POL EINES GLEICHSPANNUNGSNETZES	09.03.2012	09.03.2012	SIEMENS ENERGY GLOBAL GMBH & CO. KG; DE
EP 3469609 A1	Granted (alive)	HYBRIDER MCCB MIT ELEKTROMECHANISCHEN KONTAKTEN UND LEISTUNGSELEKTRONIKVORRICHTUNGEN	08.06.2016	05.05.2017	Eaton Intelligent Power Limited
EP 3550581 A1	Published (Positive tendency)	VERFAHREN UND VORRICHTUNG FÜR GLEICHSTROMLICHTBOGENDETEKTION/-UNTERDRÜCKUNG	06.04.2018	17.09.2018	Yazaki North America, Inc.
DE 3272270 D1	Dead	SOLID STATE ARC SUPPRESSION DEVICE	16.04.1981	16.04.1982	SQUARE D COMPANY
FR 2912545 A1	Granted (alive)	CONTACTEUR HYBRIDE CC HAUTE TENSION SANS RUPTEUR D'ARC CC	14.12.2006	12.12.2007	HAMILTON SUNDSTRAND CORPORATION
US 2003183838 A1	Dead	Solid-state DC circuit breaker	22.03.2002	19.03.2003	VIRGINIA POLYTECHNIC INSTITUTE & STATE UNIVERSITY,
CN 111900703 A	Granted (alive)	Hybrid DC circuit breaker	18.06.2020	18.06.2020	BEIJING PINGGAO QINGDA TECHNOLOGY DEVELOPMENT CO., LTD. ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE OF STATE GRID SHANDONG ELECTRIC POWER COMPANY PINGGAO GROUP CO., LTD. STATE GRID CORPORATION OF CHINA
US 2021367422 A1	Granted (alive)	DIRECT CURRENT HYBRID CIRCUIT BREAKER WITH REVERSE BIASED VOLTAGE SOURCE	24.10.2018	04.08.2021	THE FLORIDA STATE UNIVERSITY RESEARCH FOUNDATION, INC., FLORIDA
DE 102017127133 A1	Published	Hybride Schaltungsanordnung	17.11.2017	17.11.2017	Eaton Industries (Austria) GmbH

CN 209561272 U	Utility model	Hybrid DC circuit breaker	23.03.2019	23.03.2019	HENAN SENYUAN ELECTRIC CO., LTD.
US 2018082814 A1	Granted (alive)	Galvanically Isolated Hybrid Contactor	21.09.2016	21.09.2016	HSBC BANK USA, NATIONAL ASSOCIATION, AS AGENT, NEW YORK
DE 69408811 T2	Dead	Gleichstrom-Hochleistungsschalter	09.12.1993	06.12.1994	ASEA BROWN BOVERI AB, VÄSTERÅS, SE
CN 201549395 U	Dead	Mechanical electronic DC switch	16.09.2009	16.09.2009	SHENZHEN YINGSAIWEI TECHNOLOGY CO., LTD.
CN 110299700 A	Dead	Electromechanical hybrid DC circuit breaker and control method thereof	12.06.2019	12.06.2019	HARBIN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
DE 102018101312 A1	Published	Elektrische Schutzschaltungsanordnung	22.01.2018	22.01.2018	Eaton Intelligent Power Limited
CN 210957783 U	Utility model	Low-voltage hybrid DC circuit breaker	02.12.2019	02.12.2019	CHANGZHOU WUJIN HUALIAN ELECTRIC CONTROL DEVICE CO., LTD.
EP 2162897 A1	Granted (alive)	MIKROELEKTROMECHANISCHES SYSTEM AUF DER BASIS VON UMSCHALTUNG	15.06.2007	20.06.2007	GENERAL ELECTRIC COMPANY
CN 110993402 A	Dead	Bidirectional on-off hybrid DC circuit breaker	08.11.2019	08.11.2019	UNIVERSITY OF SCIENCE & TECHNOLOGY BEIJING
CN 112751313 A	Published	Hybrid DC circuit breaker	29.01.2021	29.01.2021	EATON ELECTRIC LIMITED
CN 111146760 A	Published	Hybrid DC circuit breaker and DC system on-off control method	04.03.2020	04.03.2020	SICHUAN ENERGY INTERNET RESEARCH INSTITUTE OF TSINGHUA UNIVERSITY TSINGHUA UNIVERSITY
CN 111404127 A	Dead	Natural commutation type hybrid DC circuit breaker and current turn-off method of DC system	10.03.2020	10.03.2020	TSINGHUA UNIVERSITY
KR 20170113836 A	Published	ARC PROTECTION CIRCUIT FOR DC POWER DISCONNECT	28.03.2016	28.03.2016	MRT CO., LTD.
DE 102017121788 A1	Dead	Hybrides Gleichstromschutzschaltgerät	20.09.2017	20.09.2017	Eaton Intelligent Power Limited
DE 102016106415 A1	Dead	Schaltvorrichtung zum Führen und Trennen von elektrischen Strömen	07.04.2016	07.04.2016	EATON INTELLIGENT POWER LIMITED, IE
DE 102016106414 A1	Dead	Schaltvorrichtung zum Führen und Trennen von elektrischen Strömen	07.04.2016	07.04.2016	EATON INTELLIGENT POWER LIMITED, IE

EP 2465129 A1	Granted (alive)	HYBRIDSCHUTZSCHALTER	13.08.2009	13.08.2009	ABB SCHWEIZ AG, CH
DE 102022111392 A1	Published	Hybridschutzschaltvorrichtung, Hybridschütz und Verfahren	06.05.2022	06.05.2022	ETO MAGNETIC GmbH
GB 2610866 A	Published	Low-voltage protective device	20.09.2021	20.09.2021	Eaton Intelligent Power Limited
GB 2615368 A	Published	Circuit breaker	08.02.2022	08.02.2022	Eaton Intelligent Power Limited
CN 111211543 A	Granted (alive)	Fusing type direct-current circuit breaker and control method thereof	19.01.2020	19.01.2020	JIANGSU ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE CO., LTD. SOUTHEAST UNIVERSITY STATE GRID CORPORATION OF CHINA STATE GRID JIANGSU ELECTRIC POWER CO., LTD. STATE GRID JIANGSU ELECTRIC POWER COMPANY RESEARCH INSTITUTE
CN 117060358 A	Published	Energy supply control circuit of hybrid direct-current circuit breaker, circuit breaker and electrical equipment	20.10.2023	20.10.2023	SHANDONG TAIKAI DC TECHNOLOGY CO., LTD. SHANDONG TAIKAI HIGH-VOLTAGE SWITCH CO., LTD.
DE 3717491 A1	Dead	ELEKTRONISCHER LEISTUNGSTRENNSCHALTER	16.06.1986	23.05.1987	GENERAL ELECTRIC CO.
US 2009168273 A1	Dead	HYBRID HIGH VOLTAGE DC CONTACTOR WITH ARC ENERGY DIVERSION	02.01.2008	02.01.2008	HONEYWELL INTERNATIONAL INC., NEW JERSEY
EP 3229252 A1	Dead	STROMSCHUTZSCHALTER	04.04.2016	14.12.2016	LSIS Co., Ltd.
DE 102018100974 A1	Granted (alive)	Schaltungsanordnung	17.01.2018	17.01.2018	Phoenix Contact GmbH & Co. KG
EP 3479448 A1	Granted (alive)	HALBLEITERABSCHALTVOORRICHTUNG	30.06.2016	29.06.2017	Mersen France SB SAS
EP 2801994 A1	Granted (alive)	Gleichstromschaltvorrichtung, elektronische Vorrichtung und Verfahren zum Schalten einer zugehörigen Gleichstromschaltung	07.05.2013	07.05.2013	ABB S.p.A.
EP 2559040 A1	Granted (alive)	ELEKTRISCHE SCHALTVOORRICHTUNG MIT ULTRASCHNELLEM	15.04.2010	15.04.2010	SCHNEIDER ELECTRIC INDUSTRIES SAS

		BETÄTIGUNGSMECHANISMUS UND HYBRIDSCHALTER MIT EINER DERARTIGEN VORRICHTUNG			
US 2014091808 A1	Dead	CONTACT SEPARATION DETECTOR AND METHODS THEREFOR	28.09.2012	27.09.2013	ARC SUPPRESSION TECHNOLOGIES, MINNESOTA
EP 3918676 A1	Published	GLEITKONTAKT- LICHTBOGENUNTERDRÜCKUNG	29.01.2019	29.01.2020	ARC SUPPRESSION TECHNOLOGIES
US 11411382 B1	Granted (alive)	Arc flash suppressor, system, and method	26.01.2022	06.04.2022	Arc Suppression Technologies