

Projektträger Jülich  
Energiesystem: Integration  
Intelligente Transport- und Verteilnetze (ESI6)  
Forschungszentrum Jülich GmbH  
z. H. Simon Müller  
52425 Jülich

Ihr Zeichen: 03EI6005E  
Ihre Nachricht vom:  
Mein Zeichen: 1B-23025  
Meine Nachricht vom:  
  
Bearbeitet von: Xiaofei Guo, Dr.-Ing  
Telefondurchwahl: +49 531 592 2323  
Telefaxdurchwahl:  
E-Mail: Xiaofei.guo@ptb.de  
  
Datum: 06.12.2023

## **Abschlussbericht gemäß Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98**

### **Projekt FASS – Fast and selective switching**

Dr. Xiaofei Guo Dr. Florian Schilling

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

Zuwendungsempfänger: Physikalisch-Technische  
Bundesanstalt  
Braunschweig und Berlin  
Arbeitsgruppe 2.35 " Netzintegration, erneuerbare  
Energien und Speicher"  
Bundesallee 100  
D-38116 Braunschweig  
Vorhabenbezeichnung: FASS  
Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2020 – 30.6.2023

Förderkennzeichen:  
03EI6005E

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## **Inhalt**

<b>1</b>	<b>Vorwort und Aufgabenstellung .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Wissenschaftlicher Stand der Technik vor Beginn des Projektes .....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Struktur des Vorhabens .....</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Ergebnisse des Vorhabens .....</b>	<b>11</b>
4.1	Ergebnisse aus AP 1 .....	11
4.2	Ergebnisse aus AP 2 .....	12
4.2.1	Definition der technischen Randbedingungen.....	12
4.2.2	Aufbau einer mobilen Stoßstromkalibriereinrichtung .....	12
4.2.3	Aufbau einer mobilen Kalibriereinrichtung für Spannungssprünge .....	17
4.2.4	Referenzspannungsteiler .....	20
4.2.5	Strommesseinrichtung .....	21
4.2.6	Beschaffung der Messeinrichtung .....	21
4.2.7	Charakterisierung der Messeinrichtungen.....	23
4.2.8	Spannungsmesseinrichtung.....	24
4.2.9	Beschaffung der Messeinrichtung .....	24
4.2.10	Charakterisierung der Messeinrichtungen.....	26
4.2.11	Bestimmung der Energie der kombinierten Gleich- und Impulsmesswerte.....	26
4.3	Ergebnisse aus AP 3 .....	28
4.4	Ergebnisse aus AP 5 .....	29
<b>5</b>	<b>Verwertungsplan.....</b>	<b>31</b>
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>33</b>

## **1 Vorwort und Aufgabenstellung**

Gleichstromnetze stellen eine sinnvolle Ergänzung der bestehenden Stromnetze dar, um die Versorgung mit Energie auch in Zukunft zuverlässig, effizient und wirtschaftlich zu gewährleisten. Damit der zunehmende Einsatz von Gleichstrom und die steigende dezentrale Erzeugung im Nieder- und Mittelspannungsbereich, z. B. in Form von Verteilungsnetzen oder Inselnetzen, möglich sind, wird ein Schutzsystem benötigt, welches einen sicheren Betrieb der Netze gewährleistet.

Der Schwerpunkt der PTB im Rahmen des Verbundprojektes „Fast and selective switching“ (FASS) liegt in der messtechnischen Bereitstellung und Weiterentwicklung von Messeinrichtungen für Prüfanlagen und Referenzmesseinrichtungen. Außerdem soll das Projekt Erkenntnisse und Erfahrungen für den Umgang mit Messungen bringen, welche im Zusammenhang mit Zukunftstechnologien wie erneuerbaren Energien und umrichter gespeisten Gleichstromnetzen stehen.

Mit Hilfe des Einsatzes intelligent geführter Magnetfeldsteuerung in mechanischen Schaltgeräten, werden Kontaktsysteme für den Einsatz in selektiv abgesicherten Gleichspannungssystemen entwickelt und erforscht. In diesem Entwicklungsprozess werden die Schaltzeiten gegenüber heute verfügbaren Geräten drastisch verringert. Vor dem Hintergrund leistungselektronikbasierter DC-Systeme ist eine geeignete Materialwahl eingesetzter Kontakte ebenfalls zu erforschen und zu untersuchen [1] und [2]. Diese optimierten Schaltgeräte können auch Grundlage für eine Entwicklung von schnellen Hybridschaltern sein.

Mit den angestrebten Untersuchungen soll der Normungsprozess getrieben von dem umfangreichen Industriekonsortium (Siemens AG, Doduco GmbH, Heraeus Holding GmbH, Rockwell Automation Switzerland GmbH) unterstützt werden.

## **2      Wissenschaftlicher Stand der Technik vor Beginn des Projektes**

Neue Erkenntnisse und Entwicklungen in Bezug auf Gleichstromsysteme, deren Anwendung und Schutz werden welt-weit vorangetrieben. Im Gegensatz zur Anwendung wird der Schutz von zukünftigen Gleichstromnetzen in keiner im Moment vorhandenen internationalen Norm behandelt.

Im Rahmen von Kooperationen und Forschungsprojekten beschäftigt sich die PTB seit einigen Jahren mit der Messtechnik für hohe Gleichspannungen und den technischen Anforderungen in leistungselektronikbasierten Systemen. Hierfür werden bis heute unterschiedliche anwendungsabhängige Herangehensweisen und Konzepte, wie von Schrank et. al. und Berger et. al. in [3] und [4] beschrieben, untersucht.

[5] zeigt im Forschungsprojekt SMS, zu welchen Herausforderungen die Gewährleistung der Selektivität in DC-Systemen führt. Die Einhaltung der Selektivität wird aufgrund der zulässigen Spannungsbänder in DC-Systemen zusätzlich erschwert. Der ungestörte Betrieb übergeordneter leistungselektronikbasierter Einspeisungen und verteilter Lasten darf im Fall des Auftretens elektrischer Fehler nicht eingeschränkt werden. Hierfür sind schnelle Reaktionen eingesetzter Schutzgeräte notwendig. Notwendige Ausschaltzeiten im Bereich einiger 100  $\mu$ s von Stromanstieg über Detektion, Auslösung und Unterbrechung des Fehlerstroms stellen technische Anforderungen dar, die mit klassischen elektromechanischen Schutzschaltgeräten derzeit nicht erfüllt werden können. Forschungsprojekte wie DCC+G, SMS, UPS oder DC-Industrie zeigen, dass herkömmliche Schutzschalter kommenden Anforderungen hinsichtlich einzuhaltender Selektivität nicht gewachsen sind.

Zusätzlich sind mechanische Schaltstrecken in Schutzschaltergeräten zur Gewährleistung galvanischer Trennung nach IEC 60 898 Teil 3 und UL 489 Teil H eine Notwendigkeit. Die Herausforderung des zukünftigen DC-Schalters besteht in der schnellen Öffnung der eingesetzten mechanischen Schaltstrecke und dem schnellen Bewegen des Lichtbogens aus dem Kontaktbereich in die Löschvorrichtung.

Bei den zu entwickelnden schnellen Schaltvorgängen in DC-Netzen überlagern sich DC-Anteile mit hohen Frequenzen. Aktuell wird in der IEC 60060 Teil 1 die Prüfung mit sogenannten „kombinierten oder zusammengesetzten Prüfspannungen“ beschrieben. Diese Messungen werden in Laboratorien mittels Universalspannungsteilern durchgeführt. Die Rückführung solcher Teiler wird mit Hilfe getrennter Kalibrierungen in den Bereichen HVAC, HVDC und HV-Impuls realisiert. Jedoch fehlt momentan der metrologische Nachweis der Fähigkeit dieser Spannungsteiler „kombinierte oder zusammengesetzte

Spannungsformen“ korrekt herunterzuteilen. Die Rückführung von Sensoren für diese Spannungsformen muss noch entwickelt werden.

Die im Hinblick auf die Inhalte des geplanten Verbundprojektes durchgeführte Patentrecherche ergab, dass gegenwärtig keine Schutzrechte und Schutzrechtanmeldungen existieren, die einer späteren Ergebnisverwertung entgegenstehen. Im Verlauf des Projektes entstehende Erfindungen und Schutzrechte werden über einen Kooperationsvertrag geregelt.

### **3 Struktur des Vorhabens**

#### **AP. 1 Literatur- und Patentstudium**

Zu Beginn des Projektes wird eine intensive Auseinandersetzung mit vertiefenden Veröffentlichungen, Normen und Patenten stattfinden. Das wesentliche Ziel des Arbeitspaketes ist die Erstellung einer Datenbank, welche im Laufe des Projektes aktuell gehalten wird. Die Bearbeitung des Arbeitspaketes erfolgt durch alle Projektbeteiligten. Die PTB fokussiert sich auf das Themengebiet der Messtechnik. Die Recherche beinhaltet die Beschaffung von Büchern, Veröffentlichungen, allgemeiner Literatur und Normen und Patente.

#### **AP. 2 DC-Bögen im Magnetfeld**

##### **AP. 2.2 Aufbau eines DC-Prüffeldes**

Im Laufe des Forschungsprojekts KEKI zeigte sich, dass der Aufbau eines unabhängigen Prüfstandes für die Umsetzung und Untersuchung eines zu entwickelnden Schaltgerätes eine erhebliche Vereinfachung, Verbesserung und Beschleunigung des Entwicklungsprozesses darstellt. Aus diesem Grund werden in AP. 2.2 Prüffelder innerhalb der Laboratorien des EGA und E-T-A aufgebaut. Das EGA betreibt ihren Prüfstand parallel zu den Arbeitspaketen AP. 3 und AP 5. Die Firma E-T-A nutzt ihren Prüfstand für das Arbeitspaket AP. 5. Um den Aufbau eines Prüfstandes zur effektiven Umsetzung und Untersuchung des Geschwindigkeitsgewinns beim Schalten beeinflusst durch externe Magnetfelder gewährleisten zu können, ist im Vorfeld in AP 2.2.1 „Erstellung eines Pflichtenheftes für ein DC-Prüffeld bis 850 V“ die Erstellung eines Pflichtenheftes nötig. Das EGA greift hierbei auf Untersuchungen aus dem Projekt KEKI zurück und muss diese speziell auf 850 V DC anpassen und erweitern. Die Erstellung des Pflichtenheftes muss äußerst umfangreich umgesetzt werden, da hierauf das spätere Prüffeld und die Messtechnik aufgebaut wird. Aus diesem Grund stehen dem EGA zusätzlich die Projektpartner E-T-A, PTB und das WET unterstützend zur Seite. Die zu erstellende Messtechnik muss so geplant werden, dass diese in beiden Prüfanlagen eingesetzt werden kann.

##### **AP. 2.5 Aufbau der Messtechnik für Prüfanlage**

Im AP. 2.5 werden die grundlegenden Komponenten der elektrischen und optischen Messtechnik entwickelt und in den jeweiligen Prüfanlagen integriert. Im AP. 2.5.1 „Erstellung eines Messkonzept-Lastenheftes“ wird der Ist-Zustand durch die PTB bei den Prüfanlagen im EGA und der E-T-A festgestellt und notwendige messtechnische Maßnahmen festgelegt. In AP. 2.5.2 „Ausrüstung der Aufbauten mit notwendiger Mess-

und Überwachungstechnik“ wird bei den Partnern beim Aufbau der Mess- und Sicherheitstechnik unterstützt. Um die in AP. 2.5.5 aufgebauten Messsysteme charakterisieren zu können, werden an der PTB Kalibriereinrichtungen für DC und Transienten in AP. 2.5.6 „Erstellen einer Kalibriereinrichtung für transiente Hochströme“ und AP. 2.5.7 „Erstellen einer Kalibriereinrichtung für transiente Überspannungen“ aufgebaut und rückgeführt.

In AP. 2.5.6 wird eine transportable Kalibriereinrichtungen für transiente Hochströme entwickelt. Das Ziel ist es die Messeinrichtungen der Projektpartner vor Ort zu charakterisieren, damit in beiden Laboratorien mittels der Rückführung vergleichbare Fähigkeiten vorhanden sind. Diese finden wiederum Anwendung in AP. 3 und AP. 5. Die maximale Stromstärke der überlagerten Gleich- und Impulsströme wird in AP. 2.5.1 definiert, kann aber bis zu einem Kiloampere betragen. Diese transportable Kalibriereinrichtung soll aus einem Gleichstromkreis und einem Impulsstromkreis bestehen. Diese Kreise benötigen jeweils eine Stromquelle. Im Falle des Impulsstromkreises wird eine neuartige Erzeugung mit einstellbarer Stirnzeit von 1  $\mu$ s bis zu 10  $\mu$ s und Rückenhalbwertszeit bis zu 20  $\mu$ s entwickelt und aufgebaut. Die rückgeführte Referenzmesseinrichtung der PTB wird dazu verwendet, die Messeinrichtungen der Laboratorien von E-T-A und EGA zu qualifizieren.

In AP. 2.5.7 wird eine transportable Kalibriereinrichtung für transiente Überspannungen erstellt. Wie oben bereits beschrieben sind Rückführungen bei Kombinationen aus Gleich- und Impulsspannungen nicht verfügbar. Aus diesem Grund soll ein Kalibrator für kombinierte Spannungen aus Gleichspannung und Blitzstoßspannung entwickelt und aufgebaut werden. Die maximale Amplitude der zusammengesetzten Spannung wird in AP. 2.5.1 definiert, kann aber bis zu 5 kV betragen. Die Grenzfrequenz soll bei maximal 100 kHz liegen und kann mittels Standardimpulsen (1,2/50  $\mu$ s mit  $\pm 30\%$  Variation der Stirnzeit) realisiert werden. Zusammen mit den PTB-Referenzspannungsteilern wird dieser transportable Kalibrator in den Laboratorien der Projektpartner E-T-A und EGA für die Qualifizierung der dortigen Messeinrichtungen verwendet.

Die Bestimmung der Energie der kombinierten Gleich- und Impulsmesswerte soll als Werkzeug für die Ermittlung der Belastung von Kontaktwerkstoffen dienen. Die Berechnung der transienten Leistung kann durch Multiplikation der Strom- und Spannungswerte erfolgen. Jedoch wirken sich aufgrund der Geschwindigkeit der Messgrößen kleinste zeitliche Abweichungen dieser zueinander gravierend aus. Wie in Abbildung 1 dargestellt, bedingt eine Verschiebung der Spannungs- oder Stromkurve um nur 300 ns aufgrund einer Messabweichung eine Verfälschung des Ergebnisses für die umgesetzte Energie um ca. Faktor drei. Es ist deshalb essentiell die Phase der Sensoren sowie die zeitliche Abweichung der Kanäle des Digitizers zu kennen. In AP. 2.5.8

„Entwicklung neuer Messverfahren für transiente Energien“ wird ein bereits entwickeltes Messverfahren für transiente Energien an die hier vorhandenen Amplituden und Geschwindigkeiten angepasst.

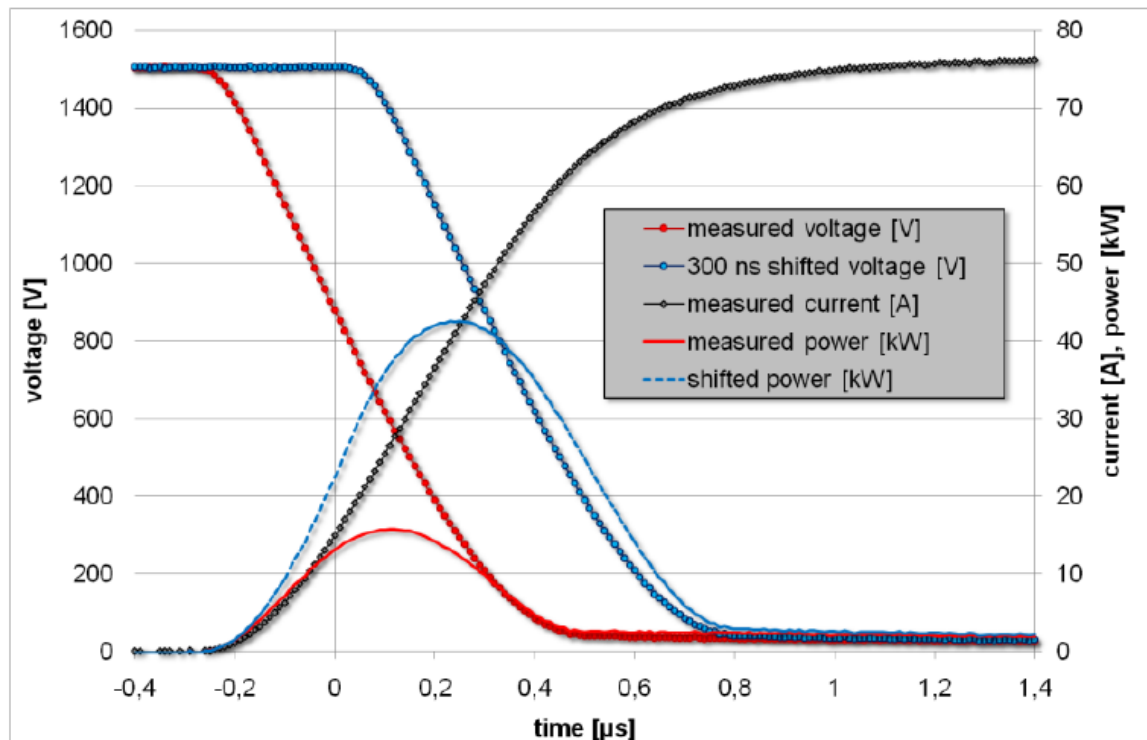


Abbildung 3-1 Strom-, Spannungs- und Leistungsverläufe bei transienten Vorgängen [6]

In AP. 2.5.9 „Inbetriebnahme der messtechnischen Systeme“ werden die messtechnischen Systeme an der PTB in Betrieb genommen. Anschließend werden die messtechnischen Systeme in AP. 2.5.10 „Durchführung verifizierender Untersuchungen“ in rückgeführten Messungen verifiziert. Hierbei werden der Strom- und der Spannungspfad separat in einer synthetischen Weise gleichzeitig bedient. Die Sensoren und der Digitizer werden dabei verwendet, um neben den kombinierten DC-Impulsvorgängen auch die Scheinleistung zu messen. Die Messtechnik wird im Modellschaltssystem in AP. 2.5.11 „Integration und Inbetriebnahme der Messtechnik im Modellschaltssystem“ integriert und in Betrieb genommen. Der Bericht über den gesamten Aufbau der Messtechnik für die Prüfanlagen wird in AP. 2.5.12 „Bericht“ von allen Projektpartnern verfasst.

### **AP. 3 Einfluss des Magnetfelds auf Ausschaltvorgänge (Prüfungen, Materialanalytik, Statistik)**

Im AP. 3 werden sowohl wichtige Vorarbeiten zu den Messkampagnen fertiggestellt als auch die Materialanalytik begleitend zu den Messkampagnen durchgeführt. Die



Vorarbeiten beinhalten ein Konzept zur statistischen Auswertung der Vielzahl von Messergebnissen. Diese müssen aus den Ergebnissen der Materialanalytik, den elektrischen und magnetischen Ergebnissen zu Kennfeldern statistisch gesichert zusammengeführt werden.

#### AP. 3.1 Versuchsplanung AP. 3

Zu Beginn des Arbeitspakets AP 3.1 „Versuchsplanung AP. 3“ sind basierend auf AP. 1 und den Anforderungen aus dem Industriekonsortium Materialien und Messkampagnen festzulegen, um zielführend die Entwicklung eines schnellen Schaltgerätes in AP. 5 zu ermöglichen. Anforderungen sind beispielsweise Spannungsebenen, Leistung, Bidirektionalität oder Kurzschlussfestigkeit des Schaltgerätes. Aufbauend auf dem Anforderungsprofil werden geeignete Materialkombinationen und Magnetfeldausrichtungen recherchiert und einer Bewertung unterzogen. In die Bewertung gehen neben der Erfüllbarkeit der Anforderungen auch solche Kriterien wie Verfügbarkeit und Kostenoptimierung ein. Hieraus wird ein Messprogramm erstellt, welches im Lastenheft detailliert beschrieben wird.

### **AP. 5. Schaltgerät mit erhöhter Nennspannung und schneller Bogenlöschung durch Magnetfeldbeeinflussung**

Dieses Arbeitspaket untersucht die Möglichkeit eines Schaltgeschwindigkeitsgewinns bei mechanischen Schutzschaltern durch magnetische Fremdfelder, eine geschickte Materialauswahl (Kammerwände und Kontakte) und konstruktive Maßnahmen.

#### AP. 5.2 Erstellung eines Pflichtenheftes des Schaltgerätes

Das mechanische Schaltgerät besteht im Wesentlichen aus den zwei Komponenten Schaltschloss mit Kontaktwerkstoffen und dem Löschesystem. Es erfolgt im AP 5.2.1 „Erstellung eines Pflichtenheftes des Schaltgerätes“ die Festlegung auf ein Pflichtenheft für den mechanischen Schalter. In diesem Pflichtenheft werden die Anforderungen an den Schalter festgelegt, welcher im Rahmen dieses Projektes entwickelt werden soll. Die PTB steht in diesem Teilarbeitspaket beratend zur Verfügung und konkretisiert bei Bedarf die Methodik der metrologischen Erfassung oder Bestimmung der festgelegten Größen oder Eigenschaften.

#### AP. 5.3 Inbetriebnahme der experimentellen Versuchsaufbauten

In AP. 5.3.5 „Ausrüstung der Aufbauten mit der elektrischen Messtechnik aus AP. 2.5“ werden die Strom- und Spannungsmesstechnik, welche für den Modellschalter des EGA in Zusammenarbeit mit der PTB entwickelt wurden, auf die E-T-A Prüfanlage (AP. 5.3.6 „Neuentwicklung und Anpassung von Strom- und Spannungsmesstechnik für schnellste

Transienten“) adaptiert. In AP. 5.3.7 „Inbetriebnahme der messtechnischen Systeme“ werden die Referenz-Messeinrichtungen angepasst. Hierfür werden durch die PTB-Mitarbeiter Kalibriermessungen für transiente Hochströme und transiente Überspannungen im Prüflabor der E-T-A durchgeführt.

## **4 Ergebnisse des Vorhabens**

### **4.1 Ergebnisse aus AP 1**

In dem Arbeitspaket wurde von der PTB eine Literaturrecherche zu den am Markt verfügbaren Strom- und Spannungswandlern sowie den möglichen Aufzeichnungsgeräten durchgeführt. Weiterhin wurden Konstruktionsmöglichkeiten für Breitbandige Spannungsteiler ermittelt und als Grundlage für die entwickelten Messkonzepte herangezogen. Anhand der Normen IEC 60060 und IEC 62475 erfolgte die Kalibrierung der Sensoren und die Entwicklung der Prüftechnik für Spannung und Strom.

## **4.2 Ergebnisse aus AP 2**

### **4.2.1 Definition der technischen Randbedingungen**

Am 9. April 2020 wurden die Mess- und Prüfeinrichtungen durch die PTB bei den Partnern EGA und der E-T-A untersucht und deren aktuelle Leistungsfähigkeit festgestellt und dokumentiert. Die dort eingesetzte Messtechnik erfüllt in vielen Punkten die Anforderung zur Durchführung der geplanten Messaufgaben.

#### **Stromsensoren**

Für die Strommessung wurden ursprünglich zwei Nullflusswandler für Ströme bis 5 kA geplant. Im weiteren Projektverlauf wurde jedoch festgestellt, dass es sinnvoller ist, wenn zwei 200 A und zwei 1 kA Nullflusswandler beschafft werden. Durch den Einsatz dieser Sensorik kommt es zwar zu einer Verringerung des erfassbaren Spitzenstroms, jedoch wird die Auflösung in den interessanten Strombereichen signifikant gesteigert. Zur messtechnischen Erfassung von Strömen über 1 kA werden separat von den Partnern

E.T.A und E.G.A 5 kA und 10 kA Stromsensoren beschafft. Alle Sensoren sollen eine Mindestbandbreite von 200 kHz besitzen.

#### **Spannungssensoren**

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

### **4.2.2 Aufbau einer mobilen Stoßstromkalibriereinrichtung**

Eine transportable Kalibriereinrichtung für transiente Hochströme wurde in dem Projekt entwickelt. Diese transportable Kalibriereinrichtung besteht wie in der Abbildung 4-1 und in Abbildung 4-2 dargestellt aus einem Gleichstromkreis und einem Impulsstromkreis. Als Gleichstromquelle wird ein bereits vorhandenes Gerät eingesetzt. Diese kann einen Gleichstrom von 1000 A mit einer Temperaturstabilität von 10 ppm bereitstellen und erfüllt damit die Anforderungen, die in dem Projekt an die Stromquelle gestellt werden. Der DC-Referenzsensor ist ein in der PTB kalibrierter LEM-Stromsensor vom Type ITZ 2000. Der

Pearson Sensor welcher zur Impulsstrommessung eingesetzt wird stammt von der Firma Pearson und ist vom Typ 110

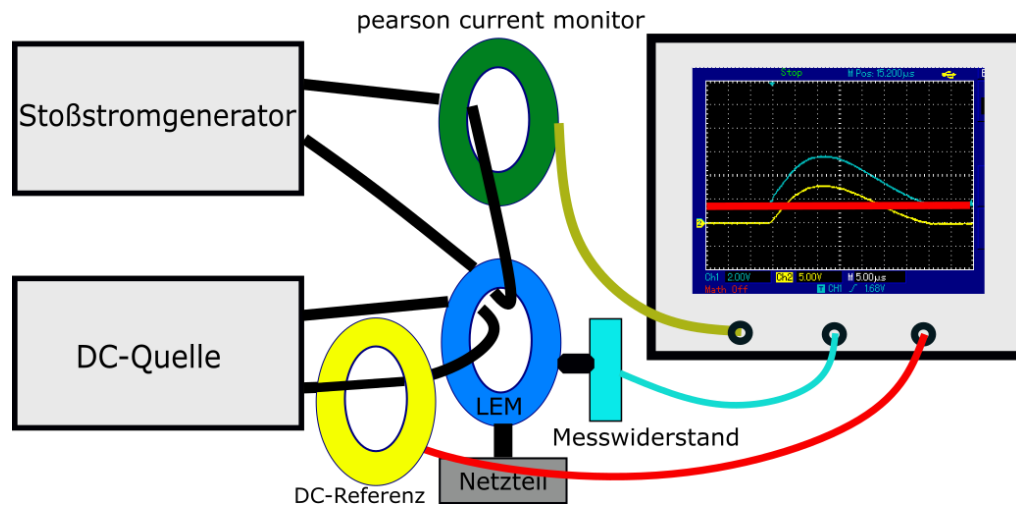


Abbildung 4-1 Blockschaltbild der transportablen Kalibriereinrichtungen für transiente Hochströme

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

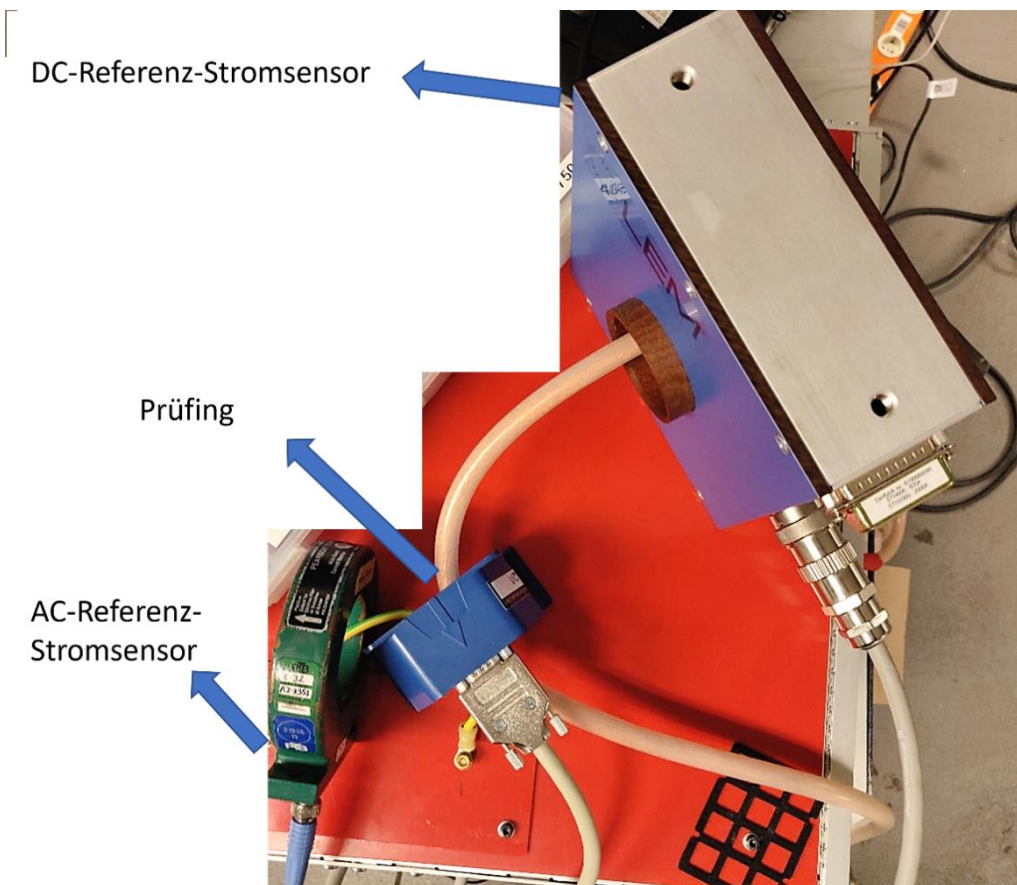


Abbildung 4-2 der transportablen Kalibriereinrichtungen für transiente Hochströme

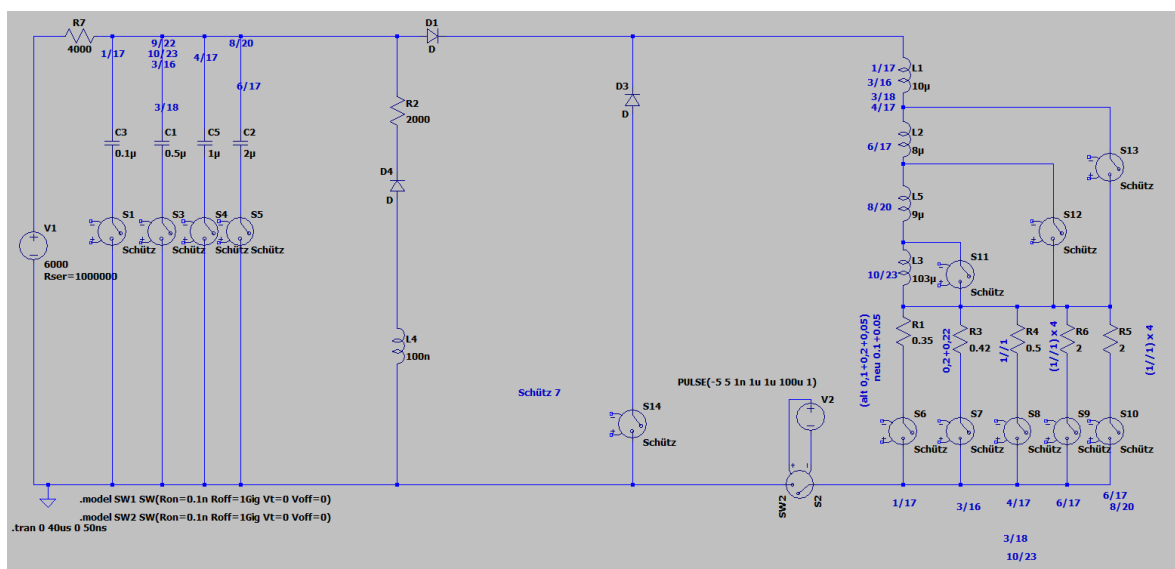


Abbildung 4-3 Schaltplan des Stoßstromgenerators.

Der aufgebaute Stoßstromgenerator ist in der Abbildung 4-4 dargestellt. Mit der Tastatur wird die Sollspannung eingestellt. Auf dem Bildschirm wird der aktuelle Status des Stoßstromgenerators angezeigt. Die Zeitparameter werden mit dem Drehschalter eingestellt.

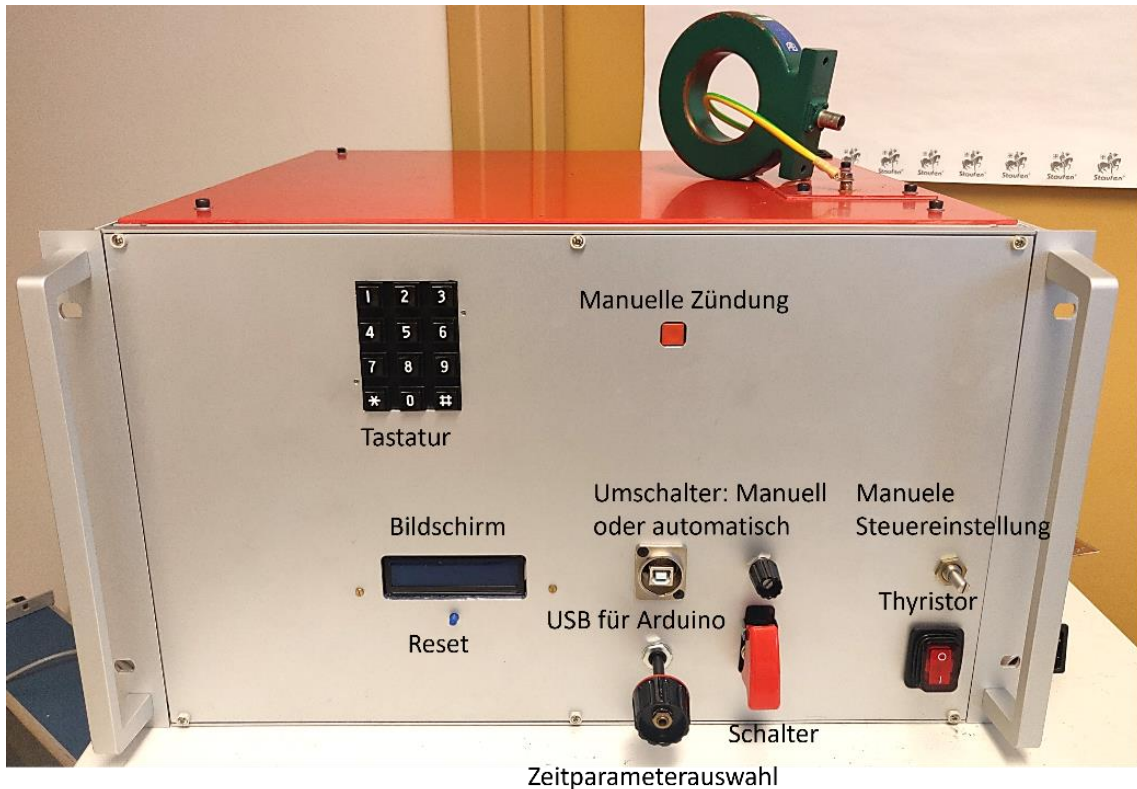


Abbildung 4-4 Foto des Stoßstromgenerators

Für die Charakterisierung der Strommessenrichtung wurde ein LabVIEW-Programm in der PTB erstellt. Der Kurvenverlauf der erzeugten Impulsströme wird dabei mit einem Digitizer aufgenommen und mit der PTB-Software ausgewertet. In der Abbildung 4-5 ist die Benutzeroberfläche dargestellt. Diese ermöglicht dem Benutzer die Verbindung zu dem Digitizer herzustellen und die Messparameter einzustellen. Dies sind beispielsweise die Messbereiche der beiden Kanäle und die Sample-Rate.

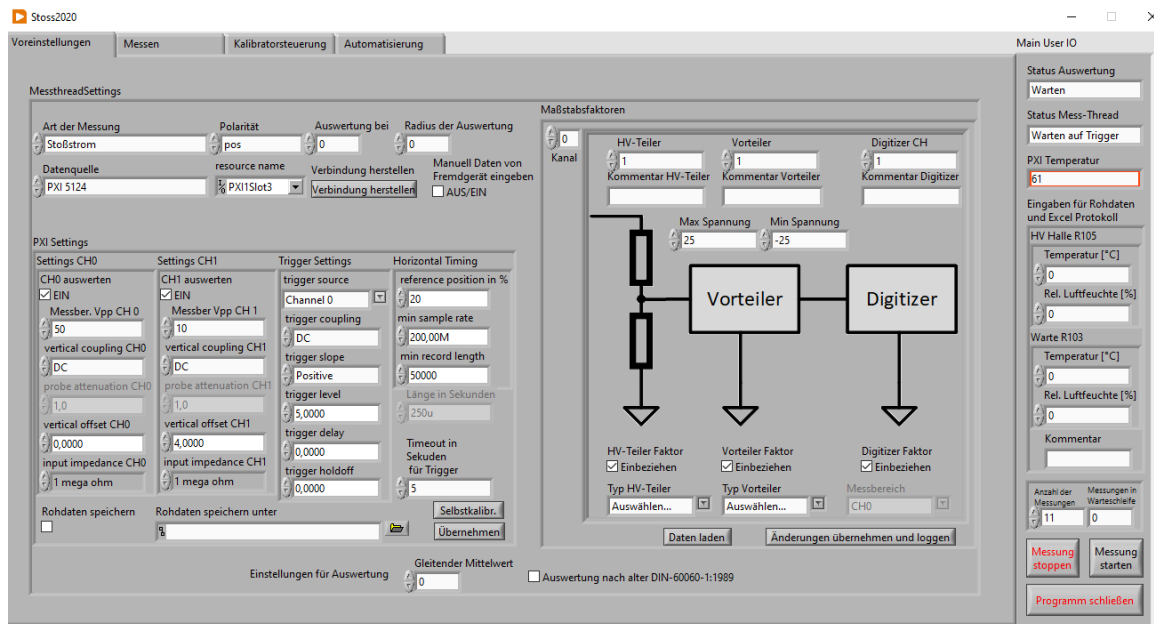


Abbildung 4-5 Voreinstellung der Auswertungssoftware für Stoßstrommessung

Die aufgenommenen Messkurven und die gemessenen Zeit- und Spannungsparameter werden automatisch auf der Programmoberfläche dargestellt. (Abbildung 4-6) Sie können bei Bedarf in einer Excel-Datei gespeichert werden. Weil im Rahmen des Projektes die Stromsensoren mit überlagerte Stromverläufen charakterisiert werden, wird der DC-Anteil unter den Namen Sprungdifferenz gesondert auf der Programoberfläche ausgewertet und ausgegeben.



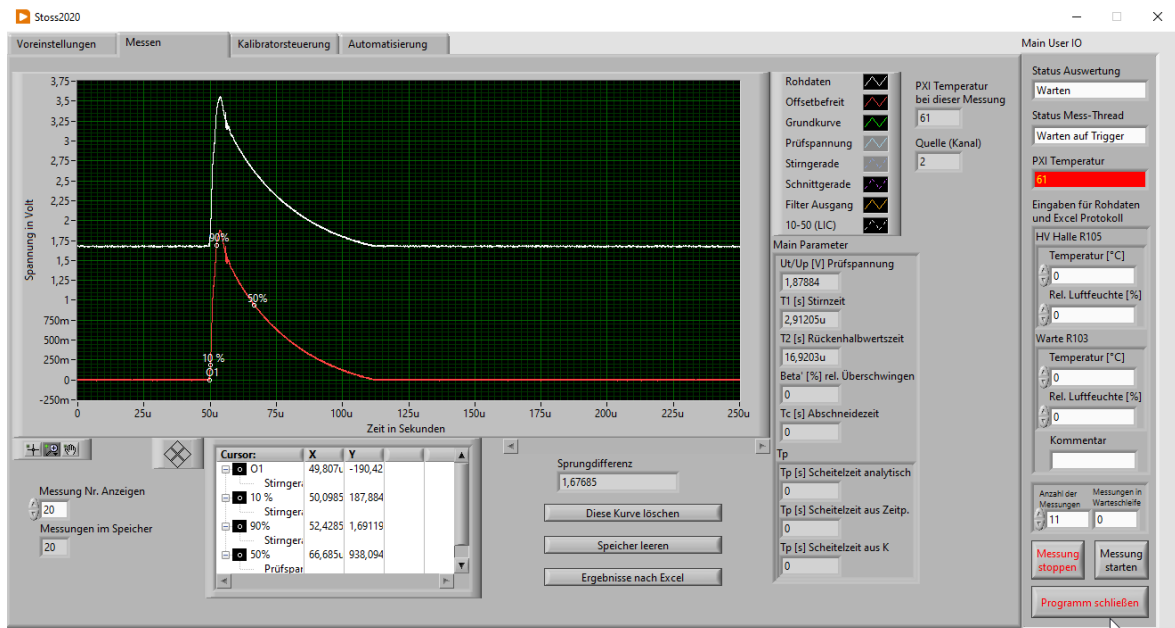


Abbildung 4-6 Darstellung des Messergebnisses. Die weiße Kurve stellt einen von einem Stromsensor aufgenommenem Stromverlauf dar. Die rote Kurve ist der Stromverlauf ohne den überlagerten Gleichstromanteil.

### 4.2.3 Aufbau einer mobilen Kalibriereinrichtung für Spannungssprünge

Eine transportable Kalibriereinrichtung für transiente Überspannungen wurde in dem Projekt entwickelt und aufgebaut. Der Kalibrator für kombinierte Spannungen aus Gleichspannung und Blitzstoßspannung (LI) kann vereinfacht mit dem in Abbildung 4-7 dargestellten Blockschaltbild beschrieben werden. Die Blitzstoßspannung wird mit dem bereits vorhandenen Gerät Typ 481 von der Firma Haefely erzeugt. Die Gleichspannung wird von einer in der PTB entwickelten DC-Quelle generiert. Die Gleichspannung und die Blitzstoßspannung werden mit Hilfe von Kopplungselementen (Widerstand und Kondensator) überlagert.

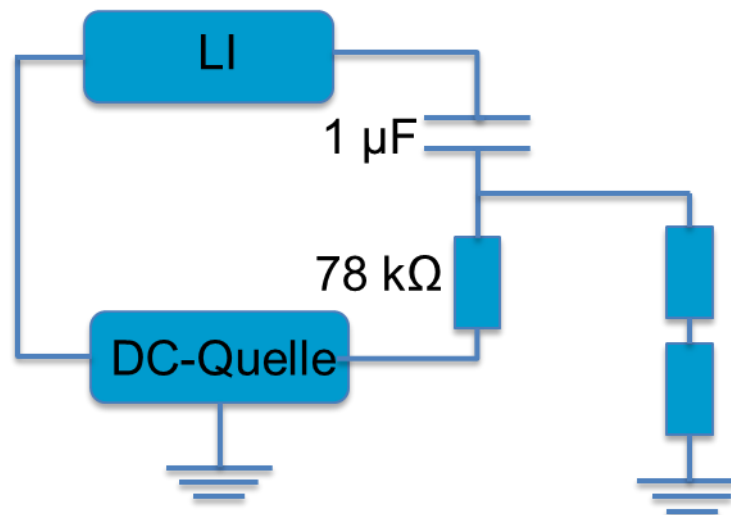


Abbildung 4-7 Blockschaltbild der mobilen Kalibriereinrichtung für Spannungssprünge

In Abbildung 4-8 ist die mobile Kalibriereinrichtung für Spannungssprünge dargestellt. Mit der Tastatur wird die Amplitude der Gleichspannung eingestellt und auf dem Bildschirm der aktuelle Gerätestatus dargestellt. Mit dem Umschalter kann das Gerät zwischen manueller und automatischer Spannungseinstellung umgeschaltet werden. Die automatische Spannungseinstellung wird von einem Arduino UNO gesteuert. Über die USB-Buchse kann die Software des Arduino aktualisiert oder zusätzliche Informationen ausgegeben werden.

Die notwendigen Kopplungselemente sind in der Gleichspannungsquelle integriert worden. Die Gleichspannungsquelle wird zur Erzeugung von Überlagerten Signalformen mit dem Haefely Impulsgenerator Typ 481 verbunden. Mit der Gleichspannungsquelle kann eine DC-Spannung von bis zu 5 kV erzeugt werden und der Impulsgenerator kann Spannungssprünge bis 500 V erzeugen. Die resultierende überlagerte Amplitude des zusammengesetzten Spannungsverlaufs beträgt dementsprechend maximal 5,5 kV.

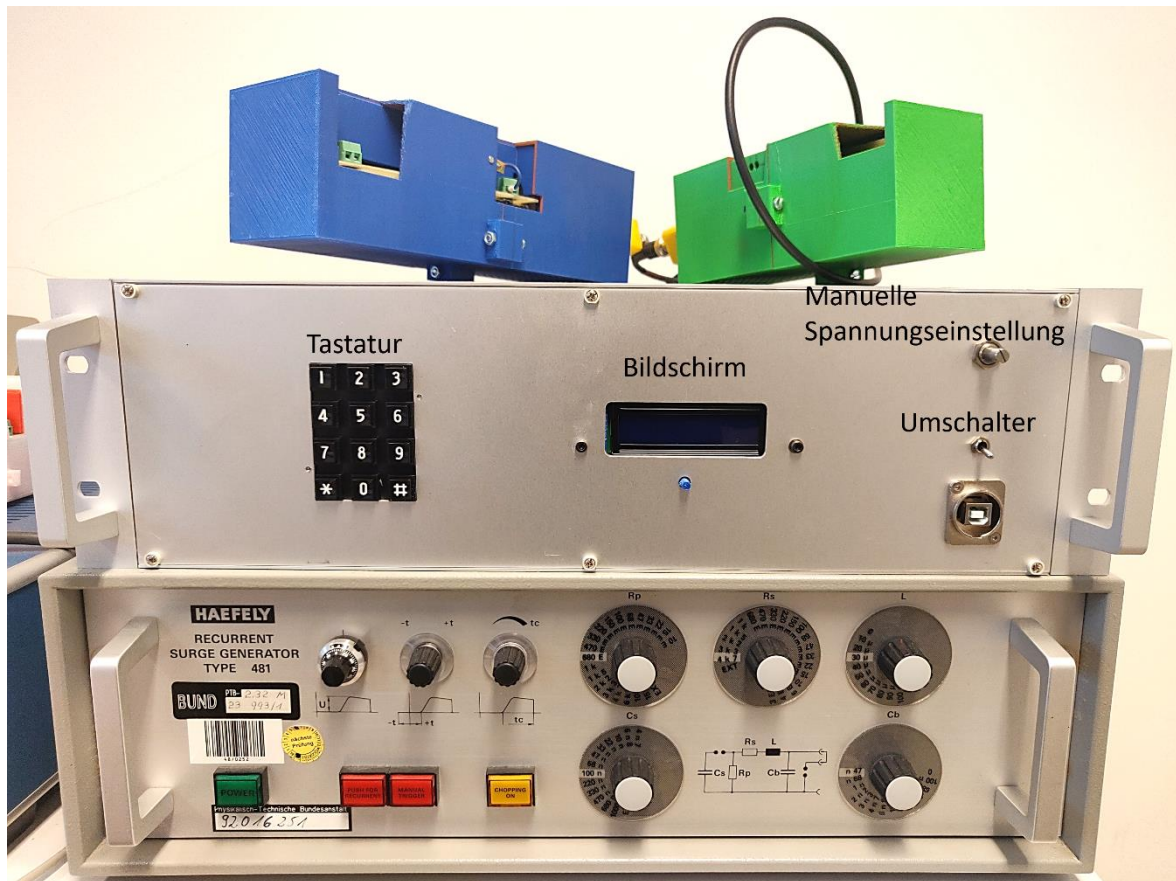


Abbildung 4-8 mobile Kalibriereinrichtung für Spannungssprünge

Das dynamische Verhalten eines Spannungsteilers kann mit einer Sprungantwort abgeglichen werden. Der Messkreis ist in der Abbildung 4-9 dargestellt. Der Sprunggenerator besteht aus einer DC-Quelle und einem Quecksilber-Relais, welches von einem Funktionsgenerator angesteuert ist. Durch das periodische Kurzschließen des Signalausgangs wird eine nahezu ideale fallende Flanke erzeugt. Die Verwendung von Quecksilberbenetzten Kontakten verhindert bei dem Schaltvorgang ein Prellen dieser und sorgt damit für einen sauberen Signalverlauf.

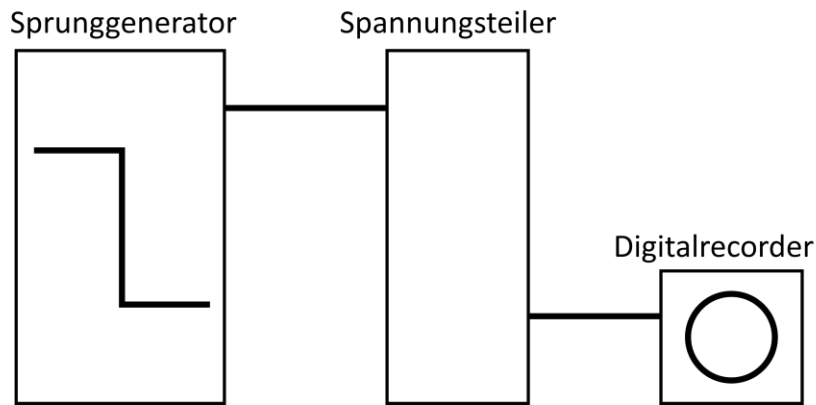


Abbildung 4-9 Messanordnung zur Aufzeichnung der Sprungantwort

#### 4.2.4 Referenzspannungsteiler

Für die Kalibriereinrichtung, mit Hilfe von Spannungssprüngen, ist ein Referenzspannungsteiler aufgebaut worden. In der Abbildung 4-10 sind die Parameter des Spannungsteilers dargestellt. Der Spannungsteiler besitzt drei separate Zeitkonstanten (4,7 ns, 200  $\mu$ s und 3,9 ms). Dadurch ist es möglich, die Sprungantwort des Spannungsteilers gut einzustellen. Der theoretische Maßstabsfaktor von dem Referenzspannungsteiler beträgt 101.

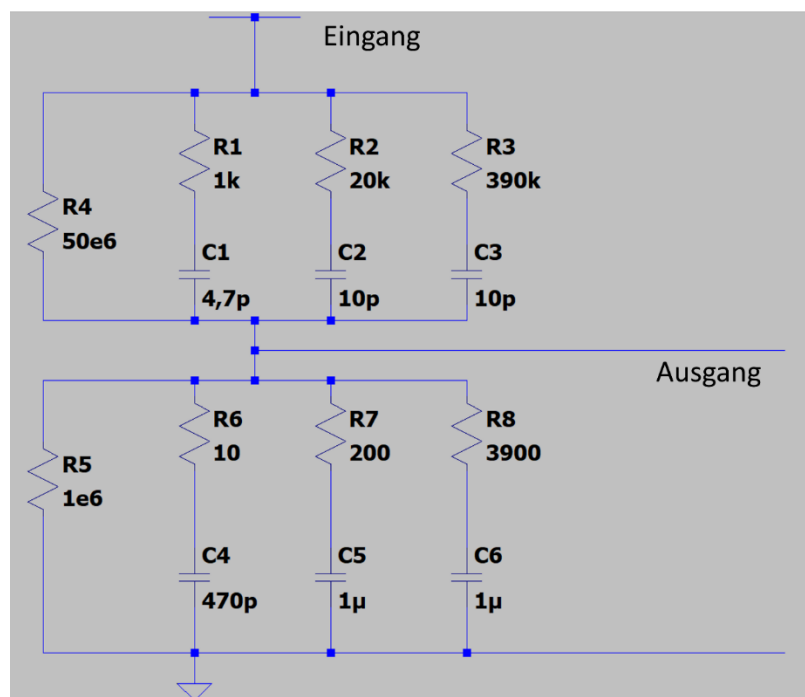
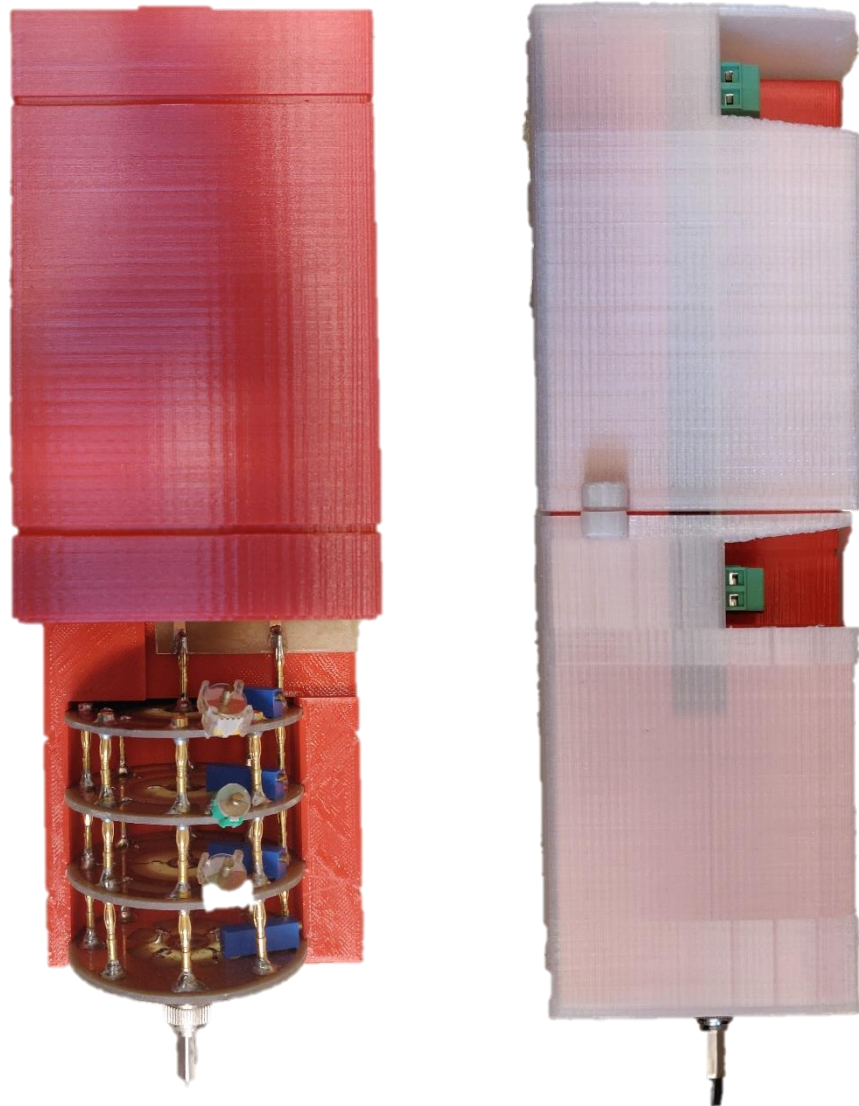


Abbildung 4-10 Schaltbild des Referenzspannungsteilers. Jeder Widerstand bzw. Kondensator in dem Hochspannungsteil besteht aus der Reihenschaltung von 10 gleichen Bauteilen. Die Widerstands- und Kapazitätswerte sind im Niederspannungsteil mit Hilfe von Trimmern einstellbar.

Das Gehäuse des Spannungsteilers wurde im 3D-Druckverfahren hergestellt. Der fertige Spannungsteilerprototyp mit Gehäuse ist in der Abbildung 4-11 dargestellt.



*Abbildung 4-11 Referenzspannungsteiler mit Gehäuse*

## **4.2.5 Strommesseinrichtung**

### **4.2.6 Beschaffung der Messeinrichtung**

Für E-T-A und EGA wurden jeweils zwei Nullflusswandler für die Strommessung mit folgenden Parametern beschafft.

*Tabelle 4-1 Parameter der Nullflusswandler*

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

Für die Nullflusswandler IT 205-s wurden als Bürdenwiderstände Metallfolienwiderstände mit 100 Ohm und einem Temperaturkoeffizienten von  $\pm 1$  ppm/°C verwendet.

Für die Nullflusswandler IN 1000-s wurden als Bürdenwiderstände Metallfolienwiderstände mit 10 Ohm mit einem Temperaturkoeffizienten von  $\pm 2$  ppm/°C verwendet.

Um die gewünschte Spannung beim maximalen Strom zu erreichen und die Leistung pro Widerstand für präzise Messungen klein zu halten wurden mehrere Widerstände zusammengeschaltet. Dies führt dazu, dass die Erwärmung und damit verbundene Änderung des Widerstandswertes pro Widerstand minimiert wird und auch die Gesamtänderung des Widerstandswertes deutlich kleiner ausfällt.

*Tabelle 4-2 Messwiderstände für die Stromsensoren*

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

In der folgenden Abbildung ist der Aufbau zum Betrieb der Nullflusswandler dargestellt. Der blaue Nullflusswandler IN 1000-s wird von der Spannungsquelle, welche in dem weißen Gehäuse enthalten ist, versorgt. In dem gelben Gehäuse befinden sich die für den betrieb notwendigen Bürdenwiderstände. Der zu messende Strom wird von dem Nullflusswandler in einen kleinen Messstrom umgewandelt, welcher an den Bürdenwiderständen einen Spannungsfall verursacht. Diese Spannung wird über die BNC-Buchse ausgegeben und dort mit üblicher Spannungsmesstechnik erfasst und durch A/D Wandlern digitalisiert und weiterverarbeitet.



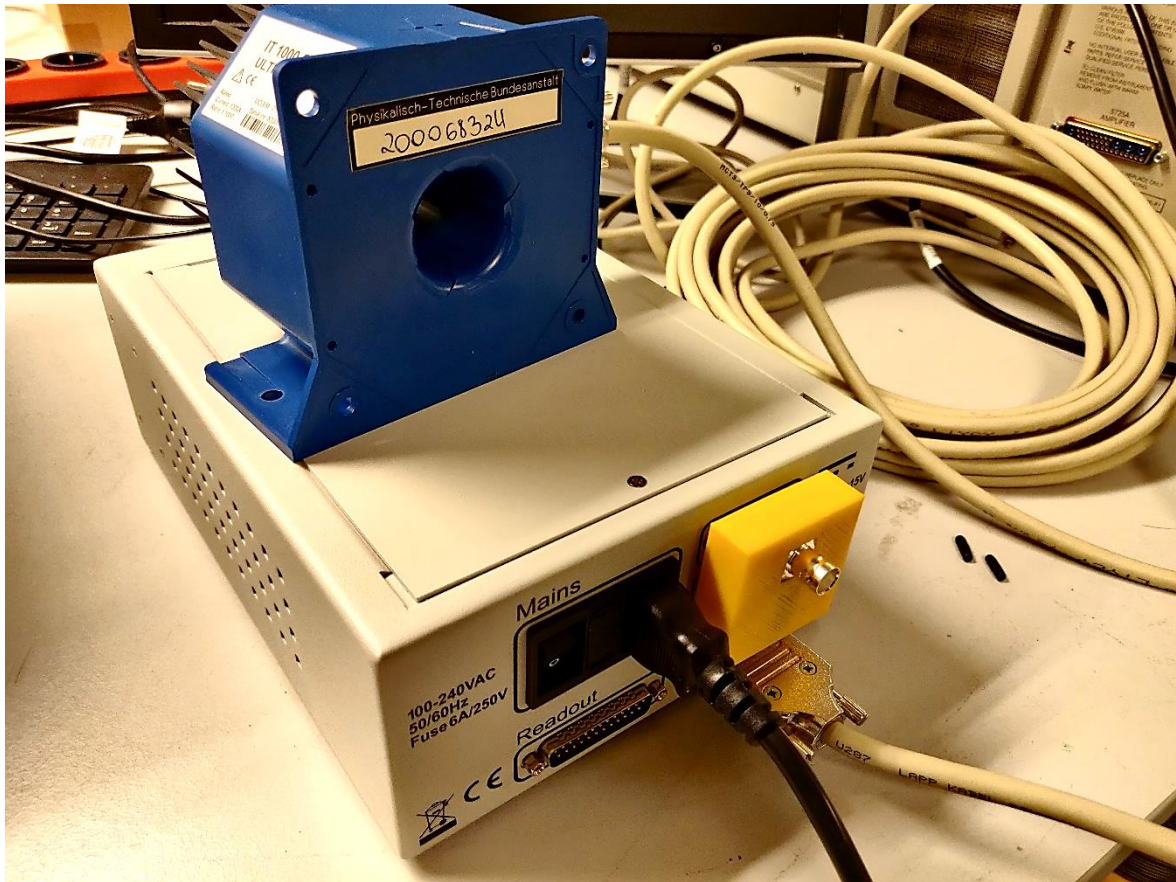


Abbildung 4-12 Nullflusswandler mit dem Spannungsquelle und dem Messwiderstand

## 4.2.7 Charakterisierung der Messeinrichtungen

Die Nullflusswandler wurden mit dem Messaufbau in der Abbildung 4-1 charakterisiert. Die Maßstabfaktoren sind in der Tabelle 4-3 dargestellt. Für jeden Sensor wurden 5 Stromwerte über den gesamten festgesetzten Messbereich für die Charakterisierung gemessen.

Tabelle 4-3 Maßstabfaktor der Strommesseinrichtungen

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

## **4.2.8 Spannungsmesseinrichtung**

### **4.2.9 Beschaffung der Messeinrichtung**

Für die Spannungsmessung in dem Projekt gibt es keine geeigneten kommerziellen Geräte zu kaufen. Die Spannungsteiler für die verbundenen Projektpartner wurden von der PTB entwickelt, gebaut und anschließend kalibriert.

Am Anfang des Projektes wurde die als Grenzfrequenz 100kHz als maximum angenommen. Ein Spannungsteiler wurde unter Berücksichtigung dieser Maximalfrequenz entwickelt. Die Schaltung ist in der Abbildung 4-13 gezeigt. Im Verlauf des Projektes haben sich die Anforderungen an die Messeinrichtung jedoch signifikant erhöht. Es hat sich herausgestellt, dass die zuvor angenommenen technischen Parameter wie die Bandbreite der Sensoren für eine Charakterisierung nicht ausreichend sind und diese angepasst werden müssen, um aussagekräftige Messergebnisse zu erhalten. Hierdurch war es jedoch notwendig geworden das Design maßgeblich anzupassen um neuen Anforderungen zu erreichen.





Abbildung 4-13 Erste Version des Spannungsteilers

Weil die Bandbreite des Spannungstastkopf im beantragten Projekt „AutoHybridS“ die Anforderung des Projekts „FASS“ erfüllen kann, wurde der Entwurf der AutoHybridS-Sensoren für dieses Projekt übernommen. Die Sensorparameter wie z.B. die Zeitparameter sind für die Messaufgaben des FASS-Projektes optimiert worden. Einer der fertig aufgebauten Spannungsteiler mit Gehäuse ist in Abbildung 4-14 dargestellt.

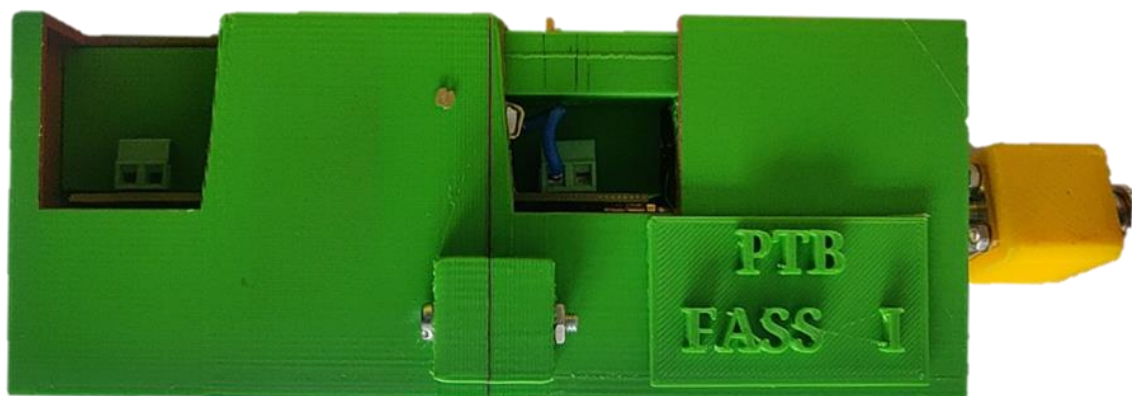


Abbildung 4-14 Hochspannungsteiler mit Gehäuse

#### 4.2.10 Charakterisierung der Messeinrichtungen

Die Spannungsteiler wurden mit dem Messaufbau in der Abbildung 4-7, Abbildung 4-1 und Abbildung 4-9 charakterisiert. Die Maßstabfaktoren sind in der Tabelle 4-4 dargestellt.

*Tabelle 4-4 Maßstabfaktoren der Spannungsmesseinrichtungen*

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

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

Zur Bestimmung der Energie der kombinierten Gleich- und Impulsmesswerte wurde ein LabVIEW-Programm entwickelt. Der Prozess der Datenverarbeitung ist schematisch in Abbildung 4-15 dargestellt. Um den Startpunkt und Endpunkt der Integration bzw. die Integrationspegel automatisch zu ermitteln, wurde das Signal zunächst Tiefpass gefiltert. Danach können mithilfe der in LabVIEW vorhandenen Histogramm-Funktion der DC-Anteil der Signale und die Pegel des Startpunkts und Endpunkts für die Integration der Energie ermittelt werden. Die so ermittelten Pegel werden als Trigger auf die ungefilterten Signale angewendet.

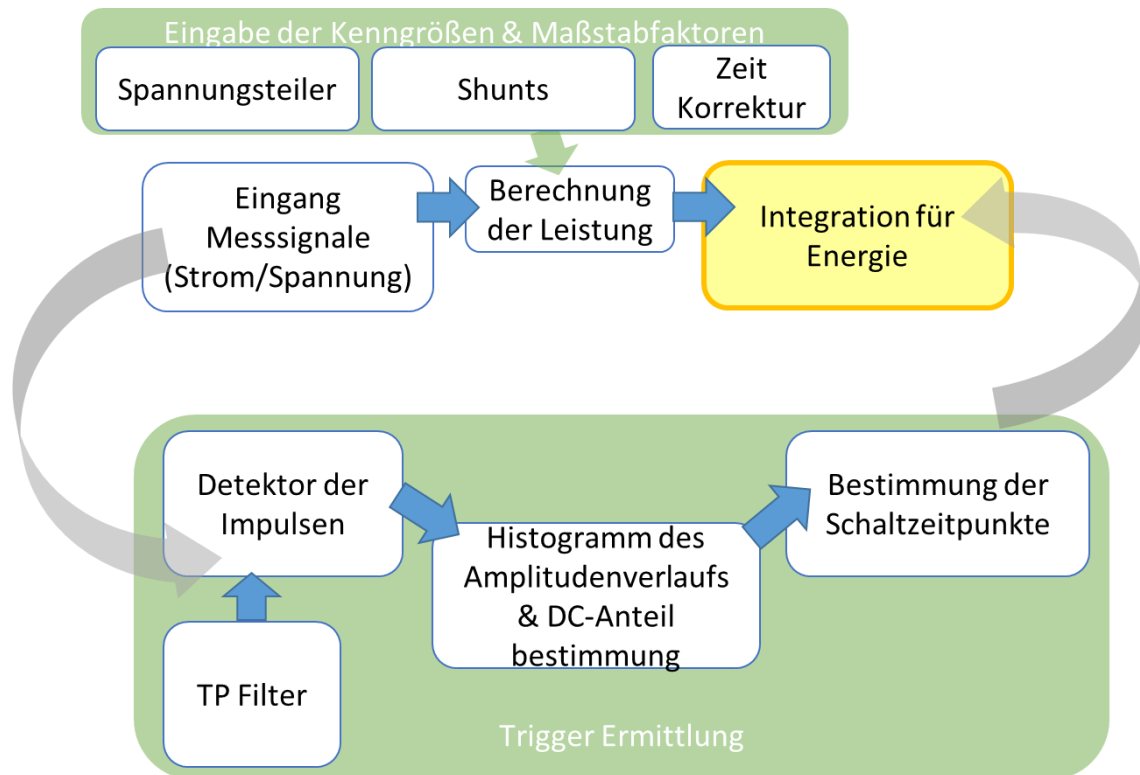


Abbildung 4-15 Prozess der Datenauswertung in LabVIEW

### **4.3 Ergebnisse aus AP 3**

Im AP. 3 werden sowohl wichtige Vorarbeiten zu den Messkampagnen fertiggestellt als auch die Materialanalytik begleitend zu den Messkampagnen durchgeführt. Die Vorarbeiten beinhalten ein Konzept zur statistischen Auswertung der Vielzahl von Messergebnissen. Diese müssen aus den Ergebnissen der Materialanalytik, den elektrischen und magnetischen Ergebnissen zu Kennfeldern statistisch gesichert zusammengeführt werden. Die PTB hat den Projektpartner in Bezug auf Messtechnik beraten.

## 4.4 Ergebnisse aus AP 5

Neben der Messanforderungen in dem Projektantrag geplanten Messanforderungen hat sich in dem Projekt der Bedarf an einer höheren Auflösung der Spannungsmessung während des Öffnens der Schaltkontakte ergeben. Für diese Messung wurde der Einsatz eines Spannungsteilers mit einem Teilungsfaktor von 10 vorgesehen. Das Problem bei der Verwendung eines solchen Teilers ist, dass wenn die Kontakte des Schalters geöffnet sind und der Lichtbogen erlöscht die Ausgangsspannung Werte annimmt, die den Eingang des angeschlossenen Digitizer beschädigen kann. Um dies zu verhindern wurde eine Schutzbeschaltung entworfen.

Die Herausforderung ist, beim Einsatz einer solchen Schutzschaltung ist, dass diese zuverlässig den Digitizer vor zu hohen Eingangsspannungen schützt, die Dynamik des Spannungsteilers jedoch nicht wesentlich beeinflusst.

Hierfür sind unterschiedliche Z-Dioden und ESD-Schutzbausteine auf ihre Eignung untersucht und teilweise in Versuchen getestet worden. Die ESD-Schutzbausteine SP4322-01ETG von Littelfuse waren am besten für diese Aufgabe geeignet und sind für die Schutzschaltung ausgewählt worden. In der Schutzschaltung sind 4 SP4322-01ETG in Reihe geschaltet damit der Messbereich für die Spannungsmessung groß genug ist.

Mit der unten dargestellten Schutzbeschaltung kann der Spannungsteiler die kleinen Spannungswerte präzise messen und der Digitizer wird beim Auftreten einer hohen Spannung am Spannungsteiler vor Überspannung geschützt. Zu beachten ist jedoch, dass das Ausgangssignal nach dem Ansprechen der Schutzschaltung nicht dem tatsächlichen Messsignal entspricht, auch wenn die Eingangsspannung am Spannungsteiler wieder im zulässigen Messbereich liegt. Der Grund hierfür ist, dass sich die Kapazitäten im „Hochspannungsteil“ durch das Ansprechen der Schutzschaltung auf höhere Spannungen aufgeladen haben und damit kein „Abgleich“ mehr zu der Spannung am Niederspannungsteil besteht. Erst nach einer gewissen Zeit, wenn durch den resistiven Messzweig die Asymmetrie abgebaut wurde, ist die Messspannung zu der Spannung am Eingang des Spannungsteilers wieder proportional.

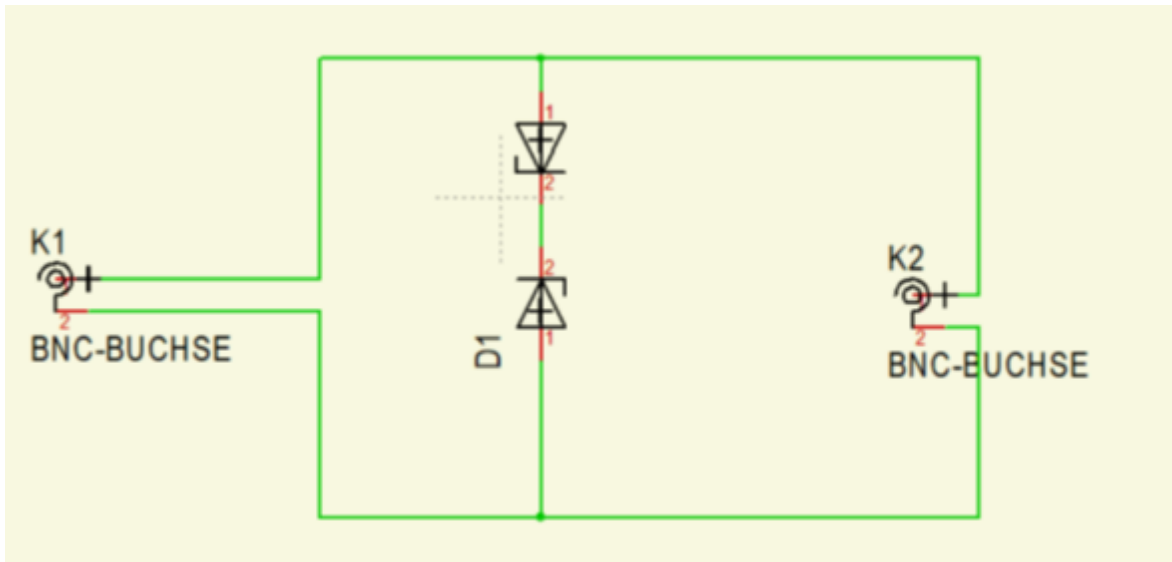


Abbildung 4-16 Schematischer Aufbau der Schutzschaltung für die Spannungsmesseinrichtung

## 5 Verwertungsplan

Anhand der gewonnenen Erkenntnisse aus der anwendungsorientierten Forschungs- und Entwicklungsarbeit zwischen Wissenschaft und Industrie, wurde im Projekt „Fass“ ein Schutzschalter für zukünftige die DC-Niederspannungsnetze entwickelt. Ein extrem schnell öffnendes elektromechanisches Schaltgerät für Gleichstromnetze mit sehr geringen Lichtbogenverweildauern wurde in Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern zur Serienreife weiterentwickelt.

In einigen Arbeitspaketen sind verschiedene Referenzmesseinrichtungen für Ströme und Spannungen aufgebaut, verbessert oder angepasst worden. Die PTB nutzt Die Erkenntnisse aus diesem Projekt für die Verbesserung der metrologischen Leistungen und des Knowhows. Weiterhin können in der Zukunft diese Einrichtungen und die bei der Entwicklung gewonnenen Erkenntnisse Anwendung in der allgemeinen Forschung an der PTB finden.

Die Kompetenzen und die Stellung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt im internationalen wissenschaftlichen Bereich DC-Messtechnik wurden durch das Projekt „Fass“ weiter ausgebaut. Die Zusammenarbeit mit dem Industriepartner sowie den Forschungseinrichtungen EGA, WET und WMS im Bereich der Schaltgerätetechnik ermöglichte die Entwicklung neuer Kompetenzen.

Aufgrund des Interesses von Industrie und Wissenschaft wurde eine Schnittstelle zu Netzwerken realisiert, welche in Zukunft zu weiteren Kooperationen führen werden. Die Teilnahme an internationalen Konferenzen und Tagungen ermöglichte zusätzlich zur Netzwerkbildung den wichtigen Austausch von Informationen.

Die Erforschung anwendungsbezogener Messungen von transienten Vorgängen sowie weiterer Messfelder ermöglichte die Entwicklung und Erweiterung wichtiger Kalibrier- und Messplätze. Die Laboraufbauten wurden teilweise jungen Mitarbeitern sowie Studenten durchgeführt. Auch zukünftig können diesen Anlagen für weitere Projekte eingesetzt werden, sodass das Projekt „Fass“ dadurch zur Ausbildung und Weiterbildung beiträgt.

Während des Projektes realisierte Mess- und Kalibriereinrichtungen können ebenfalls in Folgeprojekten und Dienstleistungsaufträgen im Anschluss genutzt werden. Im Fall der PTB besteht diesbezüglich eine sehr Nachfrage. Weiterhin werden die gewonnen Erfahrungen auch bei der Planung und Auslegung von zukünftigen Kalibriereinrichtungen herangezogen.

Aufgrund der starken Nachfrage in diesem Sektor ist der Einsatz der PTB in Parallel- und Folgeprojekten wahrscheinlich. Außerdem bietet die PTB den Forschungsinstituten die häufig angefragte Möglichkeit der Prüf- oder Messdienstleistungen an. Durch das Projekt konnten wissenschaftliche Mitarbeiter und Studenten einen besonderen Erfahrungsgewinn erhalten. Die Einnahmen dieser Dienstleistungsprojekte kommen wiederum der Forschung und Wettbewerbsfähigkeit der Forschungseinrichtungen zugute. Auf dem Gebiet der Metrologie werden neue Kalibriereinrichtungen an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt aufgebaut. Als Verwertung der Erforschung von überlagerten Gleichsignalen und transienten Spannungen und Strömen werden die aufgebauten Kalibriereinrichtungen weiterführend genutzt.



## 6 Literaturverzeichnis

- [1] T. Mützel, „Physikalische Grundlagen und Lösungsansätze zum Schalten von Gleichströmen,“ Karlsruhe, 2011.
- [2] D. Gonzalez, M. Hopfeld, F. Berger und P. Schaaf, „Modellschalter-Versuchsstand des Kompetenzzentrums für,“ in 23. *Albert-Keil-Kontaktseminar - AKK - Electrical Contacts 1953 to 2017*, Dresden, 2015.
- [3] T. J. Sullivan, *Introduction to Uncertainty Quantification*, Heidelberg: Springer-Verlag, 2015.
- [4] J. Jebramcik und F. Berger, „Switching characteristics of arc chutes in DC contactors,“ in 22. *Albert-Keil-Kontaktseminar*, Karlsruhe, 2013.
- [5] 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*, Edinburgh, 2016.
- [6] O. Binder, J. Meisner, M. Kurrat, M. Schmidt und M. Kahmann, „Impact of time delayed current and voltage signals on IGBT loss measurement,“ in *PCIM Europe*, Nuremberg, 2012.

Abbildung 5-1 Strom-, Spannungs- und Leistungsverläufe bei transienten Vorgängen [6]	8
Abbildung 6-1 Blockschaltbild der transportablen Kalibriereinrichtungen für transiente Hochströme .....	13
Abbildung 6-2 der transportablen Kalibriereinrichtungen für transiente Hochströme .....	14
Abbildung 6-3 Schaltplan des Stoßstromgenerators. ....	14
Abbildung 6-4 Foto des Stoßstromgenerators.....	15
Abbildung 6-5 Voreinstellung der Auswertungssoftware für Stoßstrommessung .....	16
Abbildung 6-6 Darstellung des Messergebnisses. Die weiße Kurve stellt einen von einem Stromsensor aufgenommenem Stromverlauf dar. Die rote Kurve ist der Stromverlauf ohne den überlagerten Gleichstromanteil. ....	17
Abbildung 6-7 Blockschaltbild der mobilen Kalibriereinrichtung für Spannungssprünge ...	18
Abbildung 6-8 mobile Kalibriereinrichtung für Spannungssprünge .....	19
Abbildung 6-9 Messanordnung zur Aufzeichnung der Sprungantwort .....	20
Abbildung 6-10 Schaltbild des Referenzspannungsteilers. Jeder Widerstand bzw. Kondensator in dem Hochspannungsteil besteht aus der Reihenschaltung von 10 gleichen Bauteilen. Die Widerstands- und Kapazitätswerte sind im Niederspannungsteil mit Hilfe von Trimmen einstellbar. ....	20
Abbildung 6-11 Referenzspannungsteiler mit Gehäuse.....	21
Abbildung 6-12 Nullflusswandler mit dem Spannungsquelle und dem Messwiderstand ...	23
Abbildung 6-13 Erste Version des Spannungsteilers.....	25
Abbildung 6-14 Hochspannungsteiler mit Gehäuse .....	25
Abbildung 6-15 Prozess der Datenauswertung in LabVIEW.....	27
Abbildung 6-16 Schematischer Aufbau der Schutzschaltung für die Spannungsmesseinrichtung.....	30

Tabelle 6-1 Parameter der Nullflusswandler .....	22
Tabelle 6-2 Messwiderstände für die Stromsensoren .....	22
Tabelle 6-3 Maßstabfaktor der Strommesseinrichtungen .....	23
Tabelle 6-4 Maßstabfaktoren der Spannungsmesseinrichtungen .....	26