

Design und Konstruktion eines neuartigen
Langzeitstrom-Generators

M.Sc. KptLt Felicitas Modlinger

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrische Energiesysteme und Informationstechnik der Universität der Bundeswehr München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

angenommenen Dissertation.

Gutachter:

1. Prof. Dr.-Ing. habil. F. Heidler
2. Prof. Dr.-Ing. C. Paul
3. Prof. Dr.-Ing. habil. M. Rock

Die Dissertation wurde am 01.10.2025 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Elektrische Energiesysteme und Informationstechnik am 16.01.2026 angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 10.02.2026 statt.

In der Physik kommt man stets an einen Punkt, den man nicht weiter erklären kann – das ist, was andere „Gott“ nennen.

Wolfgang Deutschmann

Vorwort

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts wurde erstmals erkannt, dass basaltische Gesteine durch Blitzströme magnetisiert werden können. Da der im Basalt erzeugte remanente Magnetismus vom Maximum der magnetischen Feldintensität abhängt, war es somit möglich, auf den maximal geflossenen Blitzstrom zu schließen. Die ersten definierten Messungen mit dieser Methode gelangen im Jahr 1900, als ein Turm auf dem Monte Cimone in Italien (Apenninen) vom Blitz getroffen wurde. Zur Strommessung dienten Basaltstäbe, die an den Ableitungen des Turms angebracht waren. Dieses Verfahren erlangte aber erst technische Bedeutung, als die Basaltstäbe durch Magnetstäbchen, bestehend aus Stahldrähten, ersetzt wurden. Aufgrund der einfachen Handhabung und des vergleichsweise geringen Preises wurden insbesondere in den 30-er Jahren des letzten Jahrhunderts zehntausende von hohen Objekten, wie Masten von Freileitungen, mit solchen Magnetstäbchen ausgerüstet.

Nachteilig an dieser Methode war sicherlich, dass nur das Strommaximum des stromstärksten Blitzes erfasst wurde. Dies änderte sich mit der Erfindung des Kathodenstrahloszillogskops, mit dem es nun möglich war, den zeitlichen Verlauf des Blitzstroms aufzuzeichnen: Die wohl ersten oszillographischen Aufzeichnungen eines Blitzstroms gelangen schließlich in den 30-er Jahren am 381 m hohen Empire State Building in New York (USA). Bei diesen Aufnahmen zeigte sich, dass ein Blitz aus mehreren Teilblitzen bestehen kann und dass neben den kurz andauernden Stoßströmen auch länger andauernde Langzeitströme auftreten können.

Kurze Zeit vorher wurde eine Hochgeschwindigkeitskamera, die sogenannte Boys-Kamera, erfunden, die es nun erlaubte, die räumliche und zeitliche Entwicklung des Blitzkanals aufzunehmen. Aufgrund dieser Aufnahmen ließen sich die Blitze in zur Wolke hin gerichtete Aufwärtsblitze und zur Erde hin gerichtete Abwärtsblitze einteilen. In der Folgezeit wurden Blitzströme an unterschiedlichen Objekten in verschiedenen Ländern gemessen. Bei den Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Abwärtsblitze jedes Objekt auf der Erde treffen können, während die Aufwärtsblitze auf hohe Gebäude ab etwa 100 m beschränkt sind.

Eine wichtige Erkenntnis war, dass bei den Aufwärtsblitzen keine Erstblitze mit starken Stoßströmen wie bei den Abwärtsblitzen auftraten. Auch die nach den Stoßströmen nachfolgenden Langzeitströme waren bei den Aufwärtsblitzen nicht größer als bei den Abwärtsblitzen. Da zudem das Auftreten der Aufwärtsblitze auf den sehr seltenen Fall hoher Gebäude beschränkt ist, fanden die Aufwärtsblitze in der Normung lange Zeit kaum Beachtung. Dazu heißt es immer noch in der aktuellen Normung: „Alle

Stoßstromparameter von Aufwärtsblitzen sind niedriger als die der Abwärtsblitze. Eine höhere Ladung des Langzeitstroms von Aufwärtsblitzen ist bis jetzt nicht bestätigt. Deshalb ist anzunehmen, dass die Blitzstromparameter der Aufwärtsblitze durch die höchsten Parameter der Abwärtsblitze abgedeckt ist“.

Allerdings wurde bereits bei den Untersuchungen am Empire State Building festgestellt, dass die Aufwärtsblitze von einem Langzeitstrom eingeleitet werden, der erhebliche Ladungsmengen mit sich führen kann. Neuere Messungen haben diese Tendenz bestätigt: Die Ladungsmengen der einleitenden Langzeitströme von Aufwärtsblitzen lagen teilweise deutlich über den entsprechenden Ladungsmengen der Abwärtsblitze. Besonders deutlich war der Unterschied bei den Strömen: Während für die Langzeitströme von Abwärtsblitzen Werte von einigen 100 A typisch sind, wurden für die einleitenden Langzeitströme von Aufwärtsblitzen um bis zu zwei Größenordnungen höhere Werte gemessen. Diese hohen Stromwerte bis zu einigen 10 kA waren lange Zeit kaum im Bewusstsein, da sie nur bei den äußerst seltenen positiven Aufwärtsblitzen auftreten und oftmals als lokale Besonderheiten abgetan wurden.

Die Sichtweise änderte sich erst in jüngster Zeit, als (infolge des Klimawandels) zunehmend leistungstärkere Windkraftanlagen errichtet wurden. Aufgrund der immer größeren Bauhöhen wurden diese Windkraftanlagen nämlich im verstärkten Maße von Aufwärtsblitzen getroffen. Die dort auftretenden Schäden veranlassten eine neue Bewertung der Langzeitströme mit der Folge, dass in der Normung die zu berücksichtigende Ladung für Windkraftanlagen um den Faktor 3 erhöht wurde. Dies bedeutet nun aber für eine Testeinrichtung, dass sie diesen erhöhten Anforderungen genügen muss. Weiterhin wird heutzutage in zunehmendem Maße gefordert, dass die Prüfung mit Langzeitströmen mit der Prüfung mit Stoßströmen kombiniert wird. Dementsprechend sollte ein Langzeitstrom-Generator mit einem Stoßstrom-Generator kombinierbar sein, so dass sich die verschiedenen Komponenten eines Blitzstroms in einem gemeinsamen Stromimpuls realisieren lassen. Daneben sollte der Langzeitstrom-Generator die Nachbildung der extrem hohen Ströme von positiven Aufwärtsblitzen ermöglichen. Dies ist insofern von großem Interesse, da das Verhalten solch hoher Langzeitströme bisher noch nicht Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen war.

Das Thema der vorliegenden Dissertation widmet sich daher dem Neubau eines Langzeitstrom-Generators, der diesen erhöhten Anforderungen einschließlich den Vorgaben aus der Normung genügt. Mit dem neu erstellten Langzeitstrom-Generator ist es nun weltweit erstmals möglich, die Langzeitströme in ihrer ganzen Variationsbreite experimentell zu simulieren, einschließlich der Option, die Langzeitströme mit Stoßströmen kombinieren zu können.

Kurzfassung

Mit zunehmendem Ausbau der erneuerbaren Energien werden immer leistungsstärkere Windkraftanlagen gebaut, welche immer größere Höhen erreichen. Während kleinere Bauwerke nahezu ausschließlich von Abwärtsblitzen (Wolke-Erde-Blitze) getroffen werden, werden hoch aufragende Bauwerke ab etwa 100 m (wie z.B. moderne Windkraftanlagen) meist von Aufwärtsblitzen (Erde-Wolke-Blitze) getroffen. Der Beginn der Abwärtsblitze ist durch kurz andauernde sehr hohe sogenannte Stoßströme bis über 100 kA gekennzeichnet, wogegen die Aufwärtsblitze von Langzeitströmen, sogenannten ICC, eingeleitet werden. Typischerweise betragen die (einleitenden) Langzeitströme einige 100 A und weisen eine Ladung bis zu einige 100 C auf. In der Regel dauern sie einige 100 ms. Durch diese Langzeitströme können Schäden wie Ausfälle der elektrischen und elektronischen Systeme sowie Funktionsstörungen hervorgerufen werden. Hinzu kommen Metallausschmelzungen und andere Schäden an Geräten und Strukturen (z.B. an Getrieben und Flügeln von Windkraftanlagen). Ähnliche Schäden werden auch an Flugzeugen beobachtet, wenn sie bei Annäherung an eine Gewitterwolke von Blitzen getroffen werden.

Um sowohl (hohe) Bauwerke als auch Flugzeuge vor solchen Schäden zu bewahren, werden sie mit Blitzschutz-Systemen ausgestattet. Zur Prüfung der Blitzschutz-Systeme werden die Blitzströme einschließlich ihrer Komponenten im Labor nachgebildet. Zur Nachbildung der Stoßströme werden sogenannte Stoßstrom-Generatoren eingesetzt, während zur Nachbildung von Langzeitströmen analog dazu Langzeitstrom-Generatoren verwendet werden. Eine grundlegende Forderung ist hierbei, dass die Stoß- und Langzeitstrom-Generatoren die in der Normung festgelegten Anforderungen erfüllen. Die wesentlichen Anforderungen sind in der nationalen Norm VDE 0185-305-1 (bzw. der internationalen Norm IEC 62305-1) und in der Norm EUROCAE ED-84 festgelegt.

Während VDE 0185-305-1 den Blitzschutz von baulichen Anlagen beinhaltet, beschreibt EUROCAE ED-84 den Blitzschutz von fliegenden Systemen. Beiden Normen ist gemeinsam, dass die Gefährdungen durch den Langzeitstrom mittels eines näherungsweise konstanten Stroms mit einer (maximalen) Ladung von 200 C nachgebildet werden. Neben diesem Leistungsmerkmal werden an moderne Langzeitstrom-Generatoren inzwischen wesentlich höhere Anforderungen gestellt. Neuere Messungen haben nämlich gezeigt, dass an modernen, hoch aufragenden Bauwerken (z.B. Windkraftanlagen) mit höheren Ladungsmengen zu rechnen ist. In der DIN EN IEC 61400-24 wird diesen Messungen Rechnung getragen, indem für besonders exponierte Windkraftanlagen die Gefährdung durch Langzeitströme mit einer Ladung von 600 C nachgebildet wird.

Neben der Ladung sind für die Gefährdung durch die Langzeitströme weitere Parameter bedeutsam. Dies sind vor allem die Zeitdauer und die Stromstärke, die durch das Strommaximum und den mittleren Strom gekennzeichnet wird. Betrachtet man beispielsweise die von der Universität der Bundeswehr München am Peißenbergturm gemessenen Langzeitströme negativer Aufwärtsblitze, lässt sich feststellen, dass sie gegenüber VDE 0185-305-1 in 5,4 % der Fälle eine längere Zeitdauer als die dort festgelegte Zeit von 500 ms und in 14,2 % der Fälle einen höheren mittleren Strom als den dort festgelegten (maximalen) Strom von 400 A aufweisen. Noch eklatanter ist der Unterschied bei den positiven Aufwärtsblitzen, die Langzeitströme bis über 20 kA aufweisen können.

Wünschenswert ist daher ein Langzeitstrom-Generator, der sowohl die Ströme nach Normung als auch die weitergehenden Anforderungen durch die natürlich auftretenden Blitzströme nachbilden kann. Unter diesem Gesichtspunkt wurde ein neuer Langzeitstrom-Generator entwickelt, der einen in weiten Bereichen variablen Langzeitstrom erzeugen kann, um damit die verschiedenartigen Einflüsse durch das Strommaximum, die Zeitdauer und die hohen Ladungsmengen der natürlichen Blitze abbilden zu können. Im Gegensatz zu den üblichen Langzeitstrom-Generatoren, die mit Ladespannungen bis etwa 1 kV und Strömen von einigen 100 A betrieben werden, wurde der neue Langzeitstrom-Generator für eine Ladespannung bis zu 2,5 kV ausgelegt. Durch die höhere Ladespannung ist ein stabiles Brennen des Lichtbogens an ausgedehnten Prüfobjekten möglich, sodass die Untersuchungen mit einer indirekten Hochspannungs-Elektrode ohne die Nachteile bei der üblichen Verwendung einer direkten Hochspannungs-Elektrode durchgeführt werden können.

Die hohe Generator-Spannung ist möglich, weil als Energiespeicher eine Kondensatorbank anstelle der oftmals verwendeten Batterien oder Gleichstrom-Generatoren genutzt wird. Während beispielsweise bei Verwendung von Batterien durch deren Innenwiderstand der maximal mögliche Langzeitstrom stark eingeschränkt ist, wird der Strom aus dem neuen Langzeitstrom-Generator nur durch die Beschaltung mit entsprechenden Widerständen beschränkt, weswegen sich wesentlich höhere Ströme realisieren lassen. Der neue Langzeitstrom-Generator bietet daher die Möglichkeit, dass auch die extrem hohen Langzeitströme von positiven Blitzen mit Stromwerten größer als 20 kA und Ladungen über 500 C nachgebildet werden können. Auch bietet die Nutzung einer Kondensatorbank Vorteile, da diese automatisch geerdet und kurzgeschlossen und somit eine höhere Personensicherheit gewährleistet werden kann.

Um einen sicheren Zustand zu gewährleisten, wurde der Langzeitstrom-Generator in das bestehende Sicherheitskonzept der Hochspannungshalle integriert. Die Hochspannungs-Seite mit dem Langzeitstrom-Generator ist vom Bedienfeld auf der Niederspannungs-Seite durch einen Trennzaun abgegrenzt. Die Hochspannungs-Seite kann durch Türen im Trennzaun betreten werden. Mit Öffnen der Türen wird der in der Hochspannungshalle integrierte Sicherheitskreis unterbrochen. Bei Unterbrechung des Sicherheitskreises wird durch eine Steuer-Einheit der Langzeitstrom-Generator automatisch abgeschaltet und geerdet.

Hauptbestandteile des Langzeitstrom-Generators sind die Kondensatorbank und ein variabler Widerstand. Die Kondensatorbank besteht aus 50 parallel geschalteten Kondensatoren mit einer (Gesamt-) Kapazität von 0,22 F. Bei einer maximalen Ladespannung von 2,5 kV beträgt die Ladungsmenge 550 C und die Generator-Energie nahezu 700 kJ.

Der variable Widerstand setzt sich zusammen aus einem Innenwiderstand von etwa $0,1 \Omega$ und einer nachgeschalteten Widerstandskaskade, mit der ein veränderbarer Widerstand bis $25,5 \Omega$ eingestellt werden kann. Damit können Ströme von etwa 100 A bis über 20 kA realisiert werden. Nachteilig daran ist, dass mit dieser Schaltung nur Ströme mit exponentiellem Abfall erzeugt werden können. Um diesen Nachteil zu umgehen, werden Strom-formende-Schalter eingesetzt, die den Widerstand stufenweise reduzieren und auf diese Weise einen annähernd konstanten Strom ermöglichen.

Um den Langzeitstrom schließlich auszuschalten, wird ein Kurzschluss parallel zum Prüfobjekt erzeugt. Dazu wird ein spezieller Schalter verwendet, der den Strom in einen Parallelkreis zum Prüfobjekt kommutiert und so den Strom um das Prüfobjekt herumleitet und ihn auf diese Weise abschaltet.

Um die in der Natur auftretende Abfolge eines ersten Stoßstroms mit nachfolgendem Langzeitstrom nachbilden zu können, stellt sich die Forderung, dass der Langzeitstrom-Generator mit einem Stoßstrom-Generator kombiniert wird. Zur notwendigen Entkopplung beider Generatoren wird eine Induktivität eingesetzt. Durch die Verwendung dieser Entkopplungsinduktivität wird das Prüfobjekt zunächst durch den Stoßstrom und anschließend durch den Langzeitstrom beaufschlagt. Hierbei kann der Stoßstrom-Generator zur Erzeugung eines schwingenden oder unipolaren Stroms sowohl mit als auch ohne Crowbar-Schalter betrieben werden.

Nach gängiger Auffassung ist für Ausschmelzungen an Metallstrukturen nur die Ladung des Langzeitstroms verantwortlich, jedoch nicht andere Parameter wie dessen Stromstärke oder Zeitdauer. Um diese Annahme zu überprüfen, wurden Untersuchungen an Aluminium-Platten mit einer Dicke von 2 mm durchgeführt. Bei konstant gehaltener Ladung von 200 C, wurde der Langzeitstrom zwischen 100 A und etwa 5 kA variiert.

Bei unbeschichteten Aluminium-Platten und bei relativ geringen Langzeitströmen bis 500 A konnten nur relativ geringe oberflächliche Ausschmelzungen beobachtet werden, die jedoch nicht zur Lochbildung führten. Erhöhte man den Langzeitstrom auf über 1 kA, kam es zur Lochbildung, die mit weiterer Stromerhöhung immer ausgeprägter wurde. Dies gilt allerdings nur bis zu einer Stromstärke von etwa 2 kA. Bei noch höheren Strömen geht die Lochbildung wieder zurück, so dass interessanterweise ab einer Stromstärke von etwa 5 kA kein Loch mehr zu beobachten ist.

Bei beschichteten Aluminium-Platten (Flugzeuglack mit einer Dicke von 300 μm) hingegen konnten signifikante Unterschiede festgestellt werden. Bei relativ kleinen Strömen (bis etwa 200 A) werden zunächst nur kleinere Ausschmelzungen beobachtet. Mit Stromerhöhung werden die Ausschmelzungen jedoch immer markanter, sodass bereits bei Stromstärken unter 1 kA deutliche Lochbildung erkennbar ist. Im Gegensatz zu den unbeschichteten Aluminium-Platten geht die Lochbildung bei höheren Strömen nicht zurück, sondern die Löcher werden mit Zunahme des Stroms immer größer.

Somit ist erkennbar, dass neben der eingebrachten Ladung weitere Parameter für das Ausschmelzen und die Lochbildung an Blechen maßgeblich sind. Dies sind zum einen die Dicke und das Material der aufgetragenen Beschichtung sowie andererseits die Zeitdauer des Langzeitstroms und dessen Stromstärke. Da bei den Untersuchungen eine indirekte Hochspannungs-Elektrode eingesetzt wurde, war das ausgeschmolzene Volumen wesentlich kleiner als bei den in der Literatur bekannten Untersuchungen mit direkter Elektrode. Dies deutet darauf hin, dass bei natürlichen Blitzen die Ausschmelzungen durch Langzeitströme deutlich geringer sind als bisher angenommen.

Detaillierte Untersuchungen hierzu wurden allerdings nicht durchgeführt, da sie den Umfang der vorliegenden Arbeit bei Weitem übertreffen würden. Auch müssten unterschiedliche Materialien für die Bleche bei Variation ihrer Dicke untersucht werden, um hieraus belastbare Aussagen über die Ausschmelzvorgänge treffen zu können. Dies eröffnet jedenfalls eine Vielzahl an möglichen künftigen Forschungsprojekten.

Abstract

With the increasing expansion of renewable energies, ever more powerful wind turbines are being built, which reach even greater heights. While smaller structures are almost exclusively struck by downward flashes (cloud-to-ground flashes), towering structures from around 100 m (such as modern wind turbines) are mostly struck by upward flashes (ground-to-cloud flashes). The beginning of the downward flashes is characterized by short-lasting, very high so-called impulse currents of over 100 kA, whereas the upward flashes are initiated by long duration currents, so-called initial continuous currents (ICCs). Typically, the (initiating) long duration currents are a few 100 A and have a charge of a few 100 C. They usually last a few 100 ms. These long duration currents can cause damage such as electrical and electronic system failures and malfunctions. In addition, there is metal melting and other damage to equipment and structures (e.g. to gear and blades of wind turbines). Similar damage is observed on aircraft when they are struck by lightning as they approach a thundercloud.

In order to protect both (tall) buildings and aircraft from such damage, they are equipped with lightning protection systems. To test the lightning protection systems, the lightning currents and their components are simulated in the laboratory. So-called high current impulse generators are used to simulate impulse currents, while long duration current generators are used to simulate long duration currents. A fundamental requirement here is that the high current impulse and long duration current generators meet the requirements specified in the standard. The essential requirements are defined in the national standard VDE 0185-305-1 (or the international standard IEC 62305-1) and in the standard EUROCAE ED-84.

While VDE 0185-305-1 covers the lightning protection of fixed structures, EUROCAE ED-84 describes the lightning protection of flying systems. What both standards have in common is that the hazards from the long duration current are simulated with an approximately constant current with a (maximum) charge of 200 C. In addition to this performance feature, modern long duration current generators are now subject to significantly higher requirements. Recent measurements have shown that higher charge quantities are to be expected on modern, high-rise wind turbines. DIN EN IEC 61400-24 takes these measurements into account by simulating the risk of long duration currents with a charge of 600 C for particularly exposed wind turbines.

In addition to the charge, other parameters are important for the risk posed by long duration currents. These are primarily the duration and the current amplitude, which is characterized by the current maximum and the average current. If we look, for example,

at the long duration currents of negative upward flashes measured by the University of the Federal Armed Forces in Munich at the Peißenberg Tower, it can be seen that in 5.4 % of cases they have a longer duration than the time of 500 ms specified in VDE 0185-305-1 and in 14.2 % of cases a higher average current than the (maximum) current of 400 A specified there. The difference is even more striking in the case of positive upward flashes, which can have long duration currents of over 20 kA.

It is therefore desirable to have a long duration current generator that can simulate both the currents according to standardization and the more extensive requirements due to the naturally occurring lightning currents. With this in mind, a new long duration current generator has been developed that can generate a long duration current which is variable over a wide range in order to be able to reproduce the various influences of the current maximum, the duration and the high charge quantities of natural lightning. In contrast to the usual long duration current generators, which are operated with charging voltages of up to around 1 kV and currents of several 100 A, the new long duration current generator was designed for a charging voltage of up to 2.5 kV. The higher charging voltage enables stable burning of the arc on extended test objects, so that the tests can be carried out with an indirect high-voltage electrode without the disadvantages of the usual use of a direct high-voltage electrode.

The high generator voltage is possible because a capacitor bank is used as energy storage instead of the batteries or DC generators that are often used. While the maximum possible long duration current is severely limited by the internal resistance of batteries, for example, the current from the new long duration current generator is only limited by the wiring with corresponding resistors, which is why significantly higher currents can be realized. The new long duration current generator therefore offers the possibility of simulating the extremely high long duration currents of positive flashes with current values greater than 20 kA and charges of over 500 C. The use of a capacitor bank also offers advantages, as it can be automatically earthed and short-circuited, thus improving personal safety.

To ensure safe operation and idle mode, the long duration current generator was integrated into the existing safety concept of the high-voltage hall. The high-voltage side with the long duration current generator is separated from the control panel on the low-voltage side by a partition fence. The high-voltage side can be accessed through doors in the partition fence. When the doors are opened, the safety circuit integrated in the high-voltage hall is interrupted. If the safety circuit is interrupted, a control unit automatically switches off and earthes the long duration current generator.

The main components of the long duration current generator are the capacitor bank and a variable resistor. The capacitor bank consists of 50 capacitors connected in parallel with a (total) capacitance of 0.22 F. At a maximum charging voltage of 2.5 kV, the charge is 550 C and the generator energy is almost 700 kJ.

The variable resistor consists of an internal resistor of around 0.1 Ω and a downstream resistor cascade with which a variable resistance of up to 25.5 Ω can be set. This allows currents of around 100 A to over 20 kA to be realized. The disadvantage of this circuit is that only currents with an exponential drop can be generated. To overcome this disadvantage, current-shaping switches are used which reduce the resistance in stages and thus enable an almost constant current.

To finally switch off the long duration current, a short circuit is generated in parallel to the test object. A special switch is used for this purpose, which commutates the current in a parallel circuit to the test object and thus diverts the current around the test object and switches it off in this way.

In order to be able to simulate the natural sequence of an initial impulse current followed by a long duration current, the long duration current generator must be combined with a high current impulse generator. An inductance is used for the necessary decoupling of both generators. By using the decoupling inductance, the test object is first subjected to the impulse current and then to the long duration current. The high current impulse generator can be operated with or without a crowbar switch to generate either an oscillating or unipolar current.

According to common opinion, only the charge of the long duration current is responsible for melting on metal structures, but not other parameters such as its current strength or duration. In order to verify this assumption, tests were carried out on aluminium plates with a thickness of 2 mm. While the charge was kept constant at 200 C, the long duration current was varied between 100 A and about 5 kA.

With uncoated aluminium plates and relatively low long duration currents up to 500 A, only relatively small surface melting was observed, which did not lead to hole formation. If the long duration current was increased to over 1 kA, pitting occurred, which became more pronounced with further increases in current. However, this only applies up to a current value of around 2 kA. At even higher currents, the pitting decreases again, so that interestingly, no more pitting was observed from a current value of around 5 kA.

In contrast, significant differences were observed in coated aluminium plates (aircraft paint with a thickness of 300 μm). At relatively low currents (up to around 200 A), only minor melting was initially observed. However, as the current is increased, the melting became more and more pronounced, so that clear hole formation was already visible at current values below 1 kA. In contrast to the uncoated aluminium plates, the hole formation did not decrease at higher currents, but the holes became larger and larger as the current is increased.

It can therefore be seen that, in addition to the applied charge, other parameters for melting and hole formation on sheets must be taken into account. These are, on the one hand, the thickness and the material of the applied coating as well as the duration of the long duration current and its current strength. As an indirect high-voltage electrode was used in the investigations, the melted volume was considerably smaller than in the investigations with a direct electrode known from the literature. This indicates that the melting out caused by long duration currents in natural lightning is significantly lower than previously assumed.

However, detailed investigations into this were not carried out as they would far exceed the scope of this study. It would also be necessary to investigate different materials for the sheets with variations in their thickness in order to be able to draw reliable conclusions about the melting processes. This opens up a wide range of possible future research areas.

Design und Konstruktion eines neuartigen
Langzeitstrom-Generators

	Seite
Vorwort	i
Kurzfassung	iii
Abstract	vii
Inhaltsverzeichnis	xi
Abbildungsverzeichnis	xviii
Tabellenverzeichnis	xxvi
Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen, Formelzeichen und Indizes	xxviii
 <u>1. Einleitung</u>	 1
 <u>2. Grundlegendes zu Gewittern, Blitzen und Blitzströmen</u>	 5
2.1 Entstehung von Gewittern	5
2.2 Eigenschaften und Kenngrößen von Blitzen	6
2.2.1 Blizentladungen zur Erde	6
2.2.2 Blitzeinschläge in Flugzeuge	10
2.3 Experimentelle Nachbildung der Blitzströme für Prüfzwecke	11
2.3.1 Experimentelle Nachbildung der Blitzströme für bauliche Anlagen	11
2.3.2 Experimentelle Nachbildung der Blitzströme für Einschläge in Flugzeuge	12
 <u>3. Einleitende Langzeitströme von Aufwärtsblitzen und deren Parameter</u>	 14
3.1 Blitzmessstation am Hohen Peißenberg	15
3.2 Negative Aufwärtsblitze am Peißenbergturm	16
3.3 Positive Aufwärtsblitze am Peißenbergturm	20
3.4 Anforderungen an den neuen Langzeitstrom- Generator	21

4.	<u>Überblick und Konzept für den Bau eines Langzeitstrom-Generators</u>	22
4.1	Motivation für den Bau eines Langzeitstrom-Generators	22
4.2	Konzept für den neu zu erstellenden Langzeitstrom-Generator	24
4.3	Konzeptionelle Auslegung des neuen Langzeitstrom-Generators	27
4.3.1	Dimensionierung der Kondensatorbank C_L	27
4.3.2	Dimensionierung des Widerstandes R_L	28
4.3.3	Dimensionierung der Induktivität L_L	29
4.3.4	Modularer Aufbau und Strombegrenzung	30
4.4	Anforderungen an den Betrieb des Langzeitstrom-Generators	30
5.	<u>Überlegungen zur Erzeugung eines konstanten Langzeitstroms</u>	32
5.1	Vereinfachtes Ersatzschaltbild des neuen Langzeitstrom-Generators	33
5.2	Dimensionierung der Widerstandskaskade	34
5.3	Praktische Ausführung der Widerstandskaskade	35
5.4	Beispiel für den Einsatz der Strom-formenden-Schalter	38
5.5	Praktische Ausführung der Einzel-Widerstände	41
6.	<u>Theoretische Betrachtungen zum Langzeitstrom-Generator bei Berücksichtigung der Induktivität</u>	43
6.1	Festlegung der Parameter des Langzeitstrom-Generators	44
6.1.1	Dimensionierung der Induktivität für den aperiodisch gedämpften Fall	44
6.1.2	Dimensionierung der Kapazität und der Widerstände	45
6.2	Ergebnisse der numerischen Simulation mit dem Programm LTspice	46
6.2.1	Parameter der genormten Langzeitströme	46
6.2.2	Rechnerische Simulation der genormten Langzeitströme	47
6.2.2.1	Nachbildung des Langzeitstroms nach DIN EN IEC 61400-24	47

6.2.2.2	Nachbildung der Langzeitströme nach VDE 0185-305-1	48
6.2.2.3	Nachbildung der kombinierten Stromkomponente B+C*	50
6.2.2.4	Maximal mögliche Langzeitströme	52
6.3	Maximale Spannung am Ausgang des Langzeitstrom-Generators	53
6.3.1	Maximal zu erwartende Spannung bei Kombination mit einem Marx-Generator	53
6.3.2	Maximal zu erwartende Spannung bei Kombination mit dem Stoßstrom-Generator	53
<u>7.</u>	<u>Aufbau des Langzeitstrom-Generators</u>	56
7.1	Stromerzeugungs-Einheit	58
7.1.1	Kondensator-Module	58
7.1.1.1	Mechanischer Aufbau der Kondensator-Module	58
7.1.1.2	Elektrische Verschaltung der Kondensator-Module	62
7.1.1.3	Zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen für den Langzeitstrom-Generator	67
7.1.1.4	Überblick über den Aufbau der Kondensator-Module	70
7.1.2	Hochspannungs-Ladegerät	72
7.2	Stromformungs-Einheit	73
7.2.1	Widerstandskaskade und Systemschalter	74
7.2.1.1	Aufbau der Widerstandskaskade	75
7.2.1.2	Verbindung zwischen der Widerstandskaskade und den Strom-formenden-Schaltern	80
7.2.1.3	Aufbau des Schalter-Bereichs mit den Systemschaltern	82
7.2.1.4	Übersicht über den Aufbau der Widerstandskaskade und der Systemschalter	84
7.2.2	Induktivität des Langzeitstrom-Generators	85
7.3	Langzeitstrom-Generator in der Hochspannungshalle	87
<u>8.</u>	<u>Triggerung des Langzeitstrom-Generators</u>	88
8.1	Auslösung des Langzeitstrom-Generators über einen mechanischen Einschalter	88

8.1.1	Bestimmung der Schaltverzugszeiten der mechanischen Schalter	89
8.1.2	Einbau des mechanischen Einschalters	90
8.2	Auslösung des Langzeitstrom-Generators über einen Funkenstrecken-Schalter	91
8.2.1	Auswahl des Funkenstrecken-Schalters	92
8.2.2	Einbau des Funkenstrecken-Schalters	93
8.2.3	Technische Realisierung der elektrischen Triggerung	94
8.3	Triggerung des Langzeitstrom-Generators bei Kombination mit dem Stoßstrom-Generator	96
<u>9.</u>	<u>Steuerung und Sicherheitsmaßnahmen für den Langzeitstrom-Generator</u>	99
9.1	Sicherheitsmaßnahmen für den Langzeitstrom-Generator	101
9.2	Steuerung des Langzeitstrom-Generators	103
9.2.1	Steuerung des Hochspannungs-Ladegeräts	103
9.2.2	Steuerung der Systemschalter	104
9.3	Verkabelung und Schirmung	108
<u>10.</u>	<u>Messsystem und Prüfaufbau</u>	110
10.1	Messsystem	111
10.2	Verbindung zwischen Langzeitstrom-Generator und Prüffeld	115
10.3	Aufbau des Prüffeldes	116
<u>11.</u>	<u>Technische Daten des Langzeitstrom-Generators</u>	118
11.1	Kennwerte des Langzeitstrom-Generators	118
11.1.1	Gesamtkapazität, Energie und Ladung des Langzeitstrom-Generators	119
11.1.2	Induktivität des Langzeitstrom-Generators	119
11.1.3	Langzeitstrom-Generator bei Verwendung der kompletten externen Spulenordnung	121
11.1.4	Langzeitstrom-Generator ohne Verwendung der externen Spulenordnung	123
11.2	Nachbildung von Langzeitströmen nach Blitzschutz-Normen	124

11.2.1	Langzeitströme nach VDE 0185-305-1 / EUROCAE ED-84, Komponente C	125
11.2.2	Langzeitstrom nach EN IEC 61400-24 für exponierte Windkraftanlagen	129
11.2.3	Kombinierte Stoß- und Langzeitströme	130
11.2.3.1	Kombinierte Stoß- und Langzeitströme nach VDE 0185-305-1	130
11.2.3.2	Komponente A und B+C* nach EUROCAE ED-84	131
12.	<u>Untersuchungen an Metallstrukturen mit Hilfe des neuen Langzeitstrom-Generators</u>	132
12.1	Überblick über bisherige Untersuchungen mit Langzeitströmen	133
12.2	Übersicht über die experimentellen Untersuchungen	135
12.3	Ergebnisse der Untersuchungen an unbeschichteten Aluminium-Platten	138
12.3.1	Schadensbild Klasse 1: Oberflächliche diffuse Anschmelzungen	138
12.3.2	Schadensbild Klasse 2: Aufschmelzungen	140
12.3.3	Schadensbild Klasse 3: Lochbildung	142
12.3.4	Schadensbild Klasse 4: Oberflächliche lokal umrissene Anschmelzungen	144
12.3.5	Häufigkeit des Auftretens der Schadensbilder entsprechend der Klassen	144
12.3.6	Geschmolzenes Volumen	145
12.4	Ergebnisse der Untersuchungen an beschichteten Aluminium-Platten	146
12.5	Bestimmung des Anoden-/Kathodenspannungsfalls aus den Untersuchungen mit der indirekten Elektrode	148
12.6	Ergebnisse der ergänzenden Untersuchungen mit einer direkten Elektrode	149
12.7	Vergleich der Ergebnisse bei direkter und indirekter Elektrode	150
12.8	Untersuchung des Lichtbogens mittels Hochgeschwindigkeitskamera	151
12.8.1	Spektralbereich der Aufnahmen mit der Hochgeschwindigkeitskamera	152
12.8.2	Verhalten des Zünddrahtes	152

12.8.3	Plasmakanal bei einem Langzeitstrom von 2 kA	153
12.8.4	Plasmakanal bei einem Langzeitstrom von 5 kA	154
12.9	Fazit der Untersuchungen	155
<u>13.</u>	<u>Abschließende Bemerkungen und Ausblick</u>	156
Danksagung		159
<u>Anhang A:</u>	<u>Zeitverlauf und Wirkungsparameter von Impulsströmen, erzeugt mit kapazitiven Impulsstrom-Generatoren</u>	161
A.1	Impulsstrom-Generatoren mit einfachem RLC-Kreis	161
A.1.1	Strom im aperiodisch gedämpften Fall	163
A.1.2	Strom beim aperiodischen Grenzfall	164
A.1.3	Strom im periodisch gedämpften Fall	165
A.1.4	Beispiel für die zeitlichen Stromverläufe	166
A.1.5	Strom im periodisch ungedämpften Fall	167
A.2	Impulsstrom-Generator mit Crowbar-Kreis	168
<u>Anhang B:</u>	<u>Blitzströme in der Normung</u>	171
B.1	Blitzströme gemäß VDE 0185-305-1 für bauliche Anlagen	171
B.1.1	Stoßströme nach VDE 0185-305-1	172
B.1.2	Langzeitströme nach VDE 0185-305-1	173
B.2	Zusätzliche Anforderungen an Windkraftanlagen nach DIN EN IEC 61400-24	174
B.3	Blitzschutz-Normen für militärische Anwendungen	175
B.4	Blitzströme nach EUROCAE ED-84 für fliegende Systeme	175
<u>Anhang C:</u>	<u>Stoßstrom-Generator</u>	178
C.1	Stoßstrom-Generator der Universität der Bundeswehr München	178
C.2	Messsystem für den Stoßstrom	180
C.3	Crowbar-Schalter des Stoßstrom-Generators	181
C.4	Überblick über die mit dem Stoßstrom-Generator realisierbaren Stoßströme	183

C.4.1	Stoßstrom mit der Impulsform 10/350 μ s für bauliche Anlagen	183
C.4.2	Stoßströme für experimentelle Untersuchungen an Flugzeugen	184
	Literaturverzeichnis	187
	Eigene Veröffentlichungen und Preise	200

Abbildungsverzeichnis

	Seite
2.1 Schematischer Aufbau einer Gewitterwolke mit oberem positiven und unterem negativen Ladungszentrum [18]	6
2.2 Klassifizierung der Erdblitz nach Polarität und Entladungsrichtung	8
2.3 Vergleich zwischen dem elektrischen Feld (Bild 2.3a) und dem Strom (Bild 2.3b) eines selbst-ausgelösten negativen Aufwärtsblitzes und dem elektrischen Feld (Bild 2.3c) und dem Strom (Bild 2.3d) eines fremd-ausgelösten negativen Aufwärtsblitzes nach [25]	9
2.4 Bidirektionaler Leader, der den Blitzeinschlag in ein Flugzeug einleitet	11
2.5 „Swept-channel“-Phänomen bei einem vom Blitz getroffenen Flugzeug	13
3.1 Blitz-Messeinrichtung der Universität der Bundeswehr München am Hohen Peißenberg, (a) Strommessung an der Spitze des Peißenbergturms und (b) Feldmesskabine in etwa 189 m Entfernung vom Turm	16
3.2 Schematische Darstellung des (betragsmäßigen) Stromverlaufs eines typischen negativen Aufwärtsblitzes [63]	18
3.3 Schematischer Verlauf eines ICC vom Typ „P“ (mit einleitendem Stromimpuls)	19
3.4 Am Peißenbergturm gemessener einleitender Stromimpuls mit überlagerten Schwingungen [25]	20
4.1 Indirekte Hochspannungs-Elektrode nach EUROCAE ED-84 [33] und EUROCAE ED-105 [75] mit einem Zünddraht über einer Aluminiumplatte als Prüfobjekt	23
4.2 Langzeitstrom, erzeugt vom bisher an der Universität der Bundeswehr München eingesetzten Langzeitstrom-Generator (720 V Generator-Spannung) mit (a) instabilem Verlauf (rote Kurve) und (b) mit frühzeitigem Erlöschen des Lichtbogens (blaue Kurve)	24
4.3 Blockschaltbild der Kombination aus Stoßstrom- und Langzeitstrom-Generator mit Entkopplungsinduktivität $L_{\text{Entkopplung}}$	26
4.4 Ersatzschaltbild des neuen Langzeitstrom-Generators	27

4.5	Infografik des Langzeitstrom-Generators mit peripheren Einrichtungen	31
5.1	Schematischer Stromverlauf ohne Betätigung eines Strom-formenden-Schalters (rote Kurve) und bei Betätigung von vier Strom-formenden-Schaltern (blaue Kurve)	32
5.2	Vereinfachtes Ersatzschaltbild des Langzeitstrom-Generators mit der Kapazität C_L , den Strom-formenden Widerständen (R_{L-1} - R_{L-n}) und den Strom-formenden-Schaltern (S_{L-1} , S_{L-2} , S_{L-3} , S_{L-4}) sowie dem Ausschalter S_{L-P} und dem Prüfobjekt P	33
5.3	Beispielhafte Konfiguration der Strom-formenden-Schalter und Widerstände bei Nachbildung eines Langzeitstroms entsprechend Gefährdungspegel LPL I	38
5.4	Idealisierter Verlauf des Langzeitstroms bei Einsatz von vier Strom-formenden-Schaltern und dem Ausschalter (S_{L-1} , S_{L-2} , S_{L-3} , S_{L-4} , S_{L-P})	41
5.5	Schematische Zeichnung eines Einzel-Widerstands (R_{L-v}) bestehend aus 6 kreisrunden Keramik-Scheiben-Widerständen mit Mittenloch und 2 Kupferplatten zur Kontaktierung der Ober- und Unterseite	42
6.1	Ersatzschaltbild des Langzeitstrom-Generators mit kaskadenartig aufgebauten externen Widerständen R_{L-0} bis R_{L-4}	43
6.2	Simulationsergebnis für einen Langzeitstrom mit einer Ladung von 495 C bei Verwendung von drei Schaltern zur Erzeugung eines näherungsweise rechteckförmigen Stromverlaufs ($U_{L/0} = 2,25 \text{ kV}$, $C_L = 0,22 \text{ F}$)	48
6.3	Simulationsergebnisse für die Langzeitströme nach VDE 0185-305-1 gemäß den Gefährdungspegeln LPL I, LPL II und LPL III	49
6.4	Nachbildung eines Langzeitstroms nach VDE 0185-305-1, LPL I [31] bei Verwendung von vier Strom-formenden-Schaltern und bei Stromabschaltung nach 500 ms	50
6.5	Simulation der kombinierten Stromkomponente $B + C^*$ bei einer Kapazität von 17,4 mF und einer Ladespannung von 1,7 kV (blaue Kurve) und 2,0 kV (schwarze Kurve)	51
6.6	Ergebnisse der rechnerischen Simulation für die maximal möglichen Langzeitströme in Abhängigkeit von der Anzahl der verwendeten Kondensatoren	52
6.7	Vereinfachtes Simulationsmodell für das Programm CONCEPT II	55

7.1	Schematische Darstellung des Aufbaus des Langzeitstrom-Generators in der Hochspannungshalle der Universität der Bundeswehr München	57
7.2	Schematischer Aufbau eines Kondensator-Modul-Gestells	59
7.3	Skizze der Draufsicht auf das Kondensator-Modul 1 und das Sondermodul mit trennbaren Kondensator-Strang-Verbindungen	60
7.4	Skizze der Vorderansicht der gestapelten Kondensator-Module 1 bis 4 mit Verbindungen zwischen den Modulen	61
7.5	Skizze der Verschaltung eines Kondensator-Moduls mit Entlade- (rot), Lade- (blau) und Erdungsschiene (grün)	63
7.6	Ersatzschaltbild des Erdungssystems der Module während der Versuche bei geöffneten Erdungsschaltern	64
7.7	Ersatzschaltbild des Kondensator-Moduls 1 mit den rot markierten Trennstellen für die drei Kondensator-Stränge während der Versuche mit geöffneten Erdungs- und Zu-Schaltern	65
7.8	Fotografische Aufnahmen (a) des Zu-Schalters S_{L-Zu} und (b) des Erdungsschalters $S_{L-Erdung}$	66
7.9	Spannungsanzeige neben dem Erdungsschalter eines Kondensator-Moduls	68
7.10	Elektrische Anschlüsse der Kondensatoren eines Kondensatoren-Stranges mit Kennzeichnung der sicherheitsrelevanten Verbindungen durch roten Siegelack	69
7.11	Verschaltung der Anschlüsse und Anbauten am Kondensator-Modul 1	70
7.12	Übersicht über die Kondensator-Module und ihre Verschaltungen	71
7.13	Fotografische Aufnahme des Hochspannungs-Ladegeräts: (a) Rückseite des Hochspannungs-Ladegeräts (b) Vorderseite des Hochspannungs-Ladegeräts	73
7.14	Schematische Darstellung der auf einem gemeinsamen Gestell aufgebauten Widerstandskaskade und Systemschalter	74
7.15	Bildausschnitt aus der Widerstandskaskade	75
7.16	Fotografische Aufnahme der Widerstandstürme mit dahinterliegender mehrlagiger Verteilerschiene	77
7.17	Abgriffe an den Kupferplatten für die Strom-formenden-Schalter und zur Einstellung des Gesamtwiderstandes	78

7.18	Vorderseite der Widerstandstürme mit den davor befindlichen Installationen zur Stromentnahme	79
7.19	Schematische Darstellung des Anschlusses einer Stufe der Widerstandskaskade an die Ausgangsschiene	80
7.20	Schematische Darstellung des Verbindungsbereichs zwischen der Widerstandskaskade und den Strom-formenden-Schaltern	81
7.21	Verbindungsbereich mit angeschlossenen Verbindungsleitungen zwischen Schaltschiene und Verteilerschiene	81
7.22	Schalter-Bereich mit den Systemschaltern	82
7.23	Fotografische Aufnahme (a) des Einschalters und (b) des Ausschalters des Langzeitstrom-Generators	83
7.24	Übersicht über den Aufbau der Widerstandskaskade mit der Einheit für die Hochspannungsschalter	84
7.25	Schematische Darstellung der modular aufgebauten Induktivität des Langzeitstrom-Generators	85
7.26	Fotografische Aufnahme der modular aufgebauten Induktivität auf einem hölzernen Rahmengestell	86
7.27	Fotografische Aufnahme des Langzeitstrom-Generators in der Hochspannungshalle der Universität der Bundeswehr München	87
8.1	Steuerung des Langzeitstrom-Generators über mechanische (System)-Schalter	89
8.2	Einbau des mechanischen Einschalters $S_{L-Zünd}$	90
8.3	Auslösung des Langzeitstrom-Generators über Funkenstrecken-Schalter	91
8.4	Funkenstrecken-Schalter mit Ausschmelzungen an den Kugelkalotten-Elektroden aus Wolfram-Kupfer	92
8.5	Funkenstrecken-Schalter mit Stangen-Elektroden aus Wolfram-Kupfer	93
8.6	Einbau des Funkenstrecken-Schalters	94
8.7	Umsetzer mit Trigger-Transformator	95
8.8	Anbindung des Marx-Generator an den Funkenstrecken-Schalter	96
8.9	Prüffeld mit Anschlüssen an den Stoßstrom- und Langzeitstrom-Generator	97
8.10	Auslösung des Langzeitstrom-Generators bei Kombination mit dem Stoßstrom-Generator	98
9.1	Überblick über die niederspannungsseitigen Maßnahmen für die Steuerung und die Sicherheit des Langzeitstrom-Generators	99

9.2	19“-Schaltschrank mit den Komponenten zur Steuerung des Hochspannungs-Ladegeräts und der Systemschalter und zur Gewährleistung der Sicherheit des Langzeitstrom-Generators	100
9.3	Ablaufdiagramm für die Erweiterung des Sicherheitskreises	101
9.4	Sicherheitsvorrichtung und Überwachungsgerät des Interlock-Schalters	102
9.5	Fernsteuerung des Ladegeräts und das darüber installierte Digital-Voltmeter für die Kontroll-Spannungsmessung	103
9.6	Ablaufdiagramm der zeitlichen Steuerung der Systemschalter	104
9.7	Ablaufplan der SPS-Steuerung mit zwei LOGO!-Systemen	105
9.8	Aufbau der SPS-Steuerung	106
9.9	Stromlaufplan SPS-Steuerung	107
9.10	Im Schaltschrank installierte SPS-Steuerung mit dem darunter befindlichen Gerät „Systemschalter Auswahl“	108
9.11	Schutz der Kabel durch Führung (a) in einem geschirmten, im Hallenboden eingelassenen Kabelkanal, (b) in einer Kabelbrücke am Hallenboden	109
9.12	Schalt-Verteiler, unterteilt in einen Bereich für die sicherheitstechnischen Leitungen und einen Bereich für die Leitungen von der SPS-Steuerung	109
10.1	Messwerterfassung von Langzeit- und Stoßströmen mithilfe eines vierkanaligen Digitaloszilloskops	111
10.2	Ersatzschaltbild des Langzeitstrom-Generators mit zwei verschiedenen Positionen für den Einbau des Messwiderstands	112
10.3	Einbau des Messwiderstandes mit Verbindung zum LWL-System vom Typ ISOBE	113
10.4	Geschirmte Messkabine mit Mias-System und LWL-System	114
10.5	Verbindung vom Langzeitstrom-Generator zum Prüffeld mithilfe einer an der Wand der Hochspannungshalle angebrachten Kupferleitung	115
10.6	Prüffeld mit Prüfplatte und darüber befindlicher Hochspannungs-Elektrode zur Einspeisung des Prüfstroms	116
10.7	Prüffeld mit PVC-Einhausung	117
11.1	Ersatzschaltbild des Langzeitstrom-Generators mit angeschlossenem Stoßstrom-Generator	119
11.2	Zeitlicher Verlauf des Stroms zur Bestimmung der maximalen Induktivität des Langzeitstrom-Generators	121

11.3	Zeitlicher Verlauf des maximal erreichbaren Stroms ($i_{L-max} = 15,1 \text{ kA}$) bei Verwendung aller 50 Kondensatoren des Langzeitstrom-Generators und der kompletten externen Spulenanordnung ($U_{L/0} = 2,25 \text{ kV}$)	123
11.4	Zeitlicher Verlauf des maximal erreichbaren Stroms ($i_{L-max} = 23,6 \text{ kA}$) bei Verwendung aller 50 Kondensatoren des Langzeitstrom-Generators und ohne externe Spulenanordnung ($U_{L/0} = 2,25 \text{ kV}$)	124
11.5	Zeitlicher Verlauf des Langzeitstroms des Gefährdungspegels LPL I vor der Filterung (orange Kurve) und nach der Filterung (blaue Kurve) mit einem Tiefpass mit der oberen Grenzfrequenz von 100 Hz	126
11.6	Zeitlicher Verlauf des Langzeitstroms des Gefährdungspegels LPL II nach Filterung mit einem 100 Hz-Tiefpass	127
11.7	Zeitlicher Verlauf des Langzeitstroms des Gefährdungspegels LPL III/IV nach Filterung mit einem 100 Hz-Tiefpass	127
11.8	Zeitlicher Verlauf des Langzeitstroms nach VDE 0185-305-1, LPL I bzw. der Komponente C nach EUROCAE ED-84 bei Verwendung eines Strom-formenden-Schalters und nach Filterung mit einem 100 Hz-Tiefpass	128
11.9	Zeitlicher Verlauf des Langzeitstroms nach VDE 0185-305-1, LPL I bzw. der Komponente C nach EUROCAE ED-84 bei Verwendung von vier Strom-formenden-Schaltern und nach Filterung mit einem 100 Hz-Tiefpass	129
11.10	Langzeitstrom nach der Norm EN IEC 61400-24 [32]	129
11.11	(a) Stoßstroms und (b) Langzeitstrom nach der Norm VDE 0185-305-1, LPL III/IV	130
11.12	(a) Stoßstrom der Komponente A und (b) Langzeitstrom der kombinierten Komponente B+C* nach EUROCAE ED-84	131
12.1	Schäden durch (a) einen typischen Stoßstrom und (b) einen typischen Langzeitstrom an einer 1 mm dicken Aluminium-Platte	134
12.2	Prüfaufbau mit indirekter Hochspannungs-Elektrode und Aluminium-Platte als Prüfobjekt in einem Messing-Rahmen	137

12.3	Schäden auf der Vorderseite der Aluminium-Platte entsprechend dem Schadensbild der Klasse 1 (oberflächliche diffuse Anschmelzungen) (a) mit der Ausprägung 1 (leichte Verfärbungen) und (b) mit der Ausprägung 2 (großflächige, fleckige Schäden)	139
12.4	Beispielhafte Darstellungen der Schäden entsprechend dem Schadensbild der Klasse 1 und der Ausprägung 2	140
12.5	Schadensbild der Klasse 2 mit Aufschmelzungen (a) auf der Vorderseite und (b) auf der Rückseite der Aluminium-Platte	141
12.6	Schadensbild der Klasse 2 (a) mit fünf Bereichen mit Aufschmelzungen (rote Markierungen 1 ... 5) und (b) einem einzigen Bereich mit einer Aufschmelzung	141
12.7	Schematische Darstellung des aufgeschmolzenen Aluminiumvolumens V_L	142
12.8	Zwei Beispiele für das Schadensbild der Klasse 3 mit (a,c) Lochbildung auf der Vorderseite und (b,d) abgetropftem Aluminium auf der Rückseite der Aluminiumplatte	143
12.9	Schematische Darstellung des ausgeschmolzenen Volumens bei Lochbildung	143
12.10	Typisches Schadensbild der Klasse 4 mit (a) oberflächlicher lokaler Anschmelzung auf der Vorderseite und (b) unbeschädigter Rückseite	144
12.11	Typisches Schadensbild der Klasse 2 (a) auf der beschichteten Vorderseite und (b) der unbeschichteten Rückseite	147
12.12	Typisches Schadensbild der Klasse 3 (a) auf der beschichteten Vorderseite und (b) der unbeschichteten Rückseite	147
12.13	Anoden-/Kathodenspannungsfall $u_{a/c}$ (Messpunkte und Ausgleichsgeraden) in Abhängigkeit vom Langzeitstrom i_L bei direkter und indirekter Hochspannungs-Elektrode	151
12.14	Aufnahme des Lichtbogens mit der Hochgeschwindigkeitskamera (a) ohne Verwendung eines Spektralfilters und (b) bei Verwendung eines Spektralfilters	152
12.15	Schmelzvorgang des Zünddrahts (a) zu Beginn und (b) 153 μ s später	153
12.16	Lichtbogen zwischen indirekter Hochspannungs-Elektrode und Aluminium-Platte bei einem Langzeitstrom von ~ 2 kA	153
12.17	Typisches Verhalten des Lichtbogens bei einem Langzeitstrom von ~ 5 kA	154

A.1	Ersatzschaltbild eines Impulsstrom-Generators mit einfachem RLC-Kreis	161
A.2	Stromverläufe bei $C = 10 \mu\text{F}$, $L = 10 \mu\text{H}$ und $U_{C/0} = 10 \text{ kV}$ für a) den periodisch gedämpften Fall ($R = 0,2 \Omega$) b) den aperiodischen Grenzfall ($R = 2 \Omega$) c) den aperiodisch gedämpften Fall ($R = 4 \Omega$)	167
A.3	Ersatzschaltbild des Impulsstrom-Generators mit Crowbar-Kreis	168
A.4	Zeitlicher Verlauf des Stroms bei Einsatz des Crowbar-Schalters (blaue Linie) und ohne Einsatz des Crowbar-Schalters (schwarze Linie)	169
B.1	Definition des Stoßstroms nach VDE 0185-305-1	172
B.2	Schematischer Verlauf des Langzeitstroms nach VDE 0185-305-1	174
B.3	Schematischer Verlauf des Vierkomponenten-Stroms bestehend aus den Stromkomponenten A, B, C und D	176
C.1	Ersatzschaltbild des an der Universität der Bundeswehr München betriebenen Stoßstrom-Generators	179
C.2	Draufsicht auf den Stoßstrom-Generator mit den Einzel-Generatoren „Master“ und „Slave“ sowie dem gemeinsamen Einspeisepunkt	180
C.3	Strommonitor vom Typ Pearson Model 2093 unterhalb der Prüfplatte	181
C.4	Aufbau des Crowbar-Schalters	182
C.5	Einzel-Generatoren „Master“ und „Slave“ mit je einem Crowbar-Schalter sowie dem dazwischen liegendem Prüffeld	182
C.6	Beispielhafter Stoßstrom des positiven Erstblitzes nach [31]	183
C.7	Beispiel für die periodisch gedämpfte Stoßstrom-Komponente A	184
C.8	Beispiel für die unipolare Stoßstrom-Komponente A	185
C.9	Beispielhafte Stoßstrom-Komponente D nach [87] [33]	185

Tabellenverzeichnis

		Seite
3.1	Parameter des ICC aus 204 Messungen am Peißenbergturm MIN: Minimalwert AM: Arithmetischer Mittelwert MAX: Maximalwert GM: Geometrischer Mittelwert	17
3.2	Parameter der am Peißenbergturm zwischen 1997 und 2022 gemessenen einleitenden Stromimpulse negativer Aufwärtsblitze	19
3.3	Parameter der am Peißenbergturm zwischen 1997 und 1999 gemessenen ICC positiver Aufwärtsblitze [56] [72]	21
5.1	Vergleich der idealisierten Widerstandswerte mit den im praktischen Aufbau verwendeten Widerständen entlang der Widerstandskaskade	37
6.1	Langzeitströme in der Normung	46
6.2	Langzeitströme mit reduzierten Anforderungen nach [33]	46
6.3	Schaltzeiten (t_{L-1} , t_{L-2} , t_{L-3}) der Schalter (S_{L-1} , S_{L-2} , S_{L-3}) und die von ihnen herausgeschalteten Widerstände (R_{L-1} , R_{L-2} , R_{L-3})	48
6.4	Kenngrößen der simulierten Langzeitströme nach VDE 0185-305-1	49
7.1	Einzel- und Summen-Widerstand der Widerstandskaskade entsprechend den Messungen	76
8.1	Gemessene Schaltverzugszeit und Abweichung gegenüber dem Datenblatt	90
11.1	Aus Versuchen ermittelte maximal mögliche Ströme in Abhängigkeit von der Anzahl der Kondensatoren und der verwendeten Module (R_L : Widerstand des Langzeitstromgenerators)	122
11.2	Parameter der Prüfströme der Gefährdungspegel LPL I bis III/IV	126
12.1	Prüfplan zur Untersuchung der beschichteten und unbeschichteten Aluminium-Platten mit Langzeitströmen (Ladung $Q_L = 200 \text{ C} \pm 20 \%$)	136
12.2	Parameter der Langzeitströme aus den Versuchsreihen 1 bis 9 an beschichteten und unbeschichteten Aluminium-Platten	138
12.3	Schäden entsprechend den Schadensbild (SB)-Klassen 1 bis 4 bei den Versuchen mit unbeschichteten Aluminium-Platten. Die Zahlen in den Kästchen entsprechen der Häufigkeit des Auftretens	145

12.4	Mittleres aufgeschmolzenes Volumen (V_L) bei den Versuchsreihen 1 bis 6, wobei zwischen den Schadensbildern der Klasse 2 ($V_{L\text{-Kein-Loch}}$) und der Klasse 3 ($V_{L\text{-Loch}}$) unterschieden ist	146
12.5	Mittleres geschmolzenes Volumen (V_L) bei den Versuchsreihen 7 bis 9	148
12.6	Kennwerte aus den Versuchsreihen 1 bis 9 und der daraus mit Gleichung (12.1) abgeleitete Anoden-/Kathodenspannungsfall $u_{a/c}$ (Elektrodenabstand: 5 cm)	149
12.7	Kennwerte aus den Zusatzversuchen mit direkter Elektrode und der daraus mit Gleichung (12.1) abgeleitete Anoden-/Kathodenspannungsfall $u_{a/c}$	150
A.1	Stromparameter für den aperiodisch gedämpften Fall nach [6]	164
A.2	Stromparameter für den aperiodischen Grenzfall nach [6]	165
A.3	Stromparameter für den periodisch gedämpften Fall nach [6]	166
A.4	Ladung und spezifische Energie des Impuls-Generators mit Crowbar-Kreis nach [6]	170
B.1	Stoßstromparameter für Prüfzwecke nach VDE 0185-305-1 für die vier Gefährdungspegel LPL I - IV	173
B.2	Parameter des Langzeitstroms nach VDE 0185-305-1 für die vier Gefährdungspegel LPL I - IV	174
B.3	Parameter der Stromkomponenten A, B, C und D nach EUROCAE ED-84 [33]	177

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen, Formelzeichen und Indizes

Abkürzungen

BNC	B ayonet Neill-Concelman
CC	C ontinuing C urrent (z.Dt. Langzeitstrom)
CFK	C arbonfaserverstärkter K unststoff
DGL	D ifferential g leichung
EMV	E lektrom m agnetische V erträglichkeit (Electromagnetic Compatibility)
GFK	G lasfaserverstärkter K unststoff
ICC	I nitial C ontinuous C urrent (z.Dt. Einleitender Langzeitstrom)
LPL	L ightning P rotection L evel
LWL	L ichtwellenleiter
NATO	N orth Atlantic T reaty O rganization
NGF	N ext G eneration F ighter
SB-Klasse	S chadens b ild- K lasse
SPS	S peicher p rogrammierbare S teuerung

Formelzeichen

		Einheit
A	Prozentuale Abweichung	
C	Kapazität	F
i	Strom	A
L	Induktivität	
L _{Entkopplung}	Entkopplungsinduktivität	H
p	Prozentuale Abnahme	
P	Prüfobjekt	
Q	Ladung	C
R	Widerstand	Ω
R _L -Kondensator	Widerstand an den Kondensatoranschlüssen des Langzeitstrom-Generators	Ω

R_{Vor}	Vorwiderstand	Ω
S	Schalter	
$S_{\text{L-Zu}}$	Zu-Schalter von zuvor entfernten Kondensatoren des Langzeitstrom-Generators	
t	Zeit	s
T_1	Stirnzeit	μs
T_1/T_2	Impulsform aus Stirn- und Rückenhalbwertszeit	μs
T_2	Rückenhalbwertszeit	μs
$t_{\text{ICC-I}}$	Zeitdauer des ICC Impulses	s
$t_{\text{L-end}}$	Ende Langzeitstrom (Schaltzeitletzter Schalter)	s
u	Spannung	V
$U_{\text{C/0}}, U_{\text{L/0}}$	Lade-/Anfangsspannung	V
$u_{\text{a/c}}$	Anoden-/Kathodenspannungsfall	V
V	Volumen	mm^3
W/R	Spezifische Energie	J
τ	Zeitkonstante	

Verwendete Indizes

0	Wert zum Zeitpunkt $t = 0$
10 %	10 % - Grenze
Crowbar-Kreis	Parameter im Crowbar-Kreis
CS	Parameter für den Crowbar-Schalter
CS-Kreis	Parameter für den Crowbar-Kreis
EB	Parameter des Erstblitzes nach Blitzschutz-Normen
eing.	Eingestellter Wert
Erdung	Parameter für einen Erdungsvorgang
ex	Äußerer Parameter
gem.	Gemessener Wert
i	Innerer Parameter
ICC	Parameter des ICC
ICC-Impuls	Parameter des ICC-Impulses

L	Parameter des Langzeitstroms/Langzeitstrom-Generators
M/1-5	Parameter der Kondensator-Module 1 bis 5
max	Maximalwert
min	Minimalwert
mittel	Mittelwert
n	Anzahl
P	Parameter des Prüfobjekt
RLC-Kreis	Parameter im RLC-Kreis
S	Parameter des Stoßstroms bzw. des Stoßstrom-Generators
Sp	Parameter zur Kennzeichnung der Spule
SZ	Schaltzeit
Verzug	Schaltverzug
Zünd	Einschalter eines Generators
v	v-te Stufe Widerstandskaskade

1. Einleitung

Blitze gibt es schon seit Urzeiten, noch lange bevor es Menschen auf der Erde gab. Es wird angenommen, dass Blitzentladungen erst die Entstehung des Lebens ermöglicht haben. Sie haben vermutlich die notwendigen chemischen Reaktionen hervorgerufen, um die Grundbausteine des Lebens zu bilden [1].

Die Menschen sind vom Blitzphänomen seit jeher gleichermaßen fasziniert wie bedroht. Als scheinbar unkontrollierbares Phänomen mit zerstörerischer Wirkung wurde Blitzen lange ein göttlicher Ursprung zugesprochen. Das mag auch der Grund sein, warum man Blitzsymbole als Zeichen der Macht in vielen Religionen und Mythen wiederfindet. Ein bekanntes Beispiel aus der nordgermanischen Mythologie ist der berühmte Donnergott Thor. Ein Mythos besagt, dass es ein Donnern erzeugt, wenn Thor mit seinem Wagen über die Wolken fährt und, wenn er seinen Hammer Mjölner wirft, dieser Blitze hinter sich nachzieht. Seine Macht über Blitz und Donner macht ihn folglich zu einem der mächtigsten Götter [2].

Mit Erfindung der Leydener Flasche (1746) [3] [4] und den damit verbundenen Versuchen mit Reibungselektrizität wurde der erste Schritt zur Entmythologisierung des Blitzphänomens getan. Die durch die Reibungselektrizität entstandenen elektrischen Funken wurden mit natürlichen Blitzen verglichen, und es wurde vermutet, dass sie gleichen Ursprungs seien. Um diese Vermutung zu erhärten, schlug Benjamin Franklin im Jahr 1750 ein Experiment vor, das heute als Schilderhaus-Experiment bekannt ist. Dazu sollte aus einer langen Eisenstange, die an einem Schilderhaus (einem kleinen Wachhäuschen) installiert war, bei einem darüber ziehenden Gewitter Funken gezogen werden. Dieser Versuch wurde schließlich in abgewandelter Form im Jahr 1752 in Marly La-Ville, einem Ort nahe bei Paris, unter Anleitung des Botanikers und Physikers Dalibard durchgeführt: Aus einer 12 m hohen Eisenstange konnten bis zu 4 cm lange Funken gezogen werden, womit der Nachweis für die elektrische Natur von Gewittern erbracht war [5]. Benjamin Franklin selbst hat kurz darauf einen ähnlichen Versuch durchgeführt, bei dem er einen Drachen bei einem Gewitter aufsteigen ließ und es ihm gelang, aus der daran befestigten Drachenschnur Funken zu ziehen.

Noch im selben Jahr wurde von Benjamin Franklin vorgeschlagen, Blitze mit metallenen Leitern einzufangen, sie um das Gebäude herumzuführen und in die Erde einzuleiten. Mit dieser Idee war der moderne Blitzschutz geboren: Ziel desselben ist, den Blitzstrom über die Fangeinrichtung, Ableitungs- und Erdungsanlage äußerlich um das Gebäude zu führen und sicher in die Erde einzuleiten. Diese äußere Blitzschutzanlage wird heutzutage durch eine innere Blitzschutzanlage ergänzt, um gefährliche Funkenbildung zu

vermeiden. Maßnahmen hierzu sind die Installation eines Blitzschutz-Potentialausgleichs innerhalb des Gebäudes und die elektrische Isolation der äußeren Blitzschutzanlage gegenüber metallenen Installationen innerhalb des Gebäudes [6] [7] [8].

Die Blitzschutzanlage dient vornehmlich dem Schutz der baulichen Anlage gegen materielle Schäden wie Brand und mechanische Zerstörungen. Ein Schutz gegenüber Störungen, Zerstörungen und Funktionsausfällen von elektrischen, elektronischen und informationstechnischen Systemen ist damit allerdings nicht gewährleistet. Hierfür sind ergänzende Maßnahmen erforderlich (siehe [9] [10]).

Ergänzende Maßnahmen sind auch erforderlich bei besonders gefährdeten hohen Bauwerken, die aufgrund der Feldüberhöhung an ihrer Spitze sogenannte Aufwärtsblitze auslösen. Die zusätzliche Gefährdung resultiert daraus, dass diese Blitze weitaus häufiger an solchen exponierten Objekten einschlagen und eine höhere zerstörerische Wirkung entfalten können. Beispielsweise wurden mit dem Aufschwung der Windenergie in den 90-er Jahren des vergangenen Jahrhunderts immer leistungsfähigere Windkraftanlagen installiert. Bei solchen modernen leistungsstarken Windkraftanlagen, die inzwischen Nennleistungen von einigen Megawatt und Bauhöhen über 200 m erreichen, ist mit mehr als etwa 10 Blitzeinschlägen pro Jahr zu rechnen. Die Blitzeinschläge erfolgen vornehmlich in die Rotorblätter und verursachen nicht nur dort Schäden wie den Brand und die Delamination der aus Faserverbundwerkstoffen (CFK, GFK) bestehenden Rotorflügel. Typische Schäden sind auch Ausfälle der elektrischen und elektronischen Systeme und Getriebeschäden durch Metallausschmelzungen infolge des Stromflusses über die Getriebeteile [11].

Ein ähnliches Schadens-Szenario ist auch an Flugzeugen zu beobachten, wenn sie sich Gewitterwolken nähern. Durch die dort herrschenden hohen elektrischen Felder werden vornehmlich von den Extremitäten (der Flugzeuge) Blitzentladungen ausgelöst, die im Wesentlichen mit den Aufwärtsblitzen an hohen Bauwerken vergleichbar sind. Typische Schäden sind die Durchlöcherung und die Delamination der Radarnase sowie materielle Schäden an der Flugzeug-Außenhaut, insbesondere dann, wenn sie nicht aus metallenen Material, sondern aus Gründen der Gewichtersparnis aus Faserverbund-Werkstoffen besteht [12].

Einer besonderen Gefährdung sind Militärflugzeuge ausgesetzt, wenn sie als Tarnkappen-Flugzeuge ausgeführt sind. Mit der Tarnkappentechnik wird einerseits erreicht, dass die Radar-Ortung erschwert wird, indem radarabsorbierendes Material auf die Außenhaut aufgebracht wird. Andererseits steht dies im Widerspruch zu den Erfordernissen des Blitzschutzes, wonach eine möglichst leitende metallene Verbindung entlang der

Flugzeugoberfläche geboten ist. Die gegensätzlichen Anforderungen bringen verschiedene Probleme mit sich, die individuell gelöst werden müssen [12].

Diese Anforderungen an besonders gefährdete Systeme und Anlagen bedingen eine erhöhte Schutzwürdigkeit mit entsprechenden Schutzmaßnahmen, die ggf. entwickelt und speziell angepasst werden müssen. Um die Wirkungsweise dieser Schutzmaßnahmen zu validieren, sind geeignete Prüfungen erforderlich. Um die Gefährdung durch die Blitzströme abzudecken, kommen zwei Arten von Strom-Generatoren zum Einsatz, der Stoßstrom-Generator und der Langzeitstrom-Generator. Mit den Stoßstrom-Generatoren werden die kurzzeitigen, extrem starken Stromimpulse einer Blitzentladung nachgebildet, die Stromwerte bis über 200 kA bei einer typischen Zeitdauer bis etwa einer Millisekunde erreichen können. Mit den Langzeitstrom-Generatoren werden hingegen die Stromkomponenten einer Blitzentladung nachgebildet, die bis über eine Sekunde dauern können und hierbei typische Werte von einigen hundert bis über ein Kilo-Ampere aufweisen können [13].

Die gegenwärtig verfügbaren Langzeitstrom-Generatoren sind allerdings in ihren Leistungsmerkmalen nicht für solch hohe Anforderungen ausgelegt. Üblicherweise ist die Generator-Spannung auf etwa 1 kV begrenzt, womit sich typischerweise nur Ströme bis einige 100 A erzeugen lassen. Beispielsweise beträgt die maximale Generator-Spannung des bisher an der Universität der Bundeswehr München betriebenen Langzeitstrom-Generators 720 V, womit sich Ströme bis etwa 500 A realisieren lassen. Hiermit kann man bestenfalls Prüfobjekte mit geringem Widerstand testen, Prüfobjekte mit etwas höherem Widerstand erfordern hingegen eine höhere Generator-Spannung.

Im Hinblick auf den Nutzen einer praktischen Anwendbarkeit ebnet dies den Weg für den Bau eines neuartigen Langzeitstrom-Generators mit wesentlich höheren Leistungsmerkmalen. Somit stellte sich in der vorliegenden Dissertation die sehr praktische Zielsetzung, dass die maximale Generator-Spannung auf 2,5 kV erhöht wird, um im Idealfall einen Langzeitstrom von über 20 Kilo-Ampere zu realisieren. Hierbei wurde ein vollkommen neues Konzept umgesetzt, sodass der Generator nicht nur die geforderten Leistungsmerkmale aufweist, sondern sich auch noch mit einem Stoßstrom-Generator kombinieren lässt, damit sich der Stoßstrom und der Langzeitstrom in einem kombinierten Versuch realisieren lassen.

Um an diese Thematik heranzuführen, wird im ersten Teil der vorliegenden Dissertation ein Überblick gegeben über die physikalischen Grundlagen eines Gewitters, die hierbei entstehenden Blitze und Blitzströme einschließlich ihrer Komponenten sowie deren Abbildung in der Normung. Der zweite Teil der Dissertation widmet sich dann der

Konstruktion, der Entwicklung und der Realisierung des Langzeitstrom-Generators. Dies schließt auch die erforderlichen Sicherheitsmaßnahmen ein, die für einen gefahrlosen Betrieb in redundanter Ausführung umgesetzt wurden.

Den Abschluss bilden Versuche, um die leistungsbezogenen Kenndaten und den Funktionsnachweis des neu konzipierten Langzeitstrom-Generators bei den verschiedenartigsten Anwendungen aufzuzeigen. Dazu wurden u.a. Versuche an 2 mm dicken beschichteten sowie auch unbeschichteten Platten aus Aluminium durchgeführt. Bei diesen Versuchen wurde der Strom bis auf 5 kA erhöht, um die Gültigkeit der in VDE 0185-305-1 niedergelegten Beziehung für die Ausschmelzungen an Metallstrukturen auch bei hohen Strömen zu überprüfen.

In diesem Kapitel wird ein Überblick gegeben über die physikalischen Grundlagen eines Gewitters, die hierbei entstehenden Blitze und Blitzströme einschließlich ihrer Komponenten und ihrer Abbildung in Normen.

2.1 Entstehung von Gewittern

Voraussetzung für die Entstehung einer Gewitterwolke, einer sogenannten Cumulonimbus-Wolke, ist, dass feuchtwarme Luftmassen in größere Höhen aufsteigen, wobei die in der Luft enthaltene Feuchtigkeit mit zunehmender Höhe kondensiert und so die Wolkenbildung herbeiführt. Je nach Region, Jahreszeit und Stärke erreicht die Gewitterwolke typische Höhen von 6 km bis 10 km, wobei besonders in tropischen Regionen darüber hinaus reichende Wolkenformationen möglich sind [14] [15].

Aufgrund des Mechanismus, der zum Aufsteigen der feuchtwarmen Luftmassen führt, werden vier Arten von Gewittern unterschieden: Bei den in Europa am häufigsten vorkommenden Kaltfront-Gewittern schieben sich die relativ schweren kalten Luftmassen eines einziehenden Tiefdruckgebietes unter vorhandene leichtere warme Luftmassen und drücken sie so empor. In Europa sind auch Wärme-Gewitter relativ häufig, die dadurch entstehen, dass intensive Sonneneinstrahlung die erdnahen Luftschichten erwärmt, wodurch sie leichter werden und infolgedessen aufsteigen. Sehr selten sind hingegen Warmfront-Gewitter, die entstehen, wenn feuchtwarme Luftmassen auf kalte Luftmassen aufgleiten und so in größere Höhen gelangen. Ein Sonderfall sind die orografischen Gewitter, die nur in bergigen Regionen möglich sind, wenn Luftmassen gegen Berghänge strömen und so hochgehoben werden. Typisch sind auch Mischformen, wenn sich beispielsweise die kalten Luftmassen eines Tiefdruckgebietes am Spätnachmittag unter durch die Sonneneinstrahlung bereits stark erwärmte Luftmassen schieben.

Innerhalb der Gewitterwolke kommt es durch verschiedene Effekte zur Ladungstrennung, wie insbesondere durch Reibungselektrizität infolge der Luftströmung, wenngleich die Ursachen hierfür nicht restlos geklärt sind. Als Resultat dieses Vorgangs bildet sich ein negatives Ladungszentrum, das typischerweise im unteren Bereich der Gewitterwolke etwa bei der -10°C -Isotherme bis zur -20°C -Isotherme lokalisiert ist, und darüberliegend ein positives Ladungszentrum, das sich in der Regel etwa bei der -40°C -Isotherme befindet [16] [17] (siehe Bild 2.1).

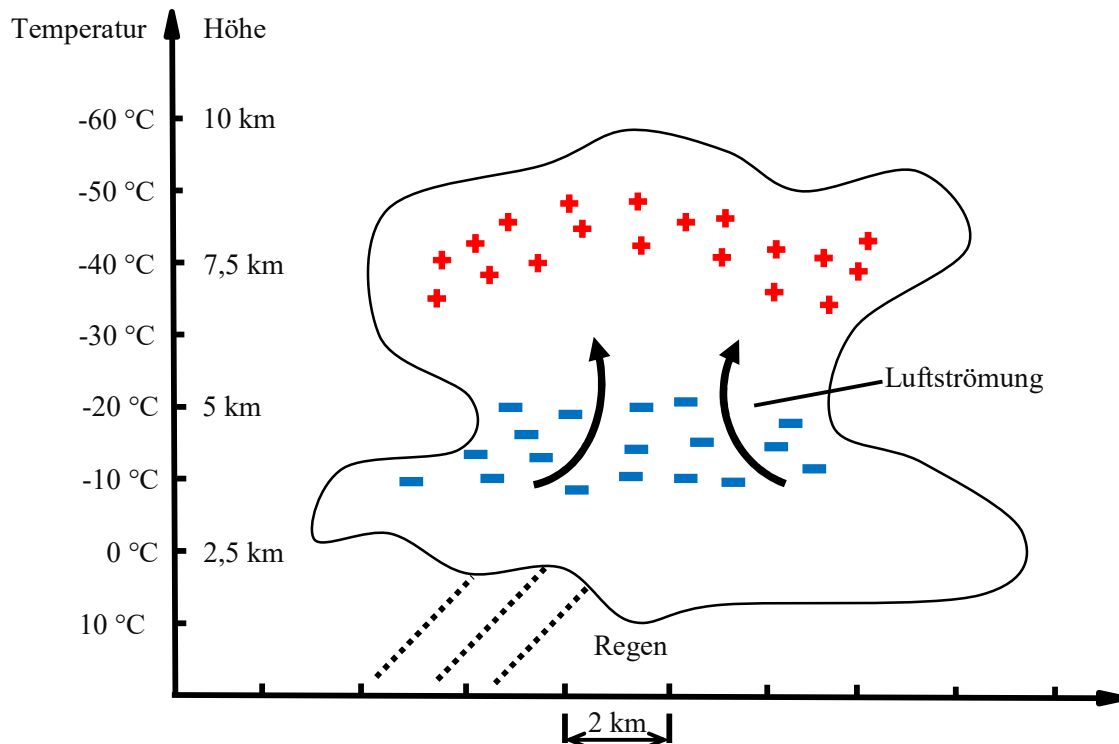


Bild 2.1 Schematischer Aufbau einer Gewitterwolke mit oberem positiven und unterem negativen Ladungszentrum [18]

2.2 Eigenschaften und Kenngrößen von Blitzen

2.2.1 Blitzentladungen zur Erde

Wenn im oberen positiven oder unteren negativen Ladungszentrum die elektrische Feldstärke einen kritischen Wert überschreitet, bildet sich von dort ein sogenannter Leader (bzw. Leitblitz) aus. Entwickelt sich der Leader zur Erde hin und erreicht die Erde, kommt es zur schlagartigen Entladung der im Leader mitgeführten Ladung. Die schlagartige Entladung äußert sich im Einschlagpunkt durch einen kurzzeitigen Stoßstrom, der maximale Stromwerte von über 200 kA erreichen und bis über eine Milli-Sekunde dauern kann. Aufgrund der gegenüber der Ausbildung des Leaders inversen Entladungsrichtung von der Erde zur Wolke wird dieser Vorgang üblicherweise als ‚return stroke‘ bezeichnet.

Der Vorgang kann sich mehrmals wiederholen, so dass sich nach dem Erstblitz weitere Folgeblitze mit Stoßströmen ausbilden können. Dies setzt allerdings voraus, dass der Blitzkanal nach der vorangegangenen Blitzentladung so sehr erkaltet d.h. die Ladungsträger rekombinieren, dass sich ein neuerlicher Leader zur Erde hin ausbilden

kann. Ist dies nicht der Fall, entsteht ein Langzeitstrom, der sich unmittelbar dem vorangegangenen Stoßstrom anschließt. Der Langzeitstrom, der auch CC (Continuing Current) genannt wird, wird unmittelbar aus der Wolkenladung gespeist, von wo aus die Ladung über den noch leitfähigen Blitzkanal zur Erde abgeführt wird. Typischerweise dauert dieser Vorgang und somit der Langzeitstrom einige 10 Millisekunden bis einige hundert Millisekunden, wobei typische Ströme von 10 A bis zu einigen 100 A fließen. Aufgrund der Richtung der Entwicklung des Leaders zur Erde hin, wird dieser Blitztyp als Abwärtsblitz oder Wolke-Erde-Blitz bezeichnet. Wird hierbei negative Wolkenladung zur Erde abgeführt, handelt es sich um einen negativen Abwärtsblitz (siehe Bild 2.2a), bei positiver Ladungsabfuhr spricht man von einem positiven Abwärtsblitz (siehe Bild 2.2b) [19] [20] [21].

Zwischen dem unteren Ladungszentrum und der Erde sind Potentialunterschiede bis zu etwa 100 MV möglich [18]. Die infolgedessen entstehenden hohen Feldstärken werden an den Spitzen hoher Gebäude verstärkt, so dass sich von dort bei Überschreiten einer kritischen Feldstärke ein aufwärts gerichteter Leader ausbilden kann. Wenn der Leader sich in Richtung der Gewitterwolke entwickelt, wird er auf der Erde als Aufwärtsblitz wahrgenommen. Aufgrund der Polarität der zur Erde abgeführten Ladung wird zwischen negativen Aufwärtsblitzen (siehe Bild 2.2c) und positiven Aufwärtsblitzen (siehe Bild 2.2d) unterschieden [19] [20] [21]. Dabei ist zu beachten, dass der Leader selbst invers geladen ist, d.h. ein negativer Aufwärtsblitz wird durch einen positiven Leader eingeleitet, während ein positiver Aufwärtsblitz einen negativen Leader aufweist.

Mit Ankunft des Leaders in der Gewitterwolke ändern sich die Verhältnisse. Denn nun besteht eine leitende Verbindung zwischen Wolke und Erde. Die nun folgenden Vorgänge entsprechen daher den Abwärtsblitzen, so dass sich nachfolgende Blitzentladungen mit Stoßströmen sowie Langzeitströme ausbilden können.

Das Phänomen der Aufwärtsblitze wurde erstmals am über 300 m hohen Empire State Building in New York beobachtet [22]. Untersuchungen haben gezeigt, dass Aufwärtsblitze zu ihrer Ausbildung mindestens eine Gebäudehöhe von etwa 100 m erfordern. An niederen Gebäuden sind hingegen Aufwärtsblitze eher unwahrscheinlich, da die geringe Gebäudehöhe üblicherweise einen zu geringen verstärkenden Einfluss auf das Blitzfeld ausübt. Als groben Schätzwert kann man bei einer Gebäudehöhe bis etwa 200 m von etwa 10 bis 20 Einschlägen pro Jahr ausgehen [23].

Da Blitze stets mit der Ausbildung eines Leaders beginnen, der sich stets in Richtung seiner Entwicklung verzweigt, lassen sich Auf- und Abwärtsblitze optisch unterscheiden: Bei Abwärtsblitzen sind die Verästelungen stets zur Erde hin gerichtet, während sie bei

den Aufwärtsblitzen stets zur Wolke hin gerichtet sind. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist die unterschiedliche erste Stromkomponente, die an der Einschlagstelle auf der Erde auftritt: Während Abwärtsblitze stets mit einem Stoßstrom beginnen, werden Aufwärtsblitze stets von einem Langzeitstrom eingeleitet.

Der einleitende Langzeitstrom von Aufwärtsblitzen, der auch als ICC (Initial Continuous Current) bezeichnet wird, hat seine Ursache in der Ladung, die der sich zur Wolke hin entwickelnde Leader mit sich führt. Der Leader wird hierbei kontinuierlich (mit inverser Ladung) aufgeladen, indem Ladung aus dem Leader zur Erde abfließt [21]. Der einleitende Langzeitstrom der Aufwärtsblitze unterscheidet sich daher in seinen physikalischen Entwicklung in wesentlichen Merkmalen vom Langzeitstrom (CC) der Abwärtsblitze. Dies ist vermutlich ein Grund, weshalb die einleitenden Langzeitströme (ICC) sehr hohe Stromwerte und sehr hohe Ladungen aufweisen können, die über die Werte der übrigen Langzeitströme (CC) hinausgehen können [24].

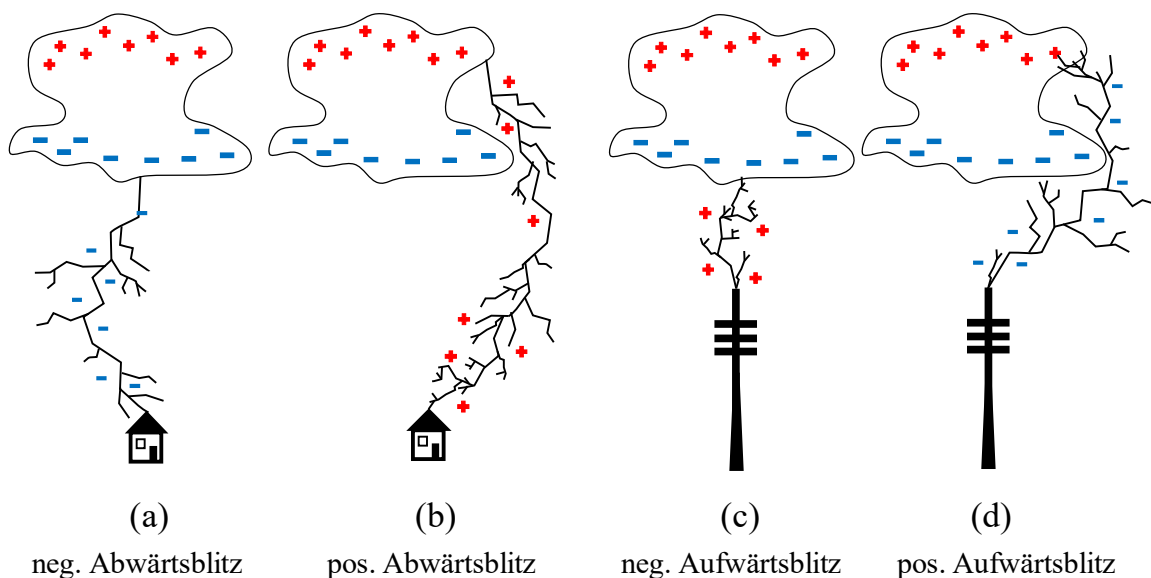


Bild 2.2 Klassifizierung der Erdblitzes nach Polarität und Entladungsrichtung

Die Aufwärtsblitze lassen sich hinsichtlich ihres physikalischen Entstehens in selbst- ausgelöste und fremd- ausgelöste Aufwärtsblitze einteilen. Die selbst- ausgelösten Aufwärtsblitze entstehen, wenn durch die Ladungsansammlung innerhalb der Gewitterwolke eine kritische elektrische Feldstärke überschritten wird, so dass ein Leader von der Spitze hoher Objekte ausgelöst wird. Mit dem Starten des Leaders und dem damit verbundenen Ladungstransfer durch den ICC ändert sich das elektrische Feld, was sich bei den negativen Aufwärtsblitzen durch einen schlagartigen Feldsprung zu positiven Werten hin äußert. Bild 2.3a und Bild 2.3b zeigen hierfür einen beispielhaften Verlauf für das elektrische Feld und den einleitenden Langzeitstrom.

Bei den fremd-ausgelösten Aufwärtsblitzen ist hingegen die Ladungsansammlung innerhalb der Gewitterwolke zunächst nicht ausreichend, um ein hinreichend hohes Feld für die Auslösung eines Aufwärtsblitzes zu erzeugen. Dies geschieht erst, wenn durch Ladungsverschiebungen innerhalb der Gewitterwolke das elektrische Feld hinreichend verstärkt wird. Die Ladungsverschiebungen erfolgen durch „fremde“ Entladungsformen wie die Ausbildung von Leadern innerhalb der Gewitterwolke, was bei den negativen Aufwärtsblitzen zunächst eine Feldzunahme zu negativen Werten hin bewirkt. Ist diese Feldzunahme hoch genug, beginnt erst der eigentliche Aufwärtsblitz, wobei sich mit Beginn des ICC das elektrische Feld sprunghaft zu positiven Werten hin ändert. Bild 2.3c und Bild 2.3d zeigen hierfür einen beispielhaften Verlauf für das elektrische Feld und den einleitenden Langzeitstrom.

Wie aus den Bildern 2.3b und 2.3d zu erkennen ist, sind für den ICC Werte von einigen hundert Ampere typisch. Dies gilt sowohl für die selbst-ausgelösten als auch für die fremd-ausgelösten Aufwärtsblitze, wobei allerdings auch weitaus höhere Stromwerte von einigen Kilo-Ampere und darüber möglich sind. Wie aus den Bildern weiterhin hervorgeht, kann der ICC von einem Stromimpuls eingeleitet sein, der Werte bis einige Kilo-Ampere erreichen kann. Näheres hierzu findet sich in Kapitel 3.

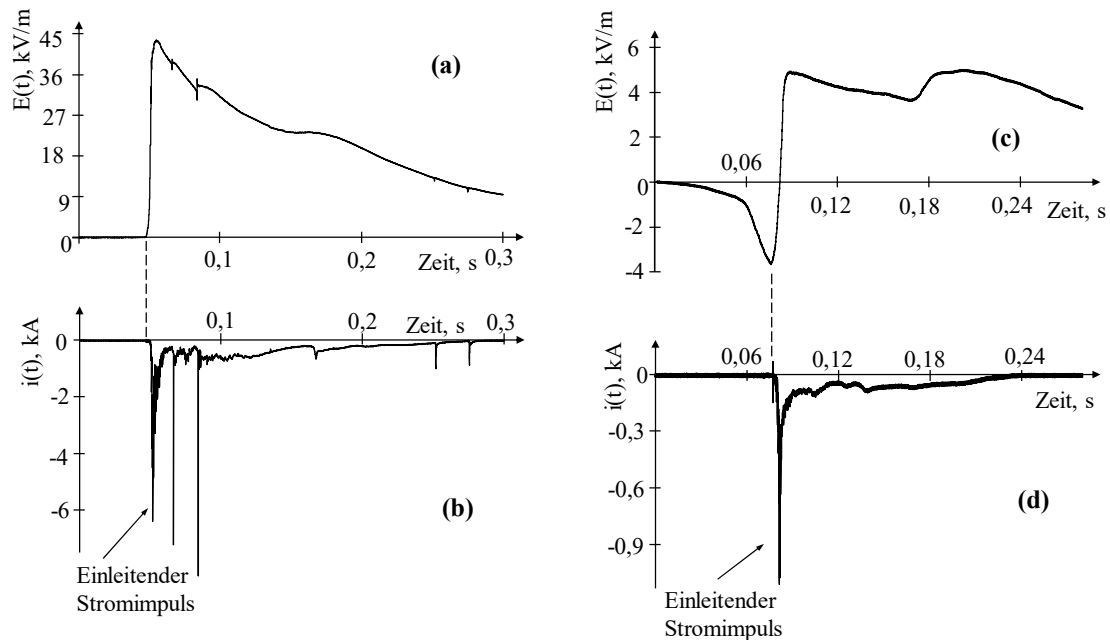


Bild 2.3 Vergleich zwischen dem elektrischen Feld (Bild 2.3a) und dem Strom (Bild 2.3b) eines selbst-ausgelösten negativen Aufwärtsblitzes und dem elektrischen Feld (Bild 2.3c) und dem Strom (Bild 2.3d) eines fremd-ausgelösten negativen Aufwärtsblitzes nach [25]

2.2.2 Blitzeinschläge in Flugzeuge

Der überwiegende Teil der Blitzentladungen findet allerdings nicht zwischen Wolke und Erde, sondern zwischen den Ladungszentren der Gewitterwolken statt. Hierbei wird zwischen Wolke-Wolke-Blitzen und Wolke-Blitzen unterschieden. Bei Wolke-Wolke-Blitzen erfolgt die Blitzentladung zwischen den Ladungszentren verschiedener Gewitterwolken, während sie bei Wolke-Blitzen zwischen den Ladungszentren derselben Gewitterwolke stattfindet [26].

Fliegt nun ein Flugzeug in der Nähe eines sich entwickelnden Wolke- bzw. Wolke-Wolke-Blitzes, kann es passieren, dass der Blitzkanal auf das Flugzeug umgelenkt wird. Dasselbe kann sich ereignen, wenn das Flugzeug in der Nähe eines sich entwickelnden Erdblitzes fliegt. In diesem Fall kann daher der Blitzstrom als erste Komponente einen Stoßstrom aufweisen.

Dieses Szenario beschreibt den Fall, dass ein Flugzeug zufällig getroffen wird, durch einen sich bereits natürlich ereignenden Blitz. Messungen, die in den 80-er Jahren des vergangenen Jahrhunderts an 3 Flugzeugen (Typ: F106, CV580 und C160) durchgeführt wurden, haben jedoch ergeben, dass dieses Szenario nur auf etwa 10 % der Blitzeinschläge zutrifft. In etwa 90 % der Fälle wird das Flugzeug nicht zufällig von einem Blitz getroffen, sondern die Blitzentladung wird durch das Flugzeug selbst hervorgerufen. Dies ist zurückzuführen auf die feldverstärkende (Spitzen-)Wirkung des Flugzeuges, analog zu der feldverstärkenden Wirkung hoher Gebäude, durch die Aufwärtsblitze auslöst werden [17].

Dies kann geschehen, wenn das Flugzeug in Regionen fliegt, wo das umgebende Gewitterfeld hoch genug ist, um einen Leader zu initiieren. Typischerweise entsteht der Leader an einer Extremität des Flugzeuges, worauf sich ein zweiter Leader mit inverser Polarität von der entgegengesetzten Extremität in die umgekehrte Richtung entwickelt. Auf diese Weise entsteht ein bidirektionaler Leader, der jeweils am Flugzeug seinen Ursprung hat (siehe Bild 2.4). Der bidirektionale Leader erzeugt einen einleitenden Langzeitstrom (ICC), der im Wesentlichen dem einleitenden Langzeitstrom von Aufwärtsblitzen entspricht. Der Langzeitstrom fließt von seiner Eintrittsstelle über das Flugzeug zur Austrittsstelle, wo er vom Flugzeug abfließt. Hieraus ergeben sich zwei Einschlagstellen mit jeweils inverser Stromrichtung, weshalb es nicht sinnvoll ist, zwischen positiven und negativen Blitzen bei Flugzeugen zu unterscheiden [27] [28] [12] [29] [30].

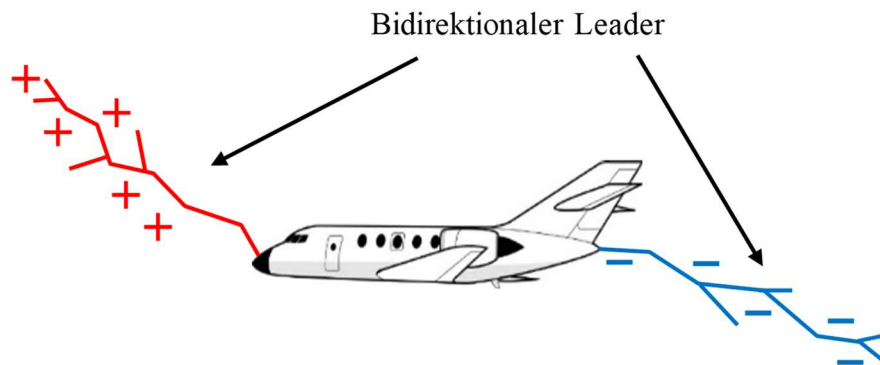


Bild 2.4 Bidirektionaler Leader, der den Blitzeinschlag in ein Flugzeug einleitet

2.3. Experimentelle Nachbildung der Blitzströme für Prüfzwecke

Den Blitzschutz für bauliche Anlagen regelt die Normenreihe VDE 0185-305, während für Flugzeuge aufgrund der beschriebenen physikalischen Unterschiede andere Vorschriften gelten (siehe Anhang B).

2.3.1 Experimentelle Nachbildung der Blitzströme für bauliche Anlagen

In Anhang B, Kapitel B.1.1 sind die Stoßströme beschrieben, die nach VDE 0185-305-1 [31] für den Schutz baulicher Anlagen zugrunde gelegt werden. Hierbei wird zwischen dem Stoßstrom des positiven Erstblitzes, dem Stoßstrom des negativen Erstblitzes und dem Stoßstrom des Folgeblitzes unterschieden. Der Stoßstrom des positiven Erstblitzes deckt die Blitzbedrohungen durch das Strommaximum ($i_{\max}$), die Ladung (Q) und die spezifische Energie ($W/R = \int i^2 dt$) ab, während der Folgeblitz die Blitzbedrohung durch die maximale Stromsteilheit ($di/dt_{\max}$) abbildet. Die Blitzbedrohung durch die maximale Stromsteilheit ($di/dt_{\max}$) wird in der Regel mit rechnerischen Verfahren abgebildet, wogegen die experimentelle Nachbildung des Folgeblitzes nicht üblich ist. Das gleiche gilt für den Stoßstrom des negativen Erstblitzes, der nur für ganz wenige Anforderungen bedeutsam ist.

Von praktischer Bedeutung ist somit nur der Stoßstrom des positiven Erstblitzes, der die Impulsform 10/350 μs aufweist. Daher wird im Rahmen der vorliegenden Dissertation ausschließlich der positive Stoßstrom des Erstblitzes betrachtet. Nach VDE 0185-305-1 wird hierbei lediglich gefordert, dass das Strommaximum, die Ladung und die spezifische Energie innerhalb der zulässigen Toleranzen realisiert werden, die strikte Einhaltung der Stromform mit der Impulsform 10/350 μs ist hingegen nicht erforderlich.

In Anhang B, Kapitel B.1.2 sind die Langzeitströme beschrieben, die nach VDE 0185-305-1 für den Schutz baulicher Anlagen zugrunde gelegt werden. Die geforderte maximale Ladung von 200 C ($\pm 20\%$) orientiert sich insbesondere an den Ladungen, die bei Abwärtsblitzen gemessen wurden. Sind zusätzlich die einleitenden Langzeitströme der Aufwärtsblitze zu beachten, werden teilweise erhöhte Ladungen von 600 C ($\pm 20\%$) gefordert (siehe Anhang B, Kapitel B.2). Dies gilt nach DIN EN IEC 61400-24 [32] insbesondere für besonders exponierte Windkraftanlagen.

2.3.2 Experimentelle Nachbildung der Blitzströme für Einschläge in Flugzeuge

Der sogenannte Vierkomponenten-Strom nach EUROCAE ED-84 [33] (siehe Anhang B, Kapitel B.4) dient zur experimentellen Nachbildung der Blitzströme bei Einschlägen in Flugzeuge. Die Stromkomponente A bildet hierbei dem Stoßstrom des Erstblitzes ab, während die Stromkomponente D dem Stoßstrom des Folgeblitzes entspricht. Die Stromkomponenten B und C berücksichtigen hingegen die Bedrohung durch den (einleitenden) Langzeitstrom.

Da sich die Blitzeinschläge vor allem an den Extremitäten der Flugzeuge ereignen, sind nicht alle Teile des Flugzeuges gleichermaßen betroffen. Um diesen Unterschieden Rechnung zu tragen, werden die Flugzeuge nach EUROCAE ED-91 [34] in unterschiedlich schützenswerte Zonen unterteilt. Bei diesem sogenannten Zoning wird festgelegt, welche von den 4 genannten Stromkomponenten in der betreffenden Zone zu beachten sind. Es wird weiterhin festgelegt, ob in dieser Zone die volle Stromkomponente wirksam ist oder ob mit reduzierten Stromwerten getestet werden kann.

Bei Flugzeugen ist zu beachten, dass sie während des Blitzeinschlags weiterfliegen, wodurch der Blitzkanal bei langandauernder Blitzeinwirkung entlang des Flugzeugs verschoben wird. Auf diese Weise bewegt sich der Blitzkanal von der ursprünglichen Einschlagstelle weg in Richtung des Flugzeughecks. Das gleiche gilt für die Austrittsstelle, die ebenfalls in Richtung des Flugzeughecks wandert. Allerdings erfolgt diese Bewegung nicht kontinuierlich, sondern der Blitzkanal hüpft sprunghaft entlang der Außenhaut des Flugzeugs von Einschlagstelle zu Einschlagstelle bzw. Austrittsstelle zu Austrittsstelle. Bild 2.5 verdeutlicht dieses als „swept-channel“ bezeichnete Phänomen. Die Zeitdauer des Verweilens an einer Einschlagstelle kann abhängig von der Art des Farbanstrichs auf der Außenhaut stark variieren. Typisch sind Verweilzeiten von einigen 10 ms bis maximal 50 ms.

Entsprechend der Verweildauer verkürzt sich die Einwirkdauer des Blitzstroms an einer Einschlagstelle. Das wird dadurch berücksichtigt, dass in diesem Fall die Stromkomponente C verkürzt wird und die Prüfung mit verkürzter Langzeitstrom-Komponente C^* erfolgt.

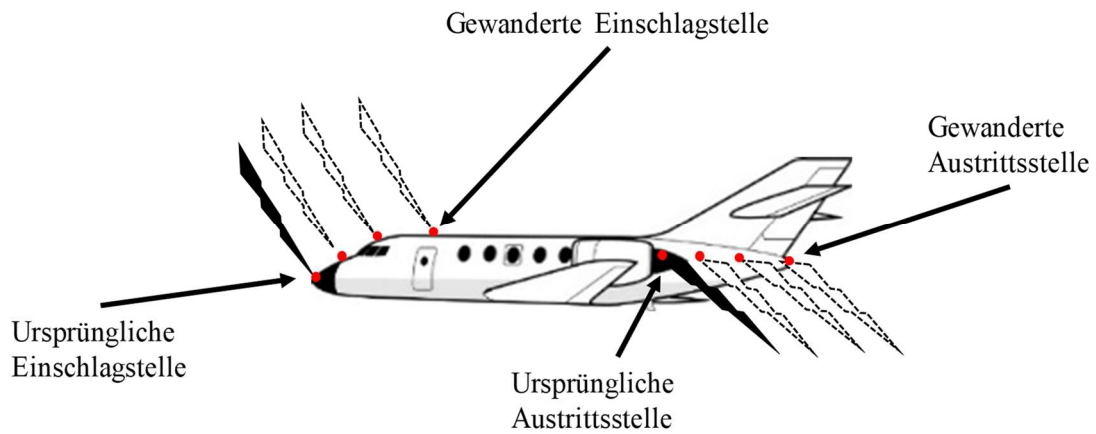


Bild 2.5 „swept-channel“-Phänomen bei einem vom Blitz getroffenen Flugzeug

3. Einleitende Langzeitströme von Aufwärtsblitzen und deren Parameter

Aufgabe der vorliegenden Dissertation ist es, einen neuen Langzeitstrom-Generator zu erstellen, der die Anforderungen nach VDE 0185-305-1 [31] und EUROCAE ED-84 [33] abdeckt. Während VDE 0185-305-1 sich auf den Blitzschutz von Gebäuden bezieht, wird EUROCAE ED-84 für den Blitzschutz von fliegenden Systemen herangezogen. Mit geringfügigen Abweichungen ist beiden Normen gemeinsam, dass die Gefährdung durch den Langzeitstrom mit einer maximalen Ladung von 200 C nachgebildet wird.

Neuere Messungen haben allerdings gezeigt, dass an modernen Windkraftanlagen mit höheren Ladungsmengen zu rechnen ist, weshalb nach DIN EN IEC 61400-24 [32] für besonders exponierte Windkraftanlagen die Ladung auf 600 C erhöht ist (siehe Kapitel 2). Allerdings stellt sich die Frage, ob mit diesen Vorgaben insbesondere im Hinblick auf den relativ geringen Strom von einigen 100 A, der in den Normen gefordert wird, die Bedrohung durch die Blitze hinreichend abgedeckt ist.

Für den neu zu erstellenden Langzeitstrom-Generator bedeutet dies, dass die Nachbildung der Langzeitströme gemäß den Normen nur ein Aspekt ist. Wünschenswert ist ein Langzeitstrom-Generator, der darüberhinausgehende Stromformen ermöglicht. Insbesondere sollte der Strom in weiten Bereichen variabel sein, um damit zusätzliche Einflüsse wie das Strommaximum und die Zeitdauer natürlicher Blitze abbilden zu können.

Derartige Aufgabenstellungen benötigen allerdings genauere Angaben über den zeitlichen Verlauf von Blitzströmen. Grundlage für jede EMV-Untersuchung (zu denen auch Untersuchungen mit Blitzströmen gezählt werden) ist nämlich die detaillierte Kenntnis der Störquelle. Gerade aber über diesen Bereich, in dem die einleitenden Langzeitströme auftreten und der auch für die höchsten Ladungsmengen verantwortlich ist, die in Blitzströmen enthalten sind, existieren bisher eher wenige Forschungsergebnisse. Das liegt insbesondere daran, dass der Blitzschutz im Wesentlichen nach den Erfordernissen der Abwärtsblitze konzipiert ist, die nicht von Langzeitströmen eingeleitet werden.

Daher stellt sich die übergeordnete Aufgabe, die Datenlage über die Blitzströme von Aufwärtsblitzen und die darin enthaltenen einleitenden Langzeitströme zu verbessern. Messungen hierzu werden weltweit an hohen Türmen durchgeführt, wie am Gaisbergturm in Österreich [35] [36], am CN-Tower in Kanada [37], am Tokio Skytree in Japan [38] [39], an einem Turm auf dem Morro do Cachimbo in Brasilien [40], am Sentech Tower in Südafrika [41] [42], an einem Turm auf dem Berg Säntis in der Schweiz

[43] [44] [45] [46] sowie weiteren [47]. Auch in Deutschland werden von der Universität der Bundeswehr München Blitze am Peißenbergturm vermessen. Die Messungen, die im Jahr 1978 begonnen wurden, haben ein umfangreiches Datenmaterial erbracht, das mehr als 300 Blitze umfasst (siehe beispielsweise [48] [49] [50] [51] [52] [53] [54] [55] [56] [57] [58] [59]). Aus diesem Datenmaterial wurden im Rahmen dieser Dissertation die Ströme der Aufwärtsblitze ausgewertet, um hieraus die relevanten Parameter der einleitenden Langzeitströme zu gewinnen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden nachfolgend dargestellt. Nach einer kurzen Einführung in die Messungen (siehe Kapitel 3.1) wird ein Überblick gegeben.

Die überwiegende Zahl der Blitzeinschläge in den Peißenbergturm waren negative Aufwärtsblitze, wogegen die positiven Aufwärtsblitze mit einem Anteil von weniger als 10 % wesentlich seltener waren. Ein ähnliches Ergebnis ergab sich aus den Messungen an sonstigen hohen Objekten wie an einer Windkraftanlage und deren Blitzschutz-Turm in Japan. Von diesen Messungen wird berichtet, dass nur etwa 11 % der Blitzeinschläge auf positive Aufwärtsblitze zurückzuführen sind [60]. Messungen am Gaisbergturm in Österreich ergaben sogar einen noch geringeren Anteil von nur 4 % für die positiven Aufwärtsblitze [35]. Im Gegensatz dazu stehen allerdings die Messungen, die in Japan zur Winterzeit durchgeführt wurden. Bei diesen Winterblitzen wurde ein erheblich höherer Anteil der positiven Aufwärtsblitze von 33,6 % ermittelt [61].

Aufgrund dieser Ergebnisse stützt sich die Kenntnis über die einleitenden Langzeitströme (ICC) vornehmlich auf die negativen Aufwärtsblitze, was in Kapitel 3.2 beschrieben wird. Gleichwohl sind auch die weitaus weniger auftretenden positiven Aufwärtsblitze bedeutsam, da sie die höchsten Werte für das Strommaximum aufweisen, was in Kapitel 3.3 beschrieben ist.

3.1 Blitzmessstation am Hohen Peißenberg

Der Hohe Peißenberg ist ein den Alpen vorgelagerter Bergrücken, ungefähr 60 km südwestlich von München gelegen. Auf dem Hohen Peißenberg wurde der Peißenbergturm errichtet, der eine Höhe von etwa 150 m aufweist und 936 m über dem Meeresspiegel gelegen ist.

Der Peißenbergturm dient als Fernmelde-Einrichtung, bei dessen Bau ein Blitzstrom-Messsystem mit Fangstangen auf seiner Spitze installiert wurde. Das Messsystem wurde im Jahr 1978 in Betrieb genommen und zwischenzeitlich mehrmals erneuert. Heutzutage erfolgt die Messung des Blitzstroms über einen Strom-Messwiderstand, der an der Spitze

des Turms eingebaut ist (siehe Bild 3.1a). Die Messsignale werden von dort über ein koaxiales Kabel an eine Messstation am Turmfuß weitergeleitet, wo der zeitliche Stromverlauf mit einem Digitaloszilloskop aufgenommen und über ein Rechnersystem abgespeichert wird [58].

Zusätzlich zu der Blitzstrom-Messstation im Turmfuß wurde eine Feld-Messstation in ungefähr 189 m Entfernung zum Peißenbergturm installiert [62] [57]. Diese besteht im Wesentlichen aus einer Messkabine, auf der die Antennen zur Messung des elektrischen und magnetischen Felds installiert sind (siehe Bild 3.1b).

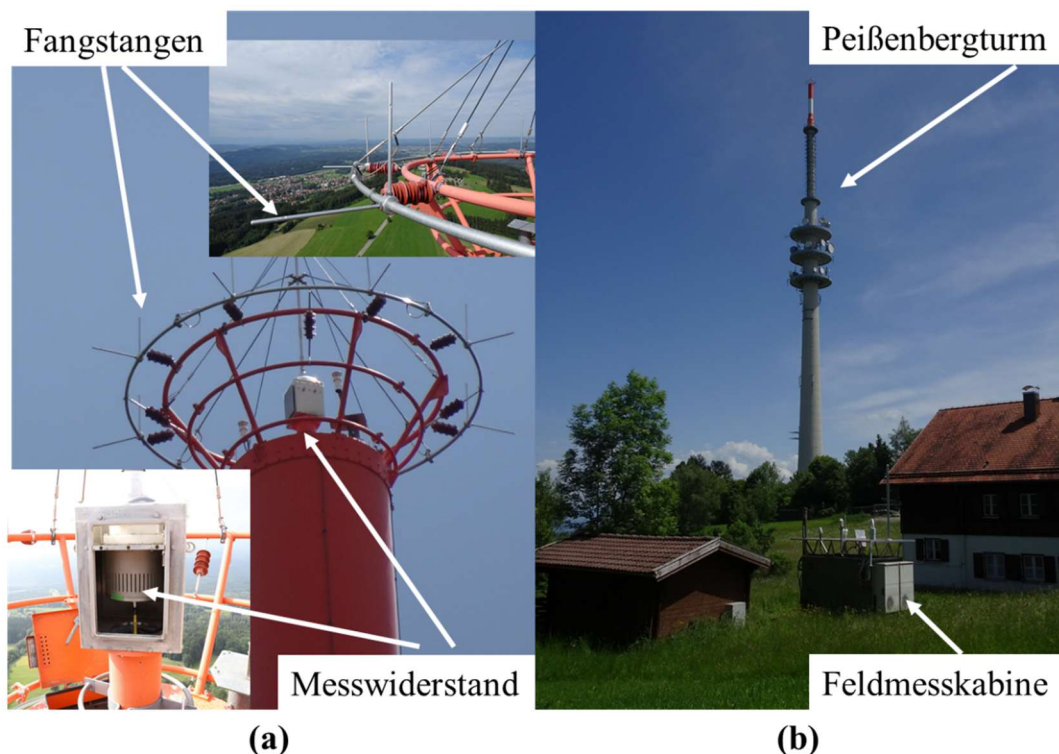


Bild 3.1 Blitz-Messeinrichtungen der Universität der Bundeswehr München am Hohen Peißenberg, (a) Strommessung an der Spitze des Peißenbergturms und (b) Feldmesskabine in etwa 189 m Entfernung vom Turm

3.2 Negative Aufwärtsblitze am Peißenbergturm

Bild 3.2 zeigt eine schematische Darstellung des (betragsmäßigen) Stromverlaufs eines typischen negativen Aufwärtsblitzes [63]. Der einleitende Langzeitstrom (ICC) kann von sogenannten ICC-Impulsen überlagert sein und impulsförmige ‚return strokes‘ können nachfolgen (vgl. Kapitel 2.1). Allerdings weist nur etwa die Hälfte der Aufwärtsblitze derartige impulsförmige Stromkomponenten auf, während die andere Hälfte nur einen

einleitenden Langzeitstrom (ICC) ohne sonstige Stromkomponenten enthält (siehe beispielsweise [63] [64] [65] [66] [67]). Hiervon sind die selbst-ausgelösten und fremd-ausgelösten Blitze gleichermaßen betroffen, weshalb hier nicht weiter unterschieden wird (siehe Kapitel 2.1).

Der zeitliche Verlauf des Langzeitstroms wird im Folgenden charakterisiert durch das Strommaximum (ICC_{max}), die Ladung (Q_{ICC}) und die Zeitdauer ($t_{ICC,10\%}$), während welcher der Strom mindestens 10 % seines Maximums beträgt. Wie in Bild 3.2 dargestellt ist, bezieht sich das Strommaximum (ICC_{max}) auf den reinen ICC, wobei die dem ICC überlagerten Impulse vernachlässigt werden. Der gemittelte Stromwert (ICC_{mittel}) wird als zusätzlicher Parameter betrachtet. Er ist definiert als der Quotient aus der Ladung Q_{ICC} und der Zeitdauer $t_{ICC,10\%}$ [66]:

$$ICC_{mittel} = \frac{Q_{ICC}}{t_{ICC,10\%}} \quad (3.1)$$

Tabelle 3.1 enthält die Parameter des ICC aus 204 Messungen (von 1992 bis 2022) am Peißenbergturm. Wie zu erkennen ist, erstrecken sich die Parameter über einen weiten Bereich, wobei der Unterschied zwischen den Minimal- (MIN) und Maximalwerten (MAX) etwa 2 bis 3 Größenordnungen beträgt.

Bemerkenswert ist, dass sowohl die Maximalwerte der Ladung und der Zeitdauer als auch die Maximalwerte des Strommaximums und des Strommittelwertes die entsprechenden Werte nach der Norm VDE 0185-305-1 mehr oder weniger deutlich übersteigen. Beispielsweise enthält der ICC in zwei Fällen eine Ladungsmenge über 400 C, was mehr als dem doppelten Wert der maximalen Ladung nach VDE 0185-305-1 entspricht. Ähnlich hohe Ladungsmengen bis zu 405 C wurden auch am Gaisbergturm in Österreich gemessen [65].

	ICC negativer Aufwärtsblitze am Peißenbergturm					
Parameter	Benennung	Einheit	MIN	MAX	AM	GM
Ladung	Q_{ICC}	C	1	454	70	39
Zeitdauer	$t_{ICC,10\%}$	ms	7	763	272	229
Strommaximum	ICC_{max}	A	33	4999	546	344
Strommittelwert	ICC_{mittel}	A	17	1575	238	170

Tabelle 3.1 Parameter des ICC aus 204 Messungen am Peißenbergturm

MIN: Minimalwert

AM: Arithmetischer Mittelwert

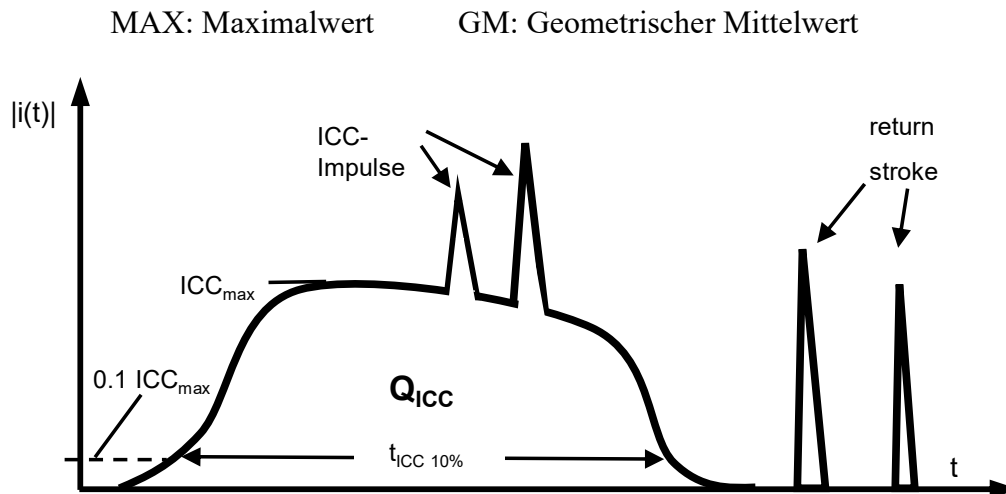


Bild 3.2 Schematische Darstellung des (betragsmäßigen) Stromverlaufs eines typischen negativen Aufwärtsblitzes [63]

Bei den einleitenden Langzeitströmen lassen sich zwei charakteristische Erscheinungsformen unterscheiden. Beim Typ „S“ (smooth) steigt der Strom zu Beginn des einleitenden Langzeitstroms kontinuierlich an, während er beim Typ „P“ durch einen markanten Stromimpuls eingeleitet wird (vgl. [21], siehe Bild 2.3). Bild 3.3 zeigt schematisch den zeitlichen Verlauf eines ICC vom Typ „P“ (mit einleitendem Stromimpuls). Hierbei beträgt der Maximalwert des Stromimpulses ($i_{\text{ICC-Impuls-max}}$) mindestens 30 % des Strommaximums des reinen ICC (ICC_{max}).

Von insgesamt 204 am Peißenberg gemessenen ICC war eine Mehrheit von 74,5 % (152 ICC) vom Typ „S“ und eine Minderheit von 25,5 % (52 ICC) vom Typ „P“. Hierbei wurde festgestellt, dass das Auftreten eines einleitenden Stromimpulses stark von der Ladung des ICC abhängt. Während nahezu die Hälfte der ICC bei einer Ladungsmenge zwischen 20 C und 100 C einen einleitenden Stromimpuls aufwiesen, war bei geringerer Ladung nur noch in weitaus weniger Fällen ein Stromimpuls ausgeprägt [25].

Um den Stromimpuls zu charakterisieren, werden neben dem Maximalwert ($i_{\text{ICC-Impuls-max}}$) die Ladung ($Q_{\text{ICC-Impuls}}$) und die Stirnzeit ($t_{\text{ICC-I-max}}$) betrachtet (siehe Bild 3.3). Tabelle 3.2 enthält die entsprechenden Parameter, denen die Messungen am Peißenbergturm aus den Jahren 1997 bis 2022 zugrunde liegen. Wie zu erkennen ist, können die Stromimpulse Ladungen bis nahezu 40 C und Stromwerte bis nahezu 4 kA erreichen. Bemerkenswert ist auch, dass die durchschnittliche Ladung von 6,78 C in etwa der durchschnittlichen Ladung entspricht, die bei den Messungen am Monte San Salvatore für die Erstblitze negativer Abwärtsblitze ermittelt wurde [68].

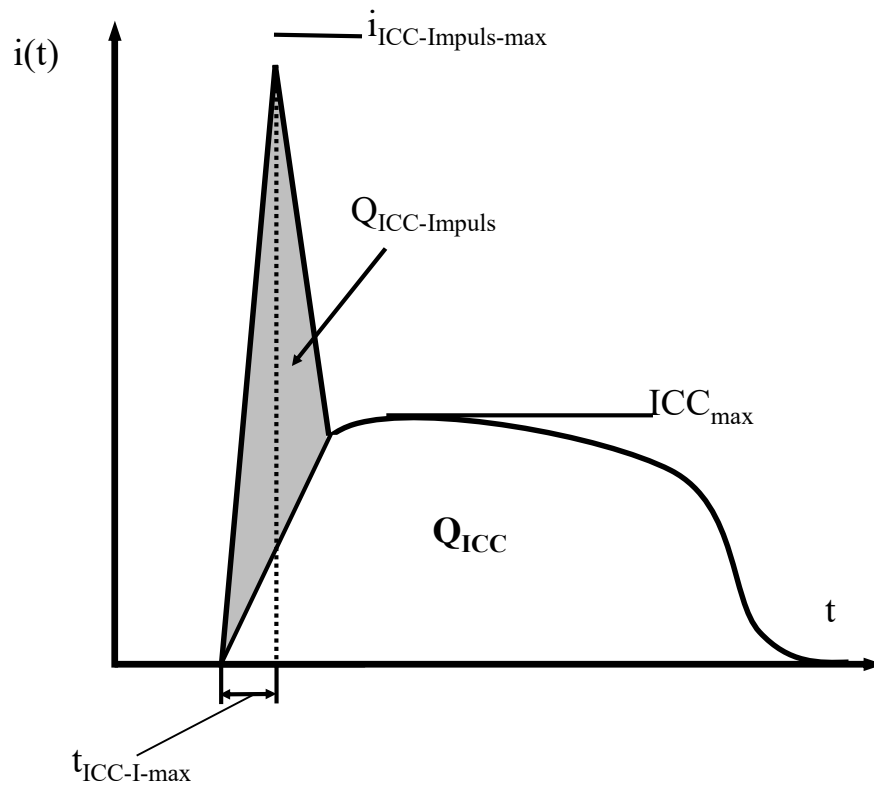


Bild 3.3 Schematischer Verlauf eines ICC vom Typ „P“ (mit einleitendem Stromimpuls)

Einleitende Stromimpulse negativer ICC von 1997-2022					
Parameter	Einheit	MAX	MIN	AM	GM
$Q_{\text{ICC-Impuls}}$	C	38,9	0,08	6,78	2,9
$t_{\text{ICC-I-max}}$	ms	96,4	1,3	16,8	11,1
$i_{\text{ICC-Impuls-max}}$	A	3750	75	737	472

Tabelle 3.2 Parameter der am Peißenbergturm zwischen 1997 und 2022 gemessenen einleitenden Stromimpulse negativer Aufwärtsblitze

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass der Stromimpuls in der Regel von höherfrequenten Schwingungen überlagert ist (siehe beispielsweise [69] [70] [71]). Bild 3.4 zeigt ein Beispiel. Von den 29 am Peißenbergturm gemessenen einleitenden Stromimpulsen waren 93 % (27 Stromimpulse) von solchen Schwingungen überlagert, während nur 7 % (2 Stromimpulse) frei von Schwingungen waren. Hierbei war eine Schwingungsdauer von einigen Mikro-Sekunden typisch [25].

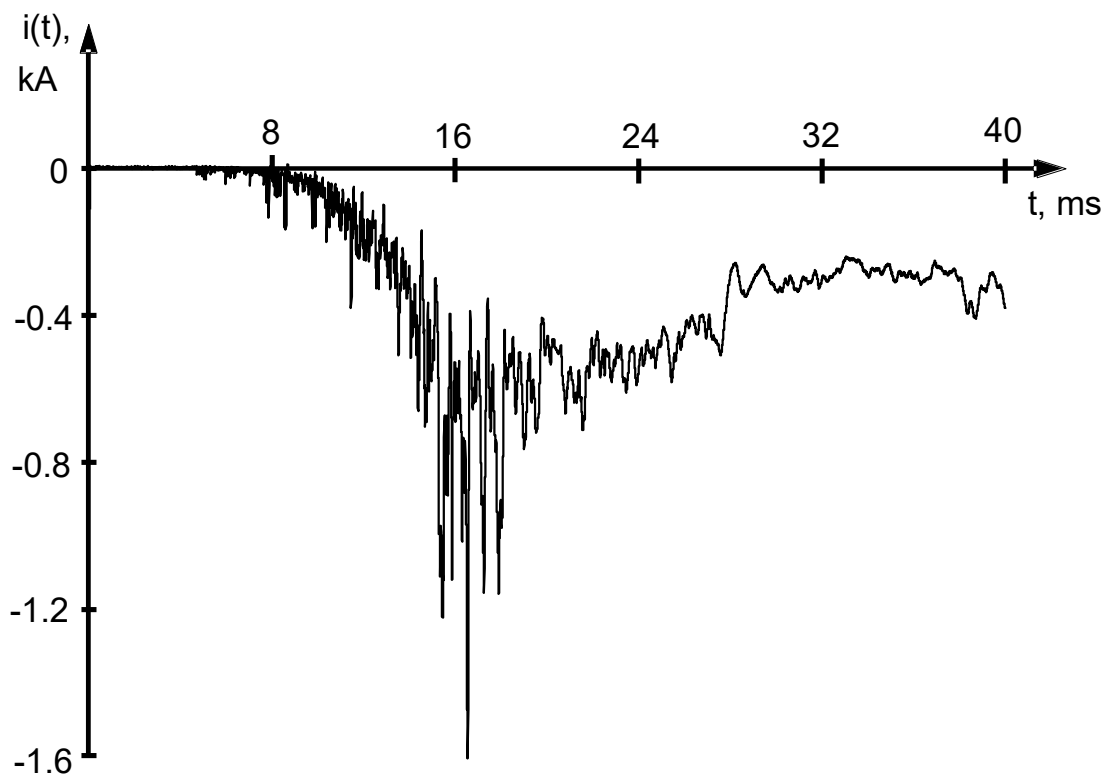


Bild 3.4 Am Peißenbergturm gemessener einleitender Stromimpuls mit überlagerten Schwingungen [25]

3.3 Positive Aufwärtsblitze am Peißenbergturm

Im hier betrachteten Zeitraum von 1997 bis 1999 wurden die Blitzströme von 61 Aufwärtsblitzen am Peißenbergturm gemessen. Hiervon wurden 55 (90,2 %) Ereignisse als negative Aufwärtsblitze und 6 (9,8 %) Ereignisse als positive Aufwärtsblitze identifiziert.

Tabelle 3.3 enthält die Parameter des ICC der sechs gemessenen positiven Aufwärtsblitze. Wie zu erkennen ist die Ladung des ICC (Q_{ICC}) in etwa mit der Ladung des ICC der negativen Aufwärtsblitze vergleichbar. Gegenüber den negativen Aufwärtsblitzen führt der ICC allerdings einen um etwa eine Größenordnung höheren Strom (ICC_{max}) von einigen kA, während die Zeitdauer ($t_{ICC,10\%}$) im Bereich von einigen 10 Millisekunden etwa um eine Größenordnung kürzer ist [56] [72] [73]. Ähnliche Ergebnisse wurden auch bei 35 positiven Aufwärtsblitzen am Gaisbergturm in Österreich erzielt [74].

Sechs positive Aufwärtsblitze am Peißenbergturm von 1997-1999			
Parameter	Ladung Q_{ICC}	Strommaximum ICC_{max}	Zeitdauer ($t_{ICC,10\%}$)
Maximum	249 C	8,6 kA	91 ms
Arithm. Mittel	59 C	5,4 kA	37 ms

Tabelle 3.3 Parameter der am Peißenbergturm zwischen 1997 und 1999 gemessenen ICC positiver Aufwärtsblitze [56] [72]

3.4 Anforderungen an den neuen Langzeitstrom-Generator

Legt man die Blitzschutznorm VDE 0185-305-1 mit dem höchsten Gefährdungspegel LPL I (siehe Anhang B) zugrunde, beträgt die geforderte Langzeitstrom-Ladung 200 C bei einer Stromdauer von 0,5 s und einem (mittleren) Strom von 400 A. Diese Werte wurden bei den am Peißenberg gemessenen negativen ICC allerdings deutlich überschritten. Die Ladung war in 16 Fällen (7,8 %) höher, die Zeitdauer war in 11 Fällen (5,4 %) länger und der mittlere Strom war in 29 Fällen (14,2 %) höher.

Daher sollte der neue Langzeitstrom-Generator neben den Forderungen nach VDE 0185-305-1 auch darüber hinaus gehende Bedrohungen abdecken können. Legt man die maximale am Peißenberg gemessenen Ladung von 454 C zugrunde, erscheint es sinnvoll, dass der neue Langzeitstrom-Generator für eine Ladungsabgabe von mehr als 480 C ausgelegt wird. Damit könnte dann auch die für besonders exponierte Windkraftanlagen geforderte Ladung von 600 C ($\pm 20\%$) [32] realisiert werden.

Weiterhin sollten maximale Langzeitströme bis etwa 20 kA möglich sein, um die ICCs positiver Blitze abbilden zu können. Zusätzlich sollte der neue Langzeitstrom-Generator den einleitenden Stromimpuls geeignet nachbilden können. Hierfür sollten Stromwerte bis einige kA bei Ladungsmengen über 10 C realisierbar sein.

4. Überblick und Konzept für den Bau eines Langzeitstrom-Generators

An der Universität der Bundeswehr München wurde bisher ein Langzeitstrom-Generator betrieben, der allerdings in seiner Leistungsfähigkeit stark eingeschränkt ist. Daher konnte er die Bedrohung durch die Langzeitströme von Blitzen nur teilweise abdecken. Aus diesem Anlass wurde im Rahmen der vorliegenden Dissertation ein neuer leistungstärkerer Langzeitstrom-Generator gebaut.

Bevor auf diese Thematik detailliert eingegangen wird, gibt dieses Kapitel einen kurzen Überblick über das Grund-Konzept und die Anforderungen an den neuen Langzeitstrom-Generator. Einer Beschreibung der einzelnen Systeme und Einrichtungen sind dann die darauffolgenden Kapiteln gewidmet.

4.1 Motivation für den Bau eines Langzeitstrom-Generators

Bei einem Blitzeinschlag in eine metallene Struktur bewirkt die Hitzeentwicklung ein Aufschmelzen des Metalls am Einschlagpunkt. Hierfür ist vor allem der Langzeitstrom aufgrund seiner hohen Ladung verantwortlich. An dünnen Blechen mit einer Blechstärke bis zu einigen Millimetern kann dies zu einer Temperaturerhöhung bis hin zur Schmelztemperatur und damit zum Durchlöchern des Bleches führen [6].

Insbesondere bei Tankstrukturen (z.B. an Flugzeugen) muss dies verhindert werden, um einem möglichen Anzünden des Treibstoffs vorzubeugen. Im Labor wird dieses Szenario nachgebildet, indem ein Langzeitstrom über eine Hochspannungs-Elektrode in die zu untersuchende Metallstruktur eingespeist wird. Bild 4.1 zeigt die geforderte Prüf-Anordnung nach EUROCAE ED-84 [33]: Die Hochspannungs-Elektrode wird in einem vertikalen Abstand von 5 cm über der metallenen Struktur (in Bild 4.1 eine Aluminium-Platte) platziert.

Dieser relativ große Abstand wird gefordert, um dem sogenannten Plasmajet entgegen zu wirken. Aus demselben Grund ist die Spitze der Hochspannungs-Elektrode mit einer Teflon-Kappe abgedeckt, womit der Plasmajet zur Seite hin umgelenkt wird. Da sich bei dieser Anordnung der Lichtbogen zunächst entlang der Teflon-Kappe und nicht direkt zwischen Hochspannungs-Elektrode und Metall-Oberfläche ausbildet, erhält man eine sogenannte „indirekte“ Hochspannungs-Elektrode, wie sie nach EUROCAE ED-105 vorgeschrieben ist [75].

Da die Spannung von Langzeitstrom-Generatoren üblicherweise viel zu gering ist, um einen Überschlag von der Hochspannungs-Elektrode zum Prüfobjekt auszulösen, wird zwischen der Hochspannungs-Elektrode und dem Prüfobjekt ein dünner Zünddraht gespannt. Der dünne Zünddraht (typischer Durchmesser: $\leq 0,1 \text{ mm}$) verdampft unmittelbar nach Einsetzen des Stromflusses, so dass in der Folgezeit ein freier Lichtbogen zwischen der Hochspannungs-Elektrode und dem Prüfobjekt brennt. Dies hat zudem den Vorteil, dass der Strom durch den Zünddraht punktgenau zu der gewünschten Einschlagstelle geleitet wird.

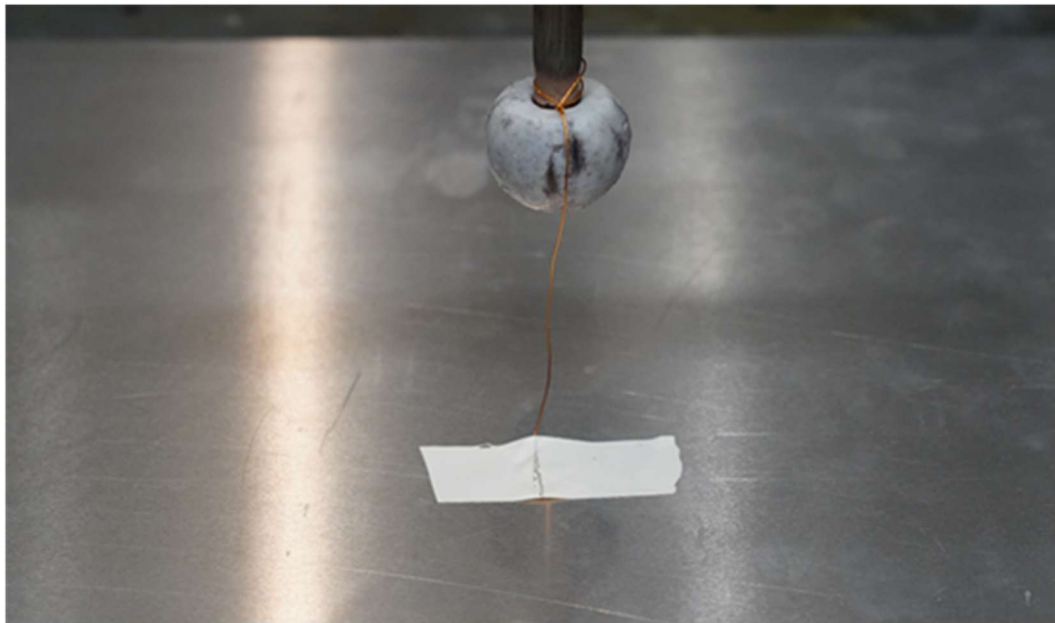


Bild 4.1 Indirekte Hochspannungs-Elektrode nach EUROCAE ED-84 [33] und EUROCAE ED-105 [75] mit einem Zünddraht über einer Aluminiumplatte als Prüfobjekt

Während der Stromprüfung muss sichergestellt sein, dass der Strom definiert in das Prüfobjekt eingespeist wird. Dazu ist ein stabiles Brennen des Lichtbogens unabdingbar, wofür nach [76] eine anliegende Mindestspannung von über 1 kV erforderlich ist. Wird diese Mindestspannung unterschritten, wird der Lichtbogen zunehmend instabiler. Die rote Kurve in Bild 4.2 zeigt hierfür ein Beispiel: Der Stromverlauf zeigt typische Schwankungen, so dass sogar ein frühzeitiges Erlöschen des Lichtbogens (nach etwa 160 ms) möglich ist, wie die blaue Kurve ebenfalls in Bild 4.2 zeigt. Der Grund für die Schwankungen im Stromfluss liegt in der Instabilität des Lichtbogens aufgrund der geringen treibenden Generator-Spannung von 720 V. (Der in Bild 4.2 gezeigte Langzeitstrom wurde mit dem bisher an der Universität der Bundeswehr München betriebenen Langzeitstrom-Generator erzeugt).

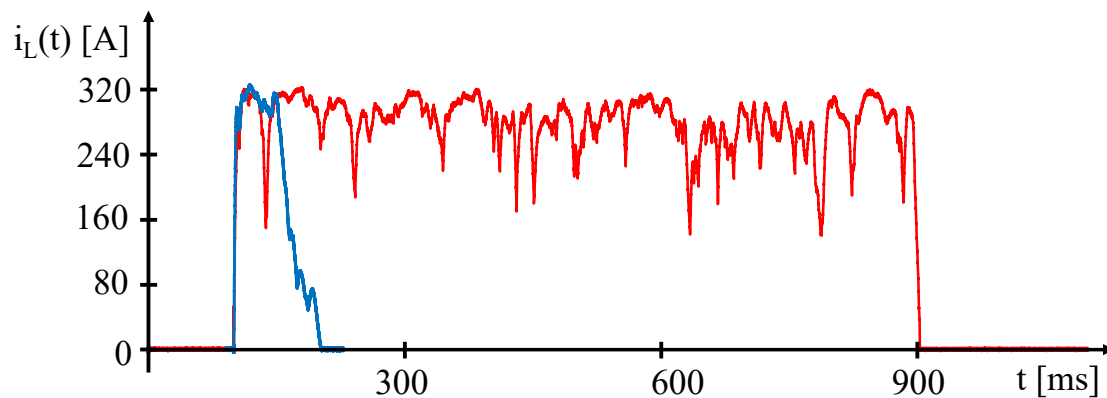


Bild 4.2 Langzeitstrom, erzeugt vom bisher an der Universität der Bundeswehr München eingesetzten Langzeitstrom-Generator (720 V Generator-Spannung) mit instabilem Verlauf (rote Kurve) und mit frühzeitigem Erlöschen des Lichtbogens (blaue Kurve)

Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass am Prüfobjekt selbst ein nennenswerter Spannungsabfall auftreten kann, für dessen Kompensation eine noch höhere Generator-Spannung notwendig ist. Dies ist beispielsweise bei segmentierten Ableiterstreifen der Fall, wenn das Brennen des Lichtbogens entlang des Ableiterstreifens eine Spannung verursacht, die der Generator-Spannung entgegenwirkt [77]. Daher sollte der neue Langzeitstrom-Generator eine maximale Generator-Spannung über 2 kV aufweisen.

Zusätzlich zu den in Kapitel 3 beschriebenen Anforderungen sollte der neue Langzeitstrom-Generator mit einem bestehenden Stoßstrom-Generator kombinierbar sein, um (beispielsweise) gemäß den Forderungen nach EUROCAE ED-84 [33] die Stoßstrom-Komponente A mit der Langzeitstrom-Komponente B+C in einem kombinierten Strom-Impuls realisieren zu können (siehe Anhang B, Kapitel B.4).

4.2 Konzept für den neu zu erstellenden Langzeitstrom-Generator

Eine einfache Möglichkeit, um einen Langzeitstrom zu erzeugen, besteht darin, einen Wechselspannungs- bzw. Drehstrom-Transformator mit nachgeschaltetem Gleichrichter zu verwenden. Nachteilig an dieser Lösung ist allerdings, dass sich mit solch einem Langzeitstrom-Generator normalerweise nur relativ kleine Ströme bei relativ kleiner Generator-Spannung erzeugen lassen. Das liegt daran, dass die elektrische Anschluss-Leistung in der Regel beschränkt ist, so dass keine höheren Ströme und Spannungen möglich sind. Beispielsweise wäre eine Momentan-Leistung von etwa einem Megawatt erforderlich, wenn bei einer Generator-Spannung von 1,2 kV ein Langzeitstrom von 800 A erzeugt wird ($W = U \cdot I = 1200 \text{ V} \cdot 800 \text{ A} \approx 1 \text{ MW}$) [13].

Da eine Einspeise-Leistung im Megawatt-Bereich und darüber hinaus normalerweise nicht zur Verfügung steht, werden energetische (Zwischen-) Speicher eingesetzt, die dann bei Bedarf die hohen Energiemengen abgeben. Realisiert wurden bisher Langzeitstrom-Generatoren mit folgenden Energiespeichern [13] [78]:

- Elektrochemischer Speicher mittels Batterien
- Mechanischer Speicher mittels Schwungrades
- Elektrischer Speicher mittels Kondensatoren

Beispielsweise benutzt der an der Universität der Bundeswehr bisher eingesetzte Langzeitstrom-Generator als Energiespeicher 60 Blei-Batterien mit je einer Batteriespannung von 12 V. Die Batterien können in Serie geschaltet werden, so dass eine Generator-Spannung von maximal 720 V realisierbar ist [79].

Eine Erhöhung der Zahl der Batterien auf etwa 200 Stück wäre denkbar, aber nicht sinnvoll. Zwar würde in diesem Fall eine Generator-Spannung von 2,4 kV erreicht werden, aber die Abschaltung des Gleichstrom-Lichtbogens bei dieser relativ hohen Spannung wäre nicht unproblematisch [80] [81].

Nachteilig wäre auch, dass die hohe Anzahl an (stets geladenen) Batterien ein besonderes Sicherheitsmanagement erfordern würde. Hinzu kommen die hohen Folgekosten, da die Batterien in gewissen Intervallen entsprechend ihrer Lebensdauer ausgetauscht werden müssten. Außerdem wäre die Stromabgabe nicht ausreichend, da bei handelsüblichen Bleibatterien der maximale Strom (durch den Innenwiderstand) auf einige 100 A beschränkt ist.

Wird ein mechanischer Schwungrad-Speicher eingesetzt, wird das Schwungrad zunächst durch eine elektrische Gleichstrommaschine beschleunigt. Nach Erreichen der erforderlichen Rotations-Geschwindigkeit des Schwungrads wird dann die Maschine vom motorischen Betrieb in den Generator-Betrieb umgeschaltet. Allerdings ist der auf diese Weise erzeugte Langzeitstrom beschränkt, da sich eine Leistung im Megawatt-Bereich mit Gleichstrommotoren kaum realisieren lässt [82] [83].

Ferner ist zu berücksichtigen, dass der Langzeitstrom-Generator mit dem an der Universität der Bundeswehr München bestehenden Stoßstrom-Generator (siehe Anhang C) nicht kombiniert werden kann. Werden nämlich die beiden Generatoren kombiniert, liegt im ungünstigsten Fall die volle Spannung des Stoßstrom-Generators von bis zu 100 kV an der Gleichstrommaschine an, was deren typische Isolationsfestigkeit bei weitem übersteigt.

Bei Verwendung eines Kondensators als Energiespeicher ist hingegen die Kombination aus Stoßstrom- und Langzeitstrom-Generator problemlos möglich. Wie Bild 4.3 entnommen werden kann, ist für die Entkopplung beider Generatoren lediglich eine Entkopplungsinduktivität ($L_{\text{Entkopplung}}$) erforderlich.

Selbst wenn das ‚worst case‘-Szenario eintritt, dass die Hochspannungs-Elektrode am Prüfobjekt nicht zündet und somit der gesamte Strom aus dem Stoßstrom-Generator in den Langzeitstrom-Generator fließt, kann diese Ladungszunahme durch die Kondensatoren des Langzeitstrom-Generators problemlos gepuffert werden. Das liegt daran, dass die maximal im Stoßstrom-Generator gespeicherte Ladung von 6 C (siehe Anhang C, Kapitel C.1) wesentlich kleiner ist als die Ladung des Langzeitstrom-Generators (typischerweise einige 100 C) und somit die Spannungszunahme (an den Kondensatoren des Langzeitstrom-Generators) sehr klein und vernachlässigbar ist.

Aufgrund der genannten Gründe wurde entschieden, dass der neue Langzeitstrom-Generator mit einer Kondensatorbank ausgestattet wird, die als Energiespeicher dient. Da in diesem Fall der Strom aus dem Langzeitstrom-Generator nur durch die Beschaltung mit entsprechenden Widerständen beschränkt ist, lassen sich auch wesentlich höhere Ströme realisieren. Somit bietet sich die Möglichkeit, dass auch die extrem hohen Langzeitströme von positiven Blitzen mit Werten um 20 kA realisiert werden können (siehe Kapitel 3).

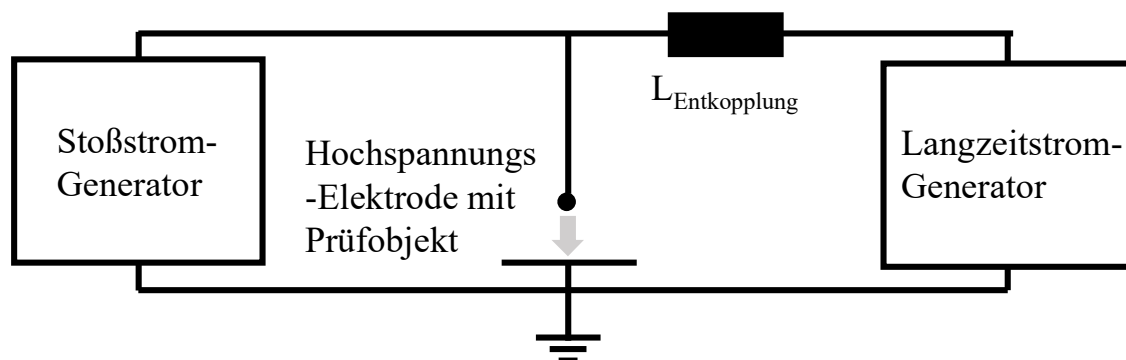


Bild 4.3 Blockschaltbild der Kombination aus Stoßstrom- und Langzeitstrom-Generator mit Entkopplungsinduktivität $L_{\text{Entkopplung}}$

4.3 Konzeptionelle Auslegung des neuen Langzeitstrom-Generators

Bild 4.4 zeigt das grundlegende Ersatzschaltbild des neuen Langzeitstrom-Generators (siehe Anhang A). Zunächst wird die Kondensatorbank (C_L) auf die Generator-Spannung (Ladespannung) $U_{L/0}$ aufgeladen. Nach Schließen des Schalters $S_{L-Zünd}$ fließt der Langzeitstrom (i_L) durch den Stromkreis mit dem Widerstand R_L , der Induktivität L_L und dem Prüfobjekt P.

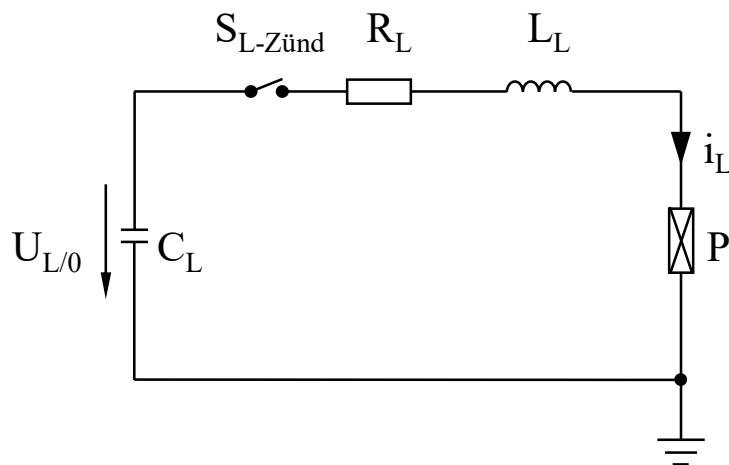


Bild 4.4 Ersatzschaltbild des neuen Langzeitstrom-Generators

4.3.1 Dimensionierung der Kondensatorbank C_L

Wie in Kapitel 4.1 beschrieben, ist eine Generator-Spannung von mindestens 2 kV erforderlich. Daher wurde entschieden, dass der Generator für eine maximale Ladespannung von 2,5 kV ausgelegt wird. Somit könnte die Kondensatorbank (C_L) bis auf 2,5 kV aufgeladen werden, tatsächlich wurde aber zur Erhöhung der Lebensdauer der Kondensatoren die maximale Ladespannung auf $U_{L/0} = 2,25$ kV begrenzt.

Um die nach [32] für besonders exponierte Windkraftanlagen geforderte Ladung Q von mindestens 480 C realisieren zu können, muss die Kondensatorbank folgende Kapazität aufweisen:

$$C_L \geq \frac{Q}{U_{L/0}} = \frac{480 \text{ C}}{2250 \text{ V}} = 213,3 \text{ mF} \quad (4.1)$$

Um die geforderte Kapazität zu realisieren, wurden 50 Kondensatoren mit je 4,4 mF parallel zu einer Kondensatorbank zusammengeschaltet, womit sich die Gesamtkapazität zu $C_L = 220 \text{ mF}$ ergibt. Bei maximaler Ladespannung beträgt die Ladung der Kondensatorbank somit $Q = C_L \cdot U_{L/0} = 0,220 \text{ F} \cdot 2250 \text{ V} = 495 \text{ C}$.

Zur Aufladung der Kondensatoren dient ein Hochspannungs-Ladegerät mit einem maximalen Ladestrom von 6 A. Damit ist es möglich, die Kondensatorbank innerhalb von etwa 1 ½ Minuten vollständig aufzuladen.

4.3.2 Dimensionierung des Widerstandes R_L

Im Folgenden werden zunächst in einer einfachen Betrachtung die Induktivität L_L und das Prüfobjekt P vernachlässigt (siehe Bild 4.4). Somit verbleiben im Stromkreis nur die Kondensatorbank (C_L) und der Widerstand (R_L). Nach Schließen des Schalters S_L -Zünd zum Zeitpunkt $t = 0$ entlädt sich die auf $U_{L/0}$ geladene Kondensatorbank über den Widerstand, wobei der Strom (i_L) exponentiell mit der Zeitkonstanten τ abklingt. Es gilt (z.B. siehe [84] [85]):

$$i_L = i_{L-\max} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (4.2a)$$

$$\text{mit } i_{L-\max} = U_{L/0}/R_L, \quad (4.2b)$$

$$\text{und } \tau = R_L \cdot C_L \quad (4.2c)$$

Hierbei bezeichnet $i_{L-\max}$ den maximalen Strom, der bei Schließen des Schalters zum Zeitpunkt $t = 0$ auftritt.

Da für die Langzeitströme in der Normung (siehe z.B. [86] [33]) keine bestimmte Stromform explizit vorgeschrieben ist, kann der Prüfstrom einen exponentiell mit der Zeitkonstanten τ abklingenden Verlauf haben. Das Strommaximum $i_{L-\max}$ ergibt sich nach Gleichung (4.2b) aus dem Verhältnis der Ladespannung $U_{L/0}$ zum Widerstand R_L . Um das Strommaximum $i_{L-\max}$ in einem weiten Bereich variieren zu können, muss der Widerstand entsprechend einstellbar sein. Beispielsweise wird ein variabler Widerstand von $0,1 \text{ } \Omega$ bis $23 \text{ } \Omega$ benötigt, wenn bei voller Ladespannung ($U_{L/0} = 2,25 \text{ kV}$) ein Strommaximum von etwa 100 A bis 20 kA erzeugt werden soll.

Anzustreben ist jedoch ein Langzeitstrom, der während seiner Dauer einen konstanten Wert aufweist. Bild B.2 in Anhang B zeigt ein Beispiel für einen Strom mit sogenannten „rechteckigem“ Verlauf, d.h. mit konstantem Strom. Ein rechteckiger Stromverlauf kann erreicht werden, wenn der Widerstand (R_L) exponentiell mit der Zeitkonstante τ abklingt.

Es gilt dann:

$$R_L(t) = R_{L/0} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4.4)$$

Mit den Gleichungen (4.2a), (4.2b) und (4.4) folgt dann:

$$i_L = \frac{U_{L/0} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}}{R_L(t)} = \frac{U_{L/0} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}}{R_{L/0} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}} = \frac{U_{L/0}}{R_{L/0}} = \text{konstant} \quad (4.5)$$

In der praktischen Ausführung wird man den Widerstand ($R_L(t)$) jedoch nicht kontinuierlich verringern, sondern in Stufen durch entsprechendes Herausschalten einzelner Widerstände reduzieren, wodurch ein näherungsweise konstanter Stromverlauf erzeugt wird.

4.3.3 Dimensionierung der Induktivität L_L

Die Induktivität L_L (siehe Bild 4.4) hat zwei Funktionen: Zum einen trägt eine hohe Induktivität zur Stabilisierung des Lichtbogens bei und zum anderen sorgt eine hohe Induktivität für die Entkopplung des Stoßstrom-Generators vom Langzeitstrom-Generator. Ohne die Induktivität könnte nämlich die Situation entstehen, dass der Strom aus dem Stoßstrom-Generator nicht über das Prüfobjekt, sondern zur Gänze zum Langzeitstrom-Generator fließt.

Andererseits ist zu beachten, dass der Langzeitstrom stets einen unipolaren Verlauf aufweisen muss. Dies wird erreicht, wenn der Langzeitstrom-Generator für den aperiodischen Betrieb ausgelegt wird. Nach Anhang A ist hierfür folgende Bedingung zu beachten:

$$R_L > 2 \sqrt{\frac{L_L}{C_L}} \quad (4.6)$$

Hieraus folgt für die Induktivität:

$$L_L < \frac{R_L^2}{4} C_L \quad (4.7)$$

Wird nun der Langzeitstrom-Generator mit dem minimalen Widerstand von $R_L = 0,1 \, \Omega$ betrieben (siehe Kapitel 4.3.2), darf die Induktivität nicht größer sein als $\approx 550 \, \mu\text{H}$.

4.3.4 Modularer Aufbau und Strombegrenzung

Der (Blitz-)Langzeitstrom setzt sich nach EUROCAE ED-84 [33] aus zwei Teilströmen, der sogenannten Komponente B und der Komponente C zusammen (siehe Anhang B, Kapitel B.4).

Da an weniger exponierten Stellen geringere Ströme und Ladungen zu erwarten sind, werden dort Stromkomponenten mit reduzierten Stromwerten oder reduzierter Stromdauer gefordert. Beispielsweise hat die modifizierte Langzeitstrom-Komponente C* lediglich eine Ladung im Bereich von 20 C.

Um diese relativ kleinen Ladungen zu realisieren, sind kleinere Kapazitäten erforderlich. Daher sollte die Kondensatorbank des neuen Langzeitstrom-Generators einen modularen Aufbau haben, damit die Kapazität und somit die Ladung angepasst werden kann.

Eine individuelle Anpassung der Ladung ist auch möglich, wenn der Strom nach Erreichen der erforderlichen Ladungsmenge abgeschaltet und somit begrenzt wird. Dies kann dadurch geschehen, dass der Stromfluss unterbrochen wird, was allerdings entsprechende leistungsfähige Schalter voraussetzt. Eine andere und zu bevorzugende Möglichkeit besteht darin, den Stromfluss über dem Prüfobjekt zu unterbrechen, indem das Prüfobjekt definiert kurzgeschlossen und so der Strom um das Prüfobjekt herumgeleitet wird.

4.4 Anforderungen an den Betrieb des Langzeitstrom-Generators

Bild 4.5 zeigt eine Infografik des Langzeitstrom-Generators mit seinen peripheren Systemen und Einrichtungen. Das Kernstück des neuen Langzeitstrom-Generators bildet die Einheit zur Erzeugung des Langzeitstroms. Eine wichtige Einheit ist zunächst die Ankopplung des Generators an den bestehenden Stoßstrom-Generator (siehe Bild 4.3). Zusätzlich sind verschiedene periphere Systeme erforderlich, damit der Langzeitstrom-Generator betrieben werden kann. Wesentliche Komponenten dieser Systeme sind:

- Messsystem für den Langzeitstrom, bestehend aus Messsensor, Übertragungsstrecke über Lichtwellenleiter-System, Digitaloszilloskop zur Datenerfassung sowie Datenauswertung und Datenspeicherung
- Spannungsversorgung für das Aufladen der Kondensatorbank mit variabler Gleichspannung

- Schutzmaßnahmen zur Gewährleistung der Personen- und Gerätesicherheit
- Trigger- und Steuer-Einheit zum zeitrichtigen Auslösen der einzelnen Komponenten und zur Steuerung des Prüfablaufes

Der Aufbau dieser peripheren Systeme mit ihren einzelnen Komponenten sowie deren Integration in die bestehenden Einrichtungen der Hochspannungshalle waren neben dem Bau des eigentlichen Langzeitstrom-Generators die wesentlichen Aufgaben im Rahmen der vorliegenden Dissertation. Die Aufgaben und deren jeweilige Umsetzung sind in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.

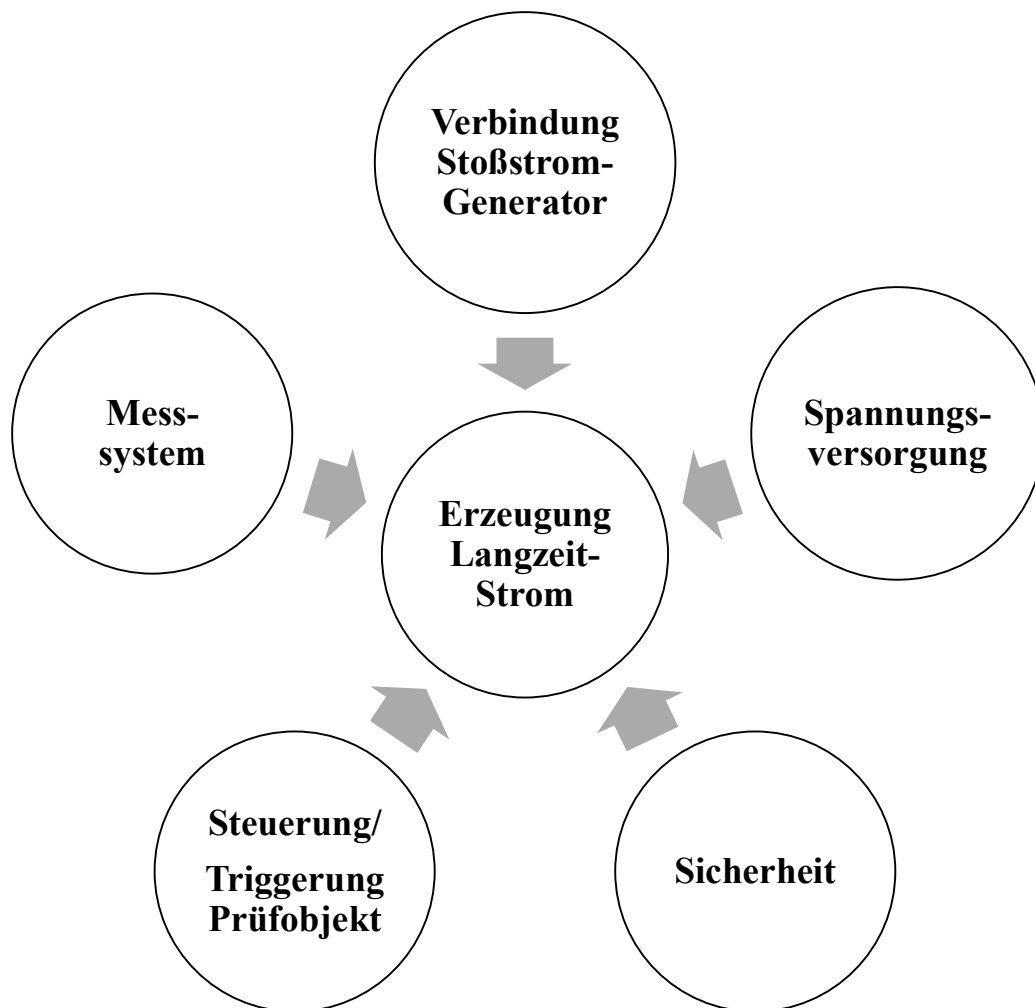


Bild 4.5 Infografik des Langzeitstrom-Generators mit peripheren Einrichtungen

5. Überlegungen zur Erzeugung eines konstanten Langzeitstroms

In Kapitel 4 wurde das Konzept des neuen Langzeitstrom-Generators vorgestellt. Beim Entladen der als Energiespeicher genutzten Kondensatoren entsteht ein exponentiell abklingender Strom. In diesem Kapitel werden in einer vereinfachten Betrachtung grundlegende Überlegungen angestellt, wie aus diesem exponentiell abklingenden Strom durch geeignete Schaltvorgänge ein annähernd konstanter Strom erzeugt werden kann, wie er in Blitzschutz-Normen als wünschenswert beschrieben ist. In dieser vereinfachten Betrachtung ist die Induktivität im Stromkreis vernachlässigt.

Um den in der Normung beschriebenen rechteckförmigen Stromverlauf zu erzeugen, ist ein exponentiell mit der Zeit abnehmender Widerstand nach Kapitel 4.3.2 erforderlich. Ein solcher Widerstand ist allerdings in der Praxis kaum realisierbar. Um dennoch einen annähernd rechteckförmigen Stromverlauf zu erzeugen, wird der exponentiell mit der Zeit abnehmende Widerstand durch einen mit der Zeit stufenweise veränderlichen Widerstand angenähert. Dazu wird eine Reihe von seriell geschalteten Widerständen verwendet, welche dann mit sogenannten Strom-formenden-Schaltern sukzessive überbrückt werden, um den Strom wieder auf sein Ausgangsniveau anzuheben und so einen annähernd konstanten Strom zu erzeugen.

Grundsätzlich lässt sich der Strom mit zunehmender Anzahl der verwendeten Schalter dem gewünschten rechteckförmigen Verlauf immer besser anpassen. Bild 5.1 zeigt dies am Beispiel eines exponentiell abklingenden Stroms (rote Kurve) im Vergleich zu einem Strom, der mit vier Schaltvorgängen auf etwa gleichem Niveau gehalten wird, bevor die Abschaltung erfolgt (blaue Kurve). Es verbleibt allerdings eine Welligkeit, die den konstanten Strom überlagert.

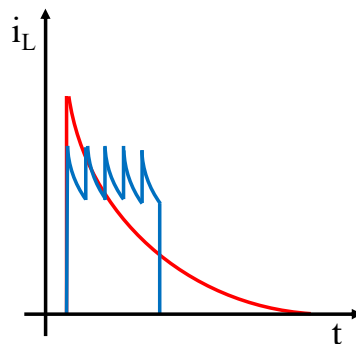


Bild 5.1 Schematischer Stromverlauf ohne Betätigung eines Strom-formenden-Schalters (rote Kurve) und bei Betätigung von vier Strom-formenden-Schaltern (blaue Kurve)

Bei praktischen Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die Verwendung von mehr als vier Strom-formenden Schalten kaum noch Vorteile bringt. Dies liegt daran, dass beim Brennen des Lichtbogens der Strom un stetig fließt und die dadurch verursachte Welligkeit überwiegt. Daher sind für den neuen Langzeitstrom-Generator nur vier Strom-formende-Schalter vorgesehen.

5.1 Vereinfachtes Ersatzschaltbild des neuen Langzeitstrom-Generators

Beim neuen Langzeitstrom-Generator wurden die seriell geschalteten Widerstände zu einer Widerstandskaskade zusammengeschaltet. Ein variabler Abgriff an der Widerstandskaskade dient dazu, die Höhe des Stroms einzustellen. Bild 5.2 zeigt das vereinfachte Ersatzschaltbild unter Vernachlässigung der Induktivitäten im Stromkreis.

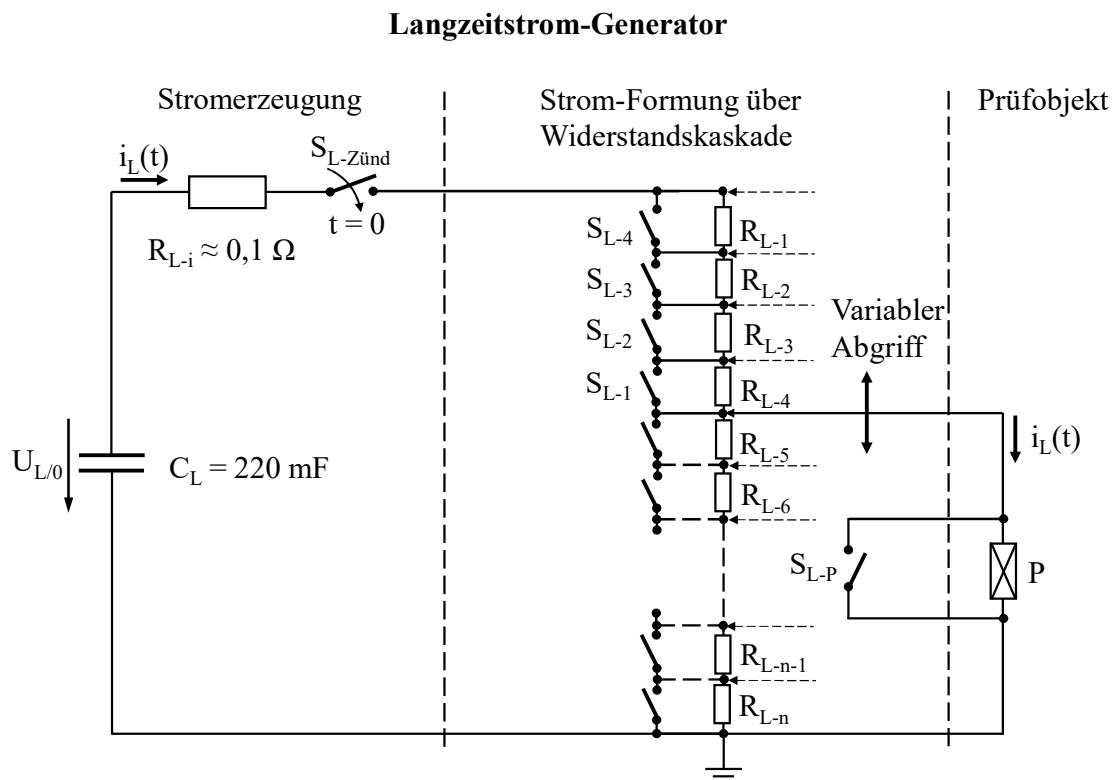


Bild 5.2 Vereinfachtes Ersatzschaltbild des Langzeitstrom-Generators mit der Kapazität C_L , den Strom-formenden Widerständen (R_{L-1} - R_{L-n}) und den Strom-formenden-Schaltern (S_{L-1} , S_{L-2} , S_{L-3} , S_{L-4}) sowie dem Ausschalter S_{L-P} und dem Prüfobjekt P

Der Schaltkreis ist unterteilt in eine Stromerzeugungs-Einheit, eine Strom-formungs-Einheit und eine Prüf-Einheit. Die Strom-formungs-Einheit wird gebildet aus der Widerstandskaskade mit den seriell geschalteten Widerständen $R_{L-1} \dots R_{L-n}$ und den vier Strom-formenden-Schaltern $S_{L-1} \dots S_{L-4}$. Die Strom-formenden-Schalter überbrücken in Bild 5.2 beispielhaft die Widerstände $R_{L-1} \dots R_{L-4}$. Selbstverständlich können die Schalter auch andere Widerstände bzw. Widerstandsreihen der Widerstandskaskade überbrücken.

Wie bereits in Kapitel 4 erwähnt, besteht die Stromerzeugungs-Einheit aus einer Kondensatorbank mit angeschlossenem Hochspannungs-Ladegerät. Die Prüf-Einheit besteht aus dem Prüfobjekt und dem Schalter S_{L-P} , der parallel zum Prüfobjekt im Prüfkreis angebracht ist. Wird der Schalter geschlossen, wird der Strom über dem Prüfobjekt kurzgeschlossen. Der Schalter dient daher als Ausschalter, der den Stromfluss am Prüfobjekt vorbeileitet und so den Strom über dem Prüfobjekt unterbricht.

5.2 Dimensionierung der Widerstandskaskade

Der Gesamtwiderstand wird gebildet durch eine Hintereinanderschaltung des Generator-Innenwiderstands R_{L-i} und den Widerständen der Widerstandskaskade. Erfolgt der Abgriff nach dem v -ten Widerstand (der Widerstandskaskade), ergibt sich der Summen-Widerstand (ΣR_{L-v}) im Stromkreis wie folgt:

$$\Sigma R_{L-v} = R_{L-i} + \sum_1^v R_{L-v} \quad (5.1)$$

Der Summen-Widerstand nimmt somit von Stufe zu Stufe zu, was nach sich zieht, dass der Langzeitstrom in gleichem Maße abnimmt. Setzt man eine gleichmäßige (prozentuale) Abnahme des Stroms (p) von Stufe zu Stufe voraus, gilt für den Summen-Widerstand:

$$\Sigma R_{L-v+1} = (1 + p) \cdot \Sigma R_{L-v} \quad (5.2)$$

Im Folgenden wird angenommen, dass sich der Summen-Widerstand nach jeweils 6 Stufen verdoppelt. Somit gilt:

$$\Sigma R_{L-v+1} = \sqrt[6]{2} \cdot \Sigma R_{L-v} \quad (5.3)$$

Die prozentuale Zunahme des Summen-Widerstandes von Stufe zu Stufe ist gegeben durch:

$$1 + p = \sqrt[6]{2} \quad \Rightarrow \quad p = \sqrt[6]{2} - 1 = 0,1225 = 12,25 \% \quad (5.4)$$

Der Summen-Widerstand entlang der Widerstandskette ergibt sich somit zu:

$$\Sigma R_{L-v} = R_{L-i} \cdot 2^{(v/6)} \quad (5.5)$$

Der Einzel-Widerstand R_{L-v} ergibt sich aus der Differenz der Summen-Widerstände der v -ten Stufe und der $(v-1)$ -ten Stufe. Mit Gleichung (5.5) folgt:

$$\begin{aligned} R_{L-v} &= \Sigma R_{L-v} - \Sigma R_{L-v-1} = R_{L-i} \cdot 2^{\left(\frac{v}{6}\right)} - R_{L-i} \cdot 2^{\left(\frac{v-1}{6}\right)} \\ &= R_{L-i} \cdot 2^{\left(\frac{v-1}{6}\right)} \left[2^{\left(\frac{1}{6}\right)} - 1 \right] \end{aligned} \quad (5.6)$$

Aus Gleichung (5.6) folgt mit Gleichung (5.4) der Einzel-Widerstand zu:

$$R_{L-v} = R_{L-i} \cdot 2^{\left(\frac{v-1}{6}\right)} \cdot p, \text{ mit } p = \sqrt[6]{2} - 1 = 0,122 \quad (5.7)$$

Das Verhältnis des Einzel-Widerstandes (R_{L-v}) zum Summen-Widerstand (ΣR_{L-v}) ergibt sich zu:

$$\begin{aligned} \frac{R_{L-v}}{\Sigma R_{L-v}} &= \frac{R_{L-i} \cdot 2^{\left(\frac{v-1}{6}\right)} \cdot p}{R_{L-i} \cdot 2^{\left(\frac{v}{6}\right)}} = \frac{2^{\left(\frac{v}{6}\right)} \cdot 2^{\left(\frac{-1}{6}\right)} \cdot p}{2^{\left(\frac{v}{6}\right)}} = 2^{\left(\frac{-1}{6}\right)} \cdot p = 2^{\left(\frac{-1}{6}\right)} \left[2^{\left(\frac{1}{6}\right)} - 1 \right] \\ &= 1 - 2^{\left(\frac{-1}{6}\right)} = 0,1091 \end{aligned} \quad (5.8)$$

5.3 Praktische Ausführung der Widerstandskaskade

Bei dem Summen-Widerstand nach Gleichung (5.5) und dem Einzel-Widerstand nach Gleichung (5.7) handelt es sich um Werte einer idealisierten Widerstandskette. In der praktischen Ausführung lassen sich diese Werte nur angenähert einhalten. Dazu werden die Einzel-Widerstände R_{L-v} in acht Gruppen mit je sechs gleichen Widerstandswerten zusammengefasst, die so dimensioniert sind, dass jede Gruppe gegenüber der vorherigen einen doppelten Widerstandswert aufweist:

- Gruppe 1: Jeder Einzel-Widerstand ($R_{L-v} = 0,0167 \, \Omega$) setzt sich zusammen aus einer Parallel-Schaltung von sechs Widerständen mit je $0,1 \, \Omega$
- Gruppe 2: Jeder Einzel-Widerstand ($R_{L-v} = 0,0333 \, \Omega$) setzt sich zusammen aus einer Parallel-Schaltung von sechs Widerständen mit je $0,2 \, \Omega$

- Gruppe 3: Jeder Einzel-Widerstand ($R_{L-v} = 0,0667 \Omega$) setzt sich zusammen aus einer Parallel-Schaltung von sechs Widerständen mit je $0,4 \Omega$
- Gruppe 4: Jeder Einzel-Widerstand ($R_{L-v} = 0,1333 \Omega$) setzt sich zusammen aus einer Parallel-Schaltung von sechs Widerständen mit je $0,8 \Omega$
- Gruppe 5: Jeder Einzel-Widerstand ($R_{L-v} = 0,2667 \Omega$) setzt sich zusammen aus einer Parallel-Schaltung von sechs Widerständen mit je $1,6 \Omega$
- Gruppe 6: Jeder Einzel-Widerstand ($R_{L-v} = 0,5333 \Omega$) setzt sich zusammen aus einer Parallel-Schaltung von sechs Widerständen mit je $3,2 \Omega$
- Gruppe 7: Jeder Einzel-Widerstand ($R_{L-v} = 1,067 \Omega$) setzt sich zusammen aus einer Parallel-Schaltung von sechs Widerständen mit je $6,4 \Omega$
- Gruppe 8: Jeder Einzel-Widerstand ($R_{L-v} = 2,133 \Omega$) setzt sich zusammen aus einer Parallel-Schaltung von sechs Widerständen mit je $12,8 \Omega$

In Tabelle 5.1 sind die idealisierten Werte der Einzel- und Summen-Widerstände den tatsächlichen Widerstandswerten im praktischen Aufbau gegenübergestellt. Hierbei bezeichnet R_{L-v} die Einzel-Widerstände und ΣR_{L-v} den Summen-Widerstand.

Widerstände entlang der Widerstandskaskade					
Stufe	Idealisierte Widerstandswerte (gemäß Gleichungen (5.5) und (5.7))		Beim praktischen Aufbau realisierte Widerstandswerte (gemäß Datenblatt)		
v	R_{L-v}	ΣR_{L-v}	R_{L-v}	ΣR_{L-v}	Widerstandsgruppe
0	0	$R_{L-i} = 0,1 \Omega$	0	$R_{L-i} = 0,1 \Omega$	
1	$0,0122 \Omega$	$0,1122 \Omega$	$0,0167 \Omega$	$0,1167 \Omega$	Gruppe 1: Jeder Einzel-Widerstand $R_{L-v} = 0,0167 \Omega$ setzt sich zusammen aus einer Parallel-Schaltung von 6 Widerständen mit je $0,1 \Omega$
2	$0,0137 \Omega$	$0,1260 \Omega$	$0,0167 \Omega$	$0,1333 \Omega$	
3	$0,0154 \Omega$	$0,1414 \Omega$	$0,0167 \Omega$	$0,1500 \Omega$	
4	$0,0173 \Omega$	$0,1587 \Omega$	$0,0167 \Omega$	$0,1667 \Omega$	
5	$0,0194 \Omega$	$0,1782 \Omega$	$0,0167 \Omega$	$0,1813 \Omega$	
6	$0,0218 \Omega$	$0,2 \Omega$	$0,0167 \Omega$	$0,2 \Omega$	
7	$0,0245 \Omega$	$0,2245 \Omega$	$0,0333 \Omega$	$0,2333 \Omega$	Gruppe 2: Jeder Einzel-Widerstand $R_{L-v} = 0,0333 \Omega$ setzt sich zusammen aus einer Parallel-Schaltung von 6 Widerständen mit je $0,2 \Omega$
8	$0,0275 \Omega$	$0,2520 \Omega$	$0,0333 \Omega$	$0,2667 \Omega$	
9	$0,0309 \Omega$	$0,2828 \Omega$	$0,0333 \Omega$	$0,3000 \Omega$	
10	$0,0346 \Omega$	$0,3175 \Omega$	$0,0333 \Omega$	$0,3333 \Omega$	
11	$0,0389 \Omega$	$0,3564 \Omega$	$0,0333 \Omega$	$0,3667 \Omega$	
12	$0,0436 \Omega$	$0,4 \Omega$	$0,0333 \Omega$	$0,4 \Omega$	

13	0,0490 Ω	0,4490 Ω	0,0667 Ω	0,4667 Ω	Gruppe 3: Jeder Einzel-Widerstand $R_{L-v} = 0,0667 \Omega$ setzt sich zusammen aus einer Parallel- Schaltung von 6 Widerständen mit je 0,4 Ω
14	0,0550 Ω	0,5040 Ω	0,0667 Ω	0,5333 Ω	
15	0,0617 Ω	0,5657 Ω	0,0667 Ω	0,6000 Ω	
16	0,0693 Ω	0,6350 Ω	0,0667 Ω	0,6667 Ω	
17	0,0778 Ω	0,7127 Ω	0,0667 Ω	0,7333 Ω	
18	0,0873 Ω	0,8 Ω	0,0667 Ω	0,8 Ω	
19	0,0980 Ω	0,898 Ω	0,1333 Ω	0,933 Ω	Gruppe 4: Jeder Einzel-Widerstand $R_{L-v} = 0,1333 \Omega$ setzt sich zusammen aus einer Parallel-Schaltung von 6 Widerständen mit je 0,8 Ω
20	0,1100 Ω	1,008 Ω	0,1333 Ω	1,067 Ω	
21	0,1234 Ω	1,131 Ω	0,1333 Ω	1,200 Ω	
22	0,1385 Ω	1,270 Ω	0,1333 Ω	1,333 Ω	
23	0,1555 Ω	1,424 Ω	0,1333 Ω	1,467 Ω	
24	0,1746 Ω	1,6 Ω	0,1333 Ω	1,6 Ω	
25	0,1959 Ω	1,796 Ω	0,2667 Ω	1,867 Ω	Gruppe 5: Jeder Einzel-Widerstand $R_{L-v} = 0,2667 \Omega$ setzt sich zusammen aus einer Parallel-Schaltung von 6 Widerständen mit je 1,6 Ω
26	0,2199 Ω	2,016 Ω	0,2667 Ω	2,133 Ω	
27	0,2469 Ω	2,263 Ω	0,2667 Ω	2,400 Ω	
28	0,2771 Ω	2,540 Ω	0,2667 Ω	2,667 Ω	
29	0,3110 Ω	2,851 Ω	0,2667 Ω	2,933 Ω	
30	0,3491 Ω	3,2 Ω	0,2667 Ω	3,2 Ω	
31	0,3919 Ω	3,592 Ω	0,5333 Ω	3,733 Ω	Gruppe 6: Jeder Einzel-Widerstand $R_{L-v} = 0,5333 \Omega$ setzt sich zusammen aus einer Parallel- Schaltung von 6 Widerständen mit je 3,2 Ω
32	0,4399 Ω	4,032 Ω	0,5333 Ω	4,267 Ω	
33	0,4937 Ω	4,526 Ω	0,5333 Ω	4,800 Ω	
34	0,5542 Ω	5,080 Ω	0,5333 Ω	5,333 Ω	
35	0,6221 Ω	5,702 Ω	0,5333 Ω	5,867 Ω	
36	0,6982 Ω	6,4 Ω	0,5333 Ω	6,4 Ω	
37	0,7838 Ω	7,184 Ω	1,067 Ω	7,467 Ω	Gruppe 7: Jeder Einzel-Widerstand $R_{L-v} = 1,067 \Omega$ setzt sich zusammen aus einer Parallel- Schaltung von 6 Widerständen mit je 6,4 Ω
38	0,8797 Ω	8,064 Ω	1,067 Ω	8,533 Ω	
39	0,9875 Ω	9,051 Ω	1,067 Ω	9,600 Ω	
40	1,1084 Ω	10,16 Ω	1,067 Ω	10,67 Ω	
41	1,2441 Ω	11,40 Ω	1,067 Ω	11,73 Ω	
42	1,3965 Ω	12,8 Ω	1,067 Ω	12,8 Ω	
43	1,5675 Ω	14,37 Ω	2,133 Ω	14,93 Ω	Gruppe 8: Jeder Einzel-Widerstand $R_{L-v} = 2,133 \Omega$ setzt sich zusammen aus einer Parallel-Schaltung von 6 Widerständen mit je 12,8 Ω
44	1,7595 Ω	16,13 Ω	2,133 Ω	17,07 Ω	
45	1,9749 Ω	18,10 Ω	2,133 Ω	19,20 Ω	
46	2,2168 Ω	20,31 Ω	2,133 Ω	21,33 Ω	
47	2,4883 Ω	22,80 Ω	2,133 Ω	23,46 Ω	
48	2,7930 Ω	25,6 Ω	2,133 Ω	25,6 Ω	

Tabelle 5.1 Vergleich der idealisierten Widerstandswerte mit den im praktischen Aufbau verwendeten Widerständen entlang der Widerstandskaskade

5.4 Beispiel für den Einsatz der Strom-formenden-Schalter

Im vorliegenden Beispiel wird ein Langzeitstrom gemäß LPL I zugrunde gelegt. Hierbei ist ein mittlerer Strom von 400 A einzustellen, der nach $t_{L-end} = 500 \text{ ms}$ am Prüfobjekt abgeschaltet wird, um die geforderte Ladung von 200 C zu erzeugen (siehe Anhang B, Tabelle B.3). Der Strom wird mit einer Ladespannung von 2,1 kV durch einen Abgriff an der 34. Stufe, wo der (idealisierte) Summen-Widerstand $5,080 \Omega$ (siehe Tabelle 5.1) beträgt, realisiert.

Der Strom wird unter Verwendung von vier Strom-formenden-Schaltern (S_{L-1} , S_{L-2} , S_{L-3} und S_{L-4}) erzeugt, deren Schaltzeiten ($t_{L-1} \dots t_{L-4}$) im Folgenden ermittelt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Strom durch die Schaltvorgänge jeweils wieder auf seinen ursprünglichen Wert angehoben werden soll (wie in Bild 5.1 ersichtlich). Bild 5.3 zeigt die zugrunde liegende Konfiguration, wobei die Strom-formenden Widerstände $R_{L-34} \dots R_{L-31}$ sukzessive durch die Strom-formenden Schalter $S_{L-1} \dots S_{L-4}$ überbrückt werden.

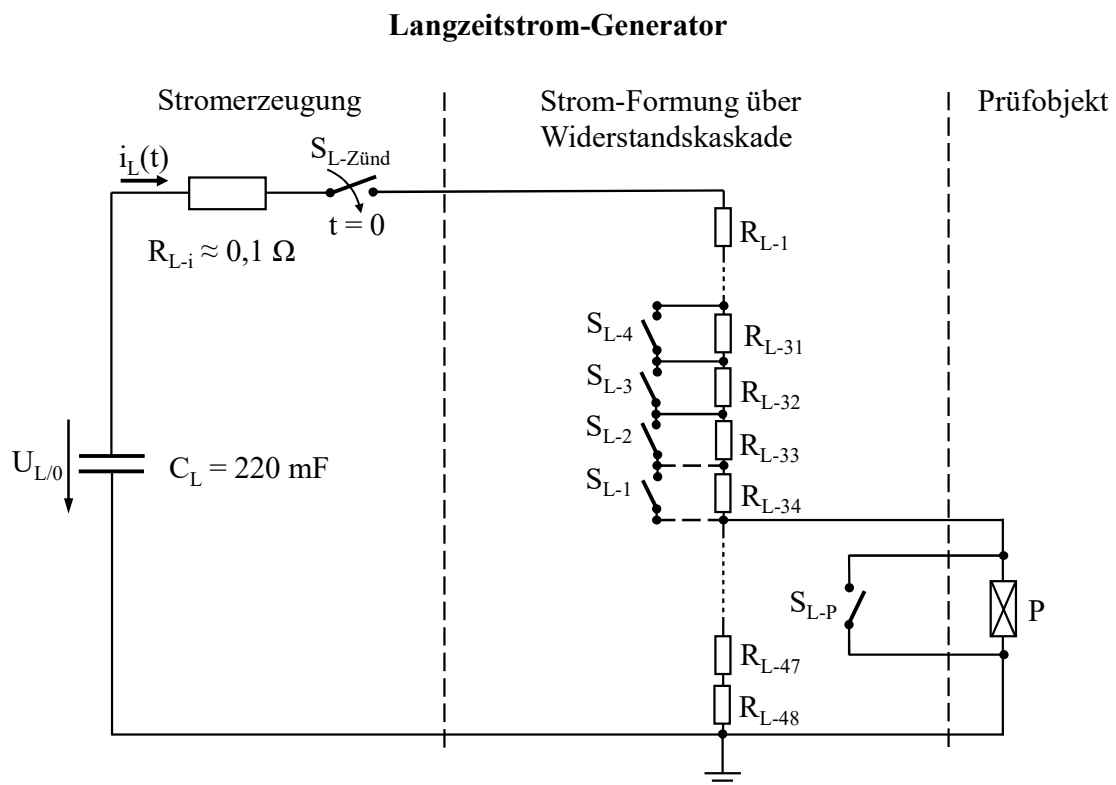


Bild 5.3 Beispielhafte Konfiguration der Strom-formenden-Schalter und Widerstände bei Nachbildung eines Langzeitstroms entsprechend Gefährdungspegel LPL I

Bild 5.4 zeigt den schematischen Stromverlauf, wobei der mittlere „Gleich“-Strom ($i_{L\text{-mittel}}$) von der Welligkeit δI überlagert ist. Vor Betätigung der Strom-formenden-Schalter fällt der Strom jeweils bis auf das Minimum $i_{L\text{-min}} = i_{L\text{-mittel}} - \delta I$ ab. Mit der Betätigung der Strom-formenden-Schalter erhöht sich dann der Strom sprunghaft auf das Maximum $i_{L\text{-max}} = i_{L\text{-mittel}} + \delta I$, bis er schließlich durch Betätigung des Ausschalters $S_{L\text{-P}}$ am Prüfobjekt nach der Zeit $t_{L\text{-end}}$ abgeschaltet wird. In der zeitlichen Reihenfolge wird zunächst der Widerstand $R_{L\text{-34}}$, der den höchsten Widerstandswert aufweist, herausgeschaltet. Anschließend werden die Widerstände $R_{L\text{-33}}$, $R_{L\text{-32}}$ und $R_{L\text{-31}}$ nacheinander herausgeschaltet.

Bei jedem Widerstand, der herausgeschaltet wird, vermindert sich der Summen-Widerstand nach Gleichung (5.8) um $[1 - 2^{-1/6}] \cdot 100\% = 10,91\%$. Der minimale Strom ($i_{L\text{-min}}$) beträgt somit $0,8909 \cdot i_{L\text{-max}}$. Mit dem mittleren Strom von $0,9455 \cdot i_{L\text{-max}}$ ergibt sich daher eine prozentuale Welligkeit von etwa 6 %.

Bei Abgriff an der 34-ten Stufe fällt der Strom exponentiell mit der Zeitkonstanten $\tau = C_L \cdot \Sigma R_{L\text{-34}}$ ab. Für $t \geq 0$ gilt:

$$i_L(t) = i_{L\text{-max}} \cdot e^{-t/(C_L \cdot \Sigma R_{L\text{-34}})} , \quad \text{mit } i_{L\text{-max}} = \frac{U_{L/0}}{\Sigma R_{L\text{-34}}} \quad (5.9)$$

Nach der Zeit $t_{L\text{-1}}$ wird Schalter $S_{L\text{-1}}$ geschaltet. Der Strom ist zu diesem Zeitpunkt auf $i_{L\text{-min}} = i_{L\text{-max}} (1 - [1 - 2^{-1/6}])$ abgefallen. Somit gilt für die Zeit $t_{L\text{-1}}$:

$$\begin{aligned} i_{L\text{-max}}(1 - (1 - 2^{-1/6})) &= i_{L\text{-max}} \cdot e^{-t_{L\text{-1}}/(C_L \cdot \Sigma R_{L\text{-34}})} \\ \Rightarrow 2^{-1/6} &= e^{-t_{L\text{-1}}/(C_L \cdot \Sigma R_{L\text{-34}})} \end{aligned} \quad (5.10)$$

Durch Logarithmieren erhält man:

$$\frac{\ln 2}{6} = \frac{t_{L\text{-1}}}{C_L \cdot \Sigma R_{L\text{-34}}} \quad (5.11)$$

Daraus folgt die Schaltzeit $t_{L\text{-1}}$ zu:

$$t_{L\text{-1}} = C_L \cdot \frac{\ln 2}{6} \cdot \Sigma R_{L\text{-34}} = 0,1155 \cdot C_L \cdot \Sigma R_{L\text{-34}} \quad (5.12)$$

Analog gilt für die Schaltzeiten $t_{L\text{-2}}$, $t_{L\text{-3}}$ und $t_{L\text{-4}}$:

$$t_{L\text{-2}} = t_{L\text{-1}} + C_L \cdot \frac{\ln 2}{6} \cdot \Sigma R_{L\text{-33}}$$

$$= C_L \cdot \frac{\ln 2}{6} [\Sigma R_{L-34} + \Sigma R_{L-33}] \quad (5.13)$$

$$\begin{aligned} t_{L-3} &= t_{L-2} + C_L \cdot \frac{\ln 2}{6} \cdot \Sigma R_{L-32} \\ &= C_L \cdot \frac{\ln 2}{6} [\Sigma R_{L-34} + \Sigma R_{L-33} + \Sigma R_{L-32}] \end{aligned} \quad (5.14)$$

$$\begin{aligned} t_{L-4} &= t_{L-3} + C_L \cdot \frac{\ln 2}{6} \cdot \Sigma R_{L-31} \\ &= C_L \cdot \frac{\ln 2}{6} [\Sigma R_{L-34} + \Sigma R_{L-33} + \Sigma R_{L-32} + \Sigma R_{L-31}] \end{aligned} \quad (5.15)$$

Mit dem (idealisierten) Summen-Widerstand von 5,080 Ω an der 34. Stufe (siehe Tabelle 5.1) ist folgende Schaltzeit t_{L-1} nach Gleichung (5.12) einzustellen:

$$t_{L-1} = 0,1155 \cdot 0,22F \cdot 5,080 \Omega = 129 \text{ ms} \quad (5.16)$$

An der 33. Stufe beträgt der Summen-Widerstand 4,526 Ω . Folgende Schaltzeit t_{L-2} ist nach Gleichung (5.13) einzustellen:

$$t_{L-2} = 0,1155 \cdot 0,22F \cdot (5,080\Omega + 4,526\Omega) = 244 \text{ ms} \quad (5.17)$$

An der 32. Stufe beträgt der Summen-Widerstand 4,032 Ω . Folgende Schaltzeit t_{L-3} ist nach Gleichung (5.14) einzustellen:

$$t_{L-3} = 0,1155 \cdot 0,22F \cdot (5,080\Omega + 4,526\Omega + 4,032\Omega) = 347 \text{ ms} \quad (5.18)$$

An der 31. Stufe beträgt der Summen-Widerstand 3,592 Ω . Folgende Schaltzeit t_{L-4} ist nach Gleichung (5.15) einzustellen:

$$t_{L-4} = 0,1155 \cdot 0,22F \cdot (5,080\Omega + 4,526\Omega + 4,032\Omega + 3,592\Omega) = 438 \text{ ms} \quad (5.19)$$

Da sich die geforderten Schaltzeiten in einer Größenordnung von 100 ms befinden, können mechanische Schalter mit Schaltverzugszeiten im ms-Bereich verwendet werden und die Ansteuerung der Strom-formenden-Schalter kann mit einer programmierbaren Siemens LOGO/SPS-Steuerung erfolgen, die Verarbeitungszeiten bis zu 10 ms aufweist. Aus dem gleichen Grund wird der Ausschalter auch als mechanischer Schalter realisiert.

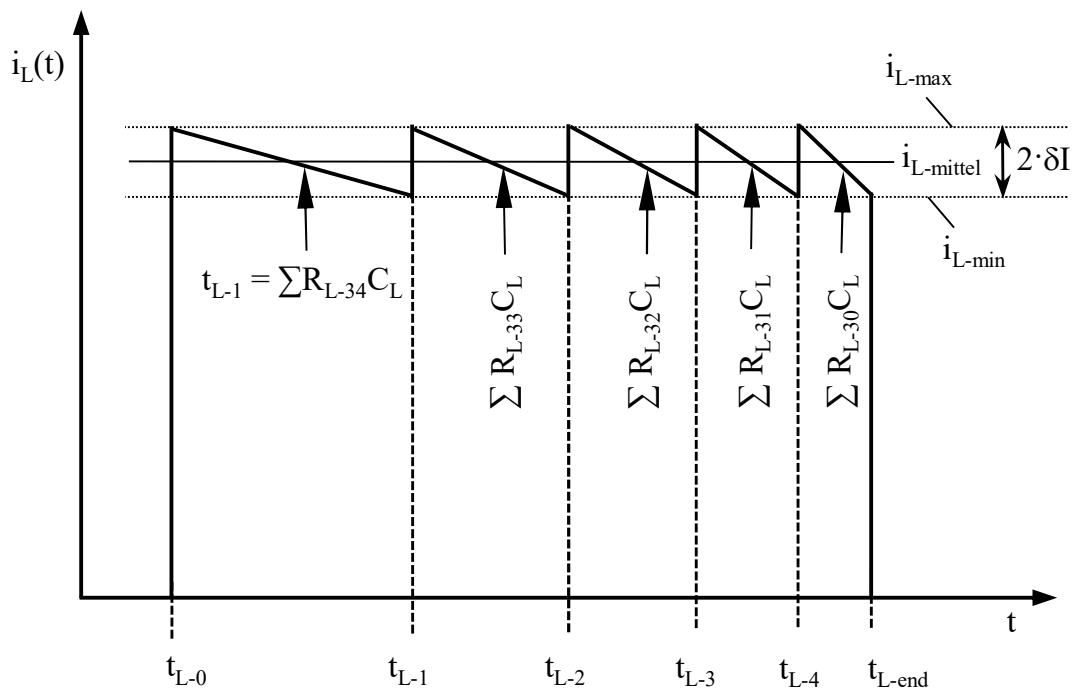


Bild 5.4 Idealisierter und schematisch dargestellter Verlauf des Langzeitstroms bei Einsatz von vier Strom-formenden-Schaltern und dem Ausschalter (S_{L-1} , S_{L-2} , S_{L-3} , S_{L-4} , S_{L-P})

5.5 Praktische Ausführung der Einzel-Widerstände

Bild 5.5 zeigt eine schematische Zeichnung eines Einzel-Widerstandes (R_{L-v}) bestehend aus 6 parallel geschalteten Keramik-Scheiben-Widerständen. Die kreisrunden Keramik-Scheiben haben einen Außendurchmesser von 15 cm, eine Dicke von 2,54 cm und ein kreisrundes Mittenloch mit einem Durchmesser von 3,3 cm. Die Keramik-Scheiben sind auf ihrer Ober- und Unterseite mit einer metallenen Kontaktschicht versehen. Diese Scheiben werden über je eine 2 mm dicke Blechplatte aus Kupfer auf der Ober- und Unterseite kontaktiert.

Die Widerstände einschließlich der kupfernen Kontaktplatten wurden aufeinander gestapelt und bilden so die Widerstandskaskade. Zur Fixierung der Widerstände wurden Befestigungsstäbe aus Isoliermaterial durch das Mittenloch geführt und auf der Grundplatte befestigt. Um einen variablen Abgriff zu ermöglichen (siehe Bild 5.5), wurden an jeder Kupfer-Platte entsprechende Kontaktstellen geschaffen. Die maximale Energieaufnahme jeder Keramik-Scheibe beträgt 120 kJ, so dass der Einzel-Widerstand (R_{L-v}) für eine maximale Energieaufnahme von 720 kJ ausgelegt ist.

Um die Kombination mit der impulsförmigen Komponente A (siehe [87] [33]) zu ermöglichen, wird der Langzeitstrom-Generator an einen Stoßstrom-Generator angeschlossen (siehe Kapitel 4). In diesem Fall liegt die Ladespannung des Stoßstrom-Generators von bis zu 100 kV an der Widerstandskaskade an. Wie oben erwähnt, beträgt die an den Widerständen anliegende Spannung maximal etwa 11 % der Ladespannung. Rechnet man eine Sicherheitsmarge mit ein, muss die Spannungsfestigkeit der Widerstände entsprechend höher als 11 kV sein.

Die Spannungsfestigkeit der Widerstände wurde experimentell ermittelt, indem ein Keramik-Scheiben-Widerstand mit impulsförmiger Blitzstoßspannung ($1,2 \mu\text{s} / 50 \mu\text{s}$) getestet. Da die Keramik-Widerstände ein nichtlineares spannungsabhängiges Verhalten besitzen, bricht die Spannung kurz nach dem Anlegen zusammen und es tritt am zu prüfenden Widerstand eine Spannungsform von etwa $0,18/0,38 \mu\text{s}$ auf. Da selbst bei der maximalen Prüfspannung von 50 kV keinerlei Überschlüge am Widerstand oder sonstige Beeinträchtigungen auftraten, ist eine hinreichende Spannungsfestigkeit für die Widerstände nachgewiesen.

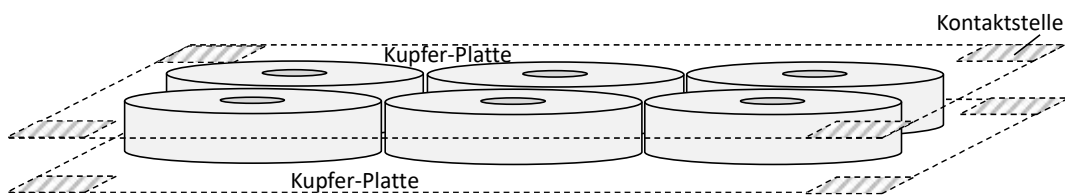


Bild 5.5 Schematische Zeichnung eines Einzel-Widerstands (R_{L-v}) bestehend aus 6 kreisrunden Keramik-Scheiben-Widerständen mit Mittenloch und 2 Kupferplatten zur Kontaktierung der Ober- und Unterseite

6. Theoretische Betrachtungen zum Langzeitstrom-Generator bei Berücksichtigung der Induktivität

Bei einer vereinfachten Betrachtung wurde im Kapitel 5 die Induktivität im Stromkreis des neuen Langzeitstrom-Generators vernachlässigt. Im vorliegenden Kapitel wird nun der Einfluss der Induktivität berücksichtigt. Dazu wurden Simulationsrechnungen mit dem Programm LTspice [88] durchgeführt. Die Simulationsrechnungen dienen dazu, leistungsbezogene Kenndaten des Langzeitstrom-Generators bei verschiedenen Betriebszuständen zu analysieren. Insbesondere soll ermittelt werden, wie die in der Normung (siehe Anhang B) festgelegten Langzeitströme am besten realisiert werden können. Den Simulationsrechnungen liegt das Ersatzschaltbild nach Bild 6.1 zugrunde.

Eine weitere Forderung ist, dass der Langzeitstrom-Generator mit dem bereits bestehenden Stoßstrom-Generator kombiniert werden kann. Dementsprechend müssen die Bauteile ausgewählt werden, damit sie beim Zuschalten des Stoßstrom-Generators nicht spannungsmäßig überlastet werden. Zu diesem Zweck wurde das Programm CONCEPT II [89] eingesetzt - insbesondere um die maximal möglichen Belastungen zu bestimmen.

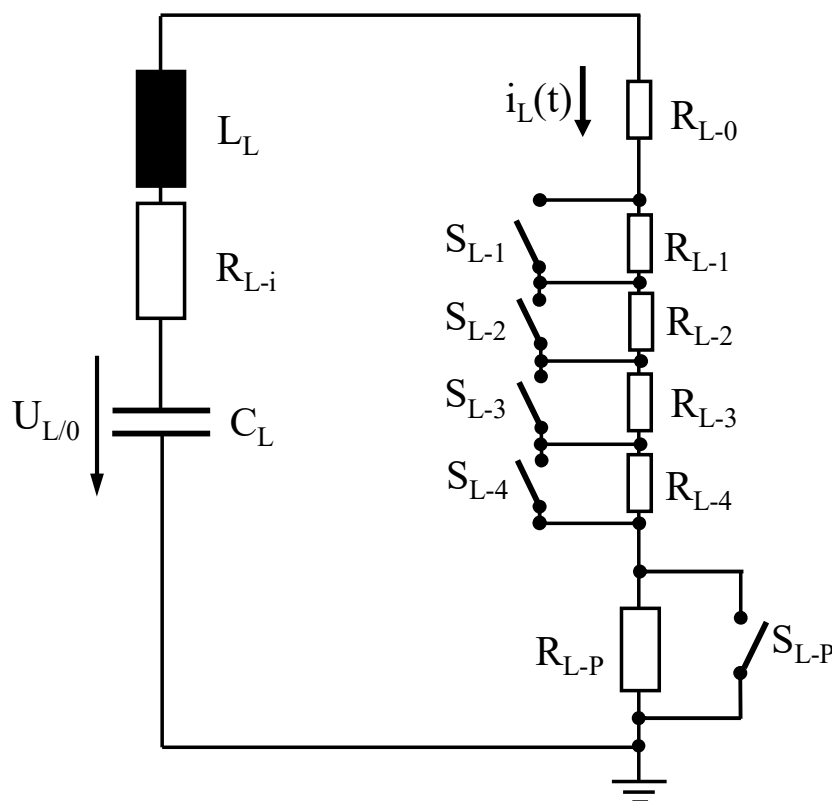


Bild 6.1 Ersatzschaltbild des Langzeitstrom-Generators mit kaskadenartig aufgebauten externen Widerständen R_{L-0} bis R_{L-4}

6.1 Festlegung der Parameter des Langzeitstrom-Generators

Die Simulations-Rechnungen (mit dem Programm LTspice) dienen dazu, folgende Anforderungen an den Langzeitstrom-Generator abzubilden:

- Nachbildung der Langzeitströme entsprechend den Blitzschutz-Normen
- Ermittlung der leistungsbezogenen Kenndaten des neuen Langzeitstrom-Generators insbesondere im Hinblick auf das maximal realisierbare Strommaximum und die dabei umgesetzte (maximale) Ladung

Um diese Anforderungen abzubilden, wurden die nachfolgenden Größen analysiert.

6.1.1 Dimensionierung der Induktivität für den aperiodisch gedämpften Fall

Wie bereits in Kapitel 4.3.3 beschrieben, sollen die Langzeitströme einen unipolaren Verlauf aufweisen. Deswegen wird der Langzeitstrom-Generator für den aperiodischen Fall ausgelegt, wobei (mit $R_L = 0,1 \, \Omega$ und $C_L = 0,22 \, \text{F}$) für die maximal zulässige Induktivität (L_L) gilt:

$$R_L > 2 \sqrt{\frac{L_L}{C_L}} \Rightarrow L_L < 0,25 \cdot C_L \cdot R_L^2 < 550 \, \mu\text{H} \quad (6.1)$$

Die in Bild 6.1 dargestellten Strom-formenden-Schalter $S_{L-1} \dots S_{L-4}$ dienen dazu, um durch zeitlich gestaffeltes Kurzschließen von Widerständen näherungsweise einen Langzeitstrom mit konstantem Wert, einen sogenannten „Rechteck“-Strom, zu realisieren (siehe Kapitel 5). Die verwendete LOGO/SPS-Steuerung erlaubt allerdings nur Schaltvorgänge in einem Zeitraster von 10 ms. Damit bei direkt hintereinander folgenden Schaltvorgängen keine unzulässigen zeitlichen Überlagerungen auftreten, sollte die Schaltverzugszeit (bei den einzelnen Schaltvorgängen) gegenüber diesem Zeitraster (von 10 ms) hinreichend klein sein. Unter Berücksichtigung von zeitlichen Schalt-Toleranzen erscheint es daher als sinnvoll, die Schaltverzugszeit auf 1 ms zu begrenzen.

Bei den Schaltvorgängen (Schließen der Strom-formenden-Schalter, siehe Bild 6.1) ändert sich der Strom mit der Zeitkonstanten $\tau_L = L_L/R_L$. Wird davon ausgegangen, dass die Auswirkung eines Schaltvorgangs bis zu 5 Zeitkonstanten lang zu beachten ist, ergibt sich die Schaltverzugszeit zu $5\tau_L = 5 \cdot L_L/R_L$. Soll nun die Schaltverzugszeit auf eine Millisekunde begrenzt werden, gilt:

$$5 \cdot L_L / R_L \leq 1 \text{ ms} \quad (6.2)$$

Soll beispielsweise ein Langzeitstrom von 800 A bei einer Ladespannung von 1,5 kV erzeugt werden, ist hierfür ein Widerstand von 1,875 Ω erforderlich. Nach Gleichung (6.2) ergibt sich hieraus eine maximal zulässige Induktivität von $L_L = 375 \text{ } \mu\text{H}$. Bei kleinerem Widerstand (R_L) ist die Induktivität (L_L) entsprechend zu reduzieren. Somit ist eine veränderbare Induktivität erforderlich, die den individuellen Anforderungen angepasst werden kann.

Dies kann mit einem modularen Aufbau der Induktivität erreicht werden, wobei ein maximaler Wert von 400 μH sinnvoll erscheint. Mit diesem Wert wäre auch eine hinreichende Sicherheitsmarge gegenüber der maximal erlaubten Induktivität von 550 μH (siehe Gleichung (6.1)) gewährleistet.

6.1.2 Dimensionierung der Kapazität und der Widerstände

Der Langzeitstrom-Generator verfügt über eine modular aufgebaute Kondensatorbank, die aus 50 einzelnen Kondensatoren zu je 4,4 mF besteht. Die Kondensatoren lassen sich beliebig (parallel) zusammenschalten, sodass sich eine Kapazität (C_L) von 4,4 mF bis 0,22 F in Schritten von 4,4 mF realisieren lässt. Die Ladespannung ($U_{L/0}$) kann stufenlos eingestellt werden, ist aber auf ein Maximum von 2,25 kV begrenzt, siehe Kapitel 4.3.1.

Jeder Kondensator ist mit einem Vorwiderstand von 4 Ω ausgestattet, um den Strom im Fehlerfall, d.h. bei Kurzschluss eines Kondensators, auf Werte um etwa 500 A zu begrenzen. Ausgenommen hiervon sind 4 Kondensatoren, bei denen der Vorwiderstand auf 2 Ω reduziert ist.

Bei Verwendung aller 50 Kondensatoren bildet die Parallel-Schaltung der einzelnen Vorwiderstände einen Gesamt-Vorwiderstand von 0,074 Ω . Durch die Zuleitungen kommt ein Widerstand von etwa 0,026 Ω hinzu, so dass der Innenwiderstand des Langzeitstrom-Generators (R_{L-i}) etwa 0,1 Ω beträgt. Werden weniger als 50 Kondensatoren verwendet, umfasst die Parallel-Schaltung entsprechend weniger Vorwiderstände, wodurch sich der Innenwiderstand des Generators entsprechend erhöht.

Erfolgt keine äußere Beschaltung des Generators, bildet dessen Innenwiderstand von $0,1 \, \Omega$ den kleinsten möglichen Wert für den Generatorwiderstand. Der maximal mögliche Strom ergibt sich somit zu $2,250 \, \text{kV} / 0,1 \, \Omega \approx 23 \, \text{kA}$. Durch äußere Beschaltung des Generators kann der Generatorwiderstand (R_L) bis auf $25,6 \, \Omega$ (maximaler Wert der Widerstandskaskade, siehe Tabelle 5.1) erhöht werden, was Langzeitströme bis unter $100 \, \text{A}$ ermöglicht.

6.2 Ergebnisse der numerischen Simulation mit dem Programm LTspice

6.2.1 Parameter der genormten Langzeitströme

Tabelle 6.1 enthält die Parameter der Langzeitströme in der Blitzschutz-Normung (siehe Anhang B).

Norm	Ladung	Dauer
DIN EN IEC 61400-24	$600 \, \text{C} \pm 20 \, \%$	$\leq 1 \, \text{s}$
VDE 0185-305-1, LPL I EUROCAE ED-84, Komponente C MIL-STD-464D, Komponente C AECTP-250, Komponente C	$200 \, \text{C} \pm 20 \, \%$	$0,5 \, \text{s} \pm 10 \, \%$ ($0,25 \, \text{s} - 1 \, \text{s}$)
VDE 0185-305-1, LPL II	$150 \, \text{C} \pm 20 \, \%$	$0,5 \, \text{s} \pm 10 \, \%$
VDE 0185-305-1, LPL III	$100 \, \text{C} \pm 20 \, \%$	$0,5 \, \text{s} \pm 10 \, \%$

Tabelle 6.1 Langzeitströme in der Normung

Bei Flugzeugen wirkt auf die Strukturelemente oftmals nicht der vollständige Langzeitstrom, sondern nur ein reduzierter Anteil. Nach EUROCAE ED-84 [33] werden diese reduzierten Anteile durch die Stromkomponenten B und C* berücksichtigt (siehe Kapitel 2.3.2). Tabelle 6.2 enthält die Kenngrößen dieser Stromkomponenten, die bei Prüfungen in der Regel nicht getrennt, sondern als kombinierte Stromkomponente B+C* realisiert werden.

Norm	Ladung	Mittleres Strommaximum	Zeitdauer
Stromkomponente B	$10 \, \text{C} \pm 10 \, \%$	$2 \, \text{kA} \pm 10 \, \%$	$\leq 5 \, \text{ms}$
Stromkomponente C*	$20 \, \text{C} \pm 20 \, \%$	$\geq 400 \, \text{A}$	$\leq 50 \, \text{ms}$

Tabelle 6.2 Langzeitströme bei reduzierten Anforderungen nach [33]

6.2.2 Rechnerische Simulation der genormten Langzeitströme

Die rechnerischen Simulationen haben ergeben, dass sich die Langzeitströme nach Tabelle 6.1 und Tabelle 6.2 problemlos mit dem neuen Langzeitstrom-Generator realisieren lassen. Dies kann, aufgrund der unterschiedlichen Möglichkeiten bei den Einstellungen des Langzeitstrom-Generators auf vielfältige Weise erfolgen. Im Folgenden wird daher nur jeweils ein typisches Beispiel für eine mögliche Realisierung der genormten Langzeitströme aufgezeigt.

6.2.2.1 Nachbildung des Langzeitstroms nach DIN EN IEC 61400-24

Bei einer maximalen Ladespannung von 2,25 kV und einer maximalen Kapazität von $C_L = 0,22$ F ergibt sich eine Ladung von 495 C. Damit lässt sich gerade noch der nach DIN EN IEC 61400-24 [32] geforderte Langzeitstrom von 600 C innerhalb der Toleranzen von ± 20 % (480 C ... 720 C) realisieren.

Bild 6.2 zeigt ein Beispiel. Hierbei wurden drei Strom-formende-Schalter verwendet, um einen näherungsweise rechteckförmigen Stromverlauf zu erzielen. Um z.B. einen mittleren Strom $i_{L\text{-mittel}}$ von 1,2 kA über eine Zeitdauer von 400 ms zu erzeugen, wurde der Anfangswiderstand des Langzeitstrom-Generators (einschließlich Prüfobjekt R_{L-P}) zu 1,4 Ω gewählt.

Bei Einschalten des Langzeitstrom-Generators weist der Strom zunächst ein Maximum ($i_{L\text{-max-1}}$) von 1,61 kA auf und nimmt dann exponentiell ab. Bei Erreichen des Stromminimums ($i_{L\text{-min-1}}$) von 963 A nach der Zeit (t_{L-1}) von 160 ms wird Schalter S_{L-1} geschlossen, wodurch ein Widerstand von 0,6 Ω herausgeschaltet wird und der Strom auf ein 2. Maximum von $i_{L\text{-max-2}} = 1,66$ kA angehoben wird. Nach Abklingen des Stroms auf $i_{L\text{-min-2}} = 854$ A nach der Zeit (t_{L-2}) von 280 ms wird Schalter S_{L-2} geschlossen, wodurch ein Widerstand von 0,4 Ω herausgeschaltet wird und der Strom erneut auf ein 3. Maximum ($i_{L\text{-max-3}}$) von 1,64 kA angehoben wird. Nach Abklingen des Stroms auf $i_{L\text{-min-3}} = 871$ A nach der Zeit (t_{L-3}) von 340 ms wird schließlich Schalter S_{L-3} geschlossen, wodurch ein Widerstand von 0,2 Ω herausgeschaltet wird und der Strom dadurch auf ein 4. Maximum ($i_{L\text{-max-4}}$) von 1,55 kA angehoben wird. Im Anschluss daran klingt der Strom exponentiell auf seinen Endwert ($i_L = 0$) ab.

Tabelle 6.3 enthält eine Übersicht über die Schaltzeitpunkte der Schalter und die von ihnen herausgeschalteten Widerstände.

Schalter	S_{L-1}	S_{L-2}	S_{L-3}
Schaltzeitpunkt	$t_{L-1} = 160 \text{ ms}$	$t_{L-2} = 280 \text{ ms}$	$t_{L-3} = 340 \text{ ms}$
Widerstand	$R_{L-1} = 0,6 \, \Omega$	$R_{L-2} = 0,4 \, \Omega$	$R_{L-3} = 0,2 \, \Omega$

Tabelle 6.3 Schaltzeiten (t_{L-1} , t_{L-2} , t_{L-3}) der Schalter (S_{L-1} , S_{L-2} , S_{L-3}) und die von ihnen herausgeschalteten Widerstände (R_{L-1} , R_{L-2} , R_{L-3})

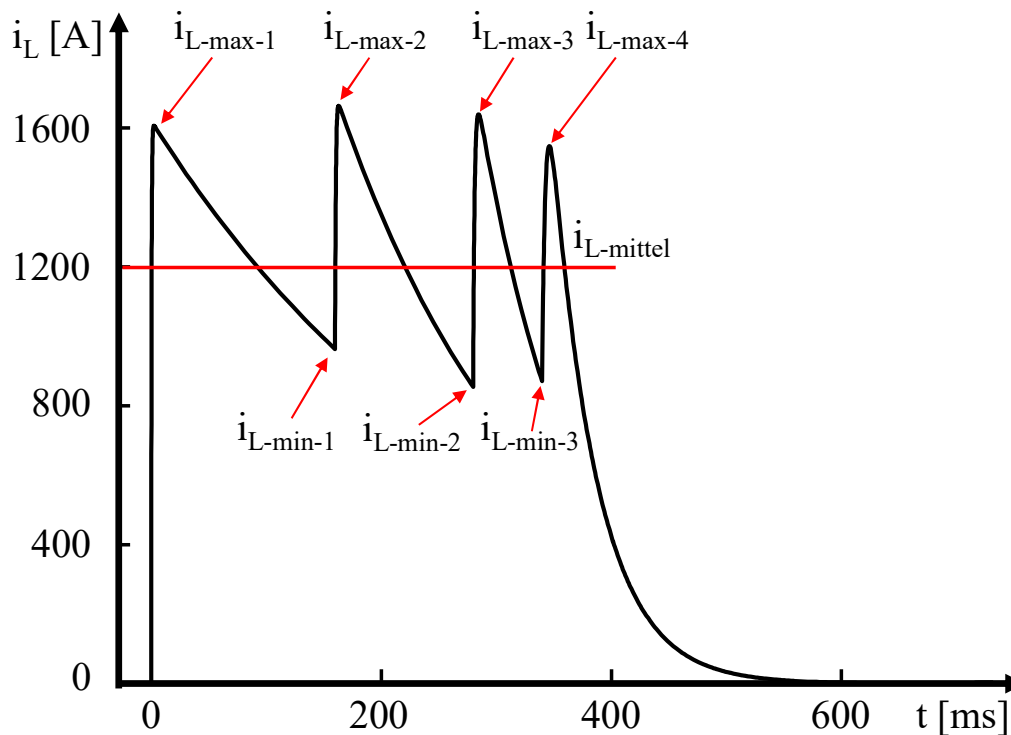


Bild 6.2 Simulationsergebnis für einen Langzeitstrom mit einer Ladung von 495 C bei Verwendung von drei Schaltern zur Erzeugung eines näherungsweise rechteckförmigen Stromverlaufs ($U_{L/0} = 2,25 \text{ kV}$, $C_L = 0,22 \text{ F}$)

6.2.2.2 Nachbildung der Langzeitströme nach VDE 0185-305-1

Bild 6.3 zeigt die Simulationsergebnisse für die Langzeitströme nach VDE 0185-305-1 gemäß der Gefährdungspegel LPL I, LPL II und LPL III. Für den Langzeitstrom-Generator wurde eine maximale Kapazität von $C_L = 0,22 \text{ F}$ angenommen. Die Kondensatoren wurden aufgeladen auf eine Ladespannung ($U_{L/0}$) von 2,15 kV für LPL I, von 2,25 kV für LPL II und von 2,0 kV für LPL III. Der Gesamtwiderstand des Langzeitstrom-Generators (einschließlich Prüfobjekt R_{L-P}) wurde zu $3,9 \, \Omega$ für LPL I, zu $6,6 \, \Omega$ für LPL II und zu $8,7 \, \Omega$ für LPL III gewählt. Entsprechend den Vorgaben (siehe Tabelle 6.1) wurde der Strom über das Prüfobjekt nach 500 ms durch Schließen des

Schalters S_{L-P} abgeschaltet. Die Kenngrößen der Langzeitströme sind in Tabelle 6.4 zusammengestellt. Die Ladungen (Q_L) weichen nur unwesentlich von den geforderten Parametern nach Tabelle 6.1 ab. Die Mittelwerte des Stroms ($i_{L-mittel}$) weichen ebenfalls nur unwesentlich von den gewünschten Werten von 400 A für LPL I, 300 A für LPL II und 200 A für LPL III ab.

Gefährdungspegel	Kenngrößen der simulierten Ströme			
	Q_L [C]	$i_{L-mittel}$ [A]	i_{L-max} [A]	i_{L-min} [A]
LPL I	208,3	404,8	547,2	307,9
LPL II	144,5	290,9	341,2	242,1
LPL III	101,0	201,1	229,2	176,9

Tabelle 6.4 Kenngrößen der simulierten Langzeitströme nach VDE 0185-305-1

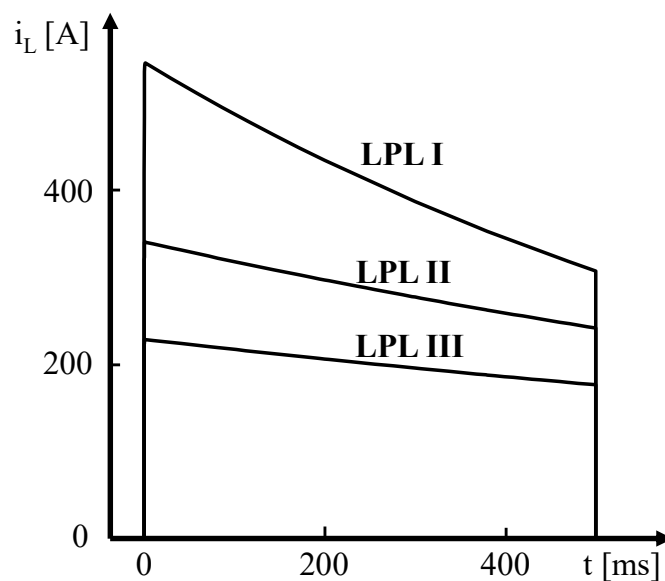


Bild 6.3 Simulationsergebnisse für die Langzeitströme nach VDE 0185-305-1 gemäß den Gefährdungspegeln LPL I, LPL II und LPL III

Da keine Strom-formenden-Schalter verwendet wurden, klingen die Ströme stets exponentiell vom Maximalwert i_{L-max} auf den Minimalwert i_{L-min} ab. Dadurch sind die Langzeitströme bei ihrer Beendigung gegenüber ihrem Beginn signifikant reduziert. Besonders stark ist diese Reduktion mit über 40 % beim Langzeitstrom des Gefährdungspegels LPL I.

Durch den Einsatz der Strom-formenden-Schalter kann eine wesentlich bessere Vergleichmäßigung des Stroms erreicht werden, wobei sich die Abweichung analog zur Anzahl der eingesetzten Schalter reduziert. Bild 6.4 zeigt hierfür ein Beispiel, wobei 4 Strom-formende-Schalter verwendet wurden. Dadurch wird ein näherungsweise rechteckförmiger Strom von 400 A erzeugt, der eine maximale Abweichung von lediglich $\pm 10,9\%$ aufweist.

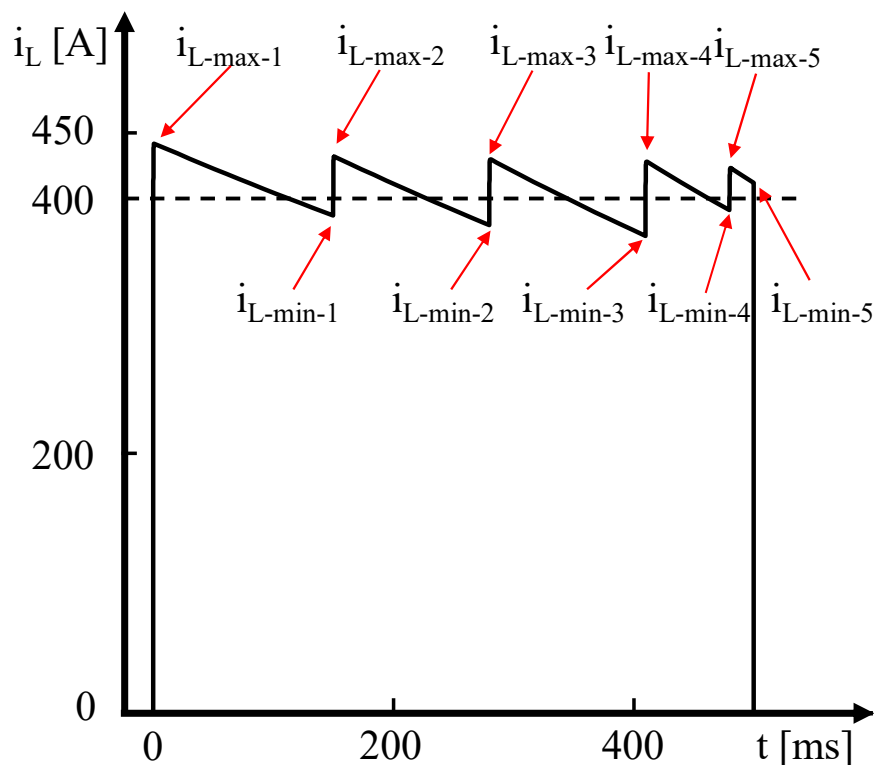


Bild 6.4 Nachbildung eines Langzeitstroms nach VDE 0185-305-1, LPL I [31] bei Verwendung von vier Strom-formenden-Schaltern und bei Stromabschaltung nach 500 ms

6.2.2.3 Nachbildung der kombinierten Stromkomponente B+C*

Für die Nachbildung der kombinierten Stromkomponente B+C* wurden vier Kondensatoren zu je 4,4 mF verwendet, sodass die Gesamtkapazität 17,6 mF beträgt. Damit wäre bei maximaler Ladespannung (2,25 kV) eine maximale Ladung von 39,6 C möglich. Um den für Stromkomponente B geforderten mittleren Strom von 2 kA über eine Zeitdauer von 5 ms realisieren zu können, wurde der Vorwiderstand der Kondensatoren jeweils auf $2\ \Omega$ reduziert.

Die blaue Kurve in Bild 6.5 zeigt ein Beispiel für die Simulation der kombinierten Stromkomponente B+C*. Die Ladespannung wurde zu 1,7 kV gewählt, so dass sich die Gesamtladung zu 29,9 C ergibt. Für die Stromkomponente B ergibt sich im geforderten Zeitraum von 5 ms ein mittlerer Strom von 2,06 kA und eine Ladung von 11 C, was den Anforderungen nach Tabelle 6.2 entspricht. Der anschließende exponentiell abklingende Strom bildet die Stromkomponente C* und endet innerhalb einer Zeitdauer von 50 ms.

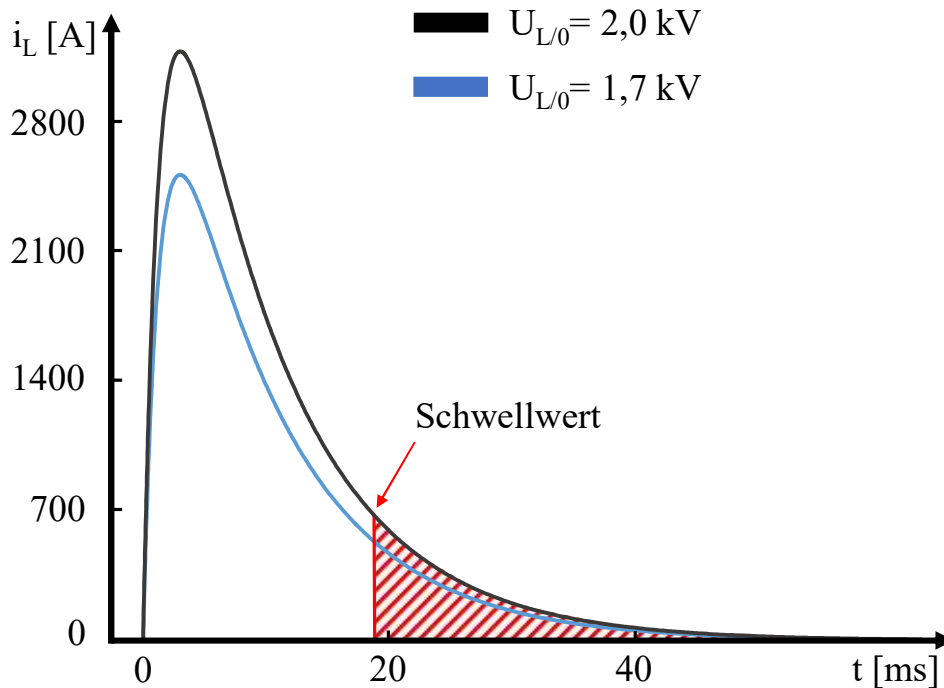


Bild 6.5 Simulation der kombinierten Stromkomponente B + C* bei einer Kapazität von 17,4 mF und einer Ladespannung von 1,7 kV (blaue Kurve) und 2,0 kV (schwarze Kurve)

Das Abklingen des Stroms erfolgt in der Praxis allerdings nur bis zu einem gewissen Schwellwert, wenn wie üblich eine Funkenstrecke im Stromkreis verwendet wird. Mit dem Abklingen des Stroms nimmt nämlich die in den Kondensatoren gespeicherte Ladung und somit die Spannung ab. Unterschreitet die Spannung einen Schwellwert von typischerweise einigen 100 V, lässt sich der Lichtbogen in der Funkenstrecke nicht aufrechterhalten und der Strom bricht ab.

Durch das frühzeitige Erlöschen des Stroms wird die Ladung gemindert, was in Bild 6.5 durch die rot markierte Fläche dargestellt ist. Daher sollte grundsätzlich ein etwas höherer Strom eingestellt werden. Beispielsweise zeigt die schwarze Kurve den Stromverlauf bei Erhöhung der Ladespannung auf 2 kV. Dadurch ergibt sich für die Stromkomponente B ein mittlerer Strom von 2,4 kA, der gerade noch im Toleranzbereich liegt.

6.2.2.4 Maximal mögliche Langzeitströme

Bild 6.6 zeigt die Ergebnisse der rechnerischen Simulation für die maximal möglichen Langzeitströme in Abhängigkeit von der Anzahl der verwendeten Kondensatoren. Für die Kondensatoren wurde eine maximale Spannung von 2,25 kV angenommen. Bei dieser Grenzwertbetrachtung wurden die Induktivität, die externen Widerstände und der Widerstand des Prüfobjektes vernachlässigt. Im Stromkreis (siehe Bild 6.1) verblieb somit nur der Innenwiderstand des Generators (R_{L-i}).

Die Berechnungen ergaben, dass bei Verwendung der Gesamtanzahl von 50 Kondensatoren ein Strom bis maximal 22,5 kA erreichbar ist. Werden weniger Kondensatoren verwendet, verringert sich der Strom entsprechend.

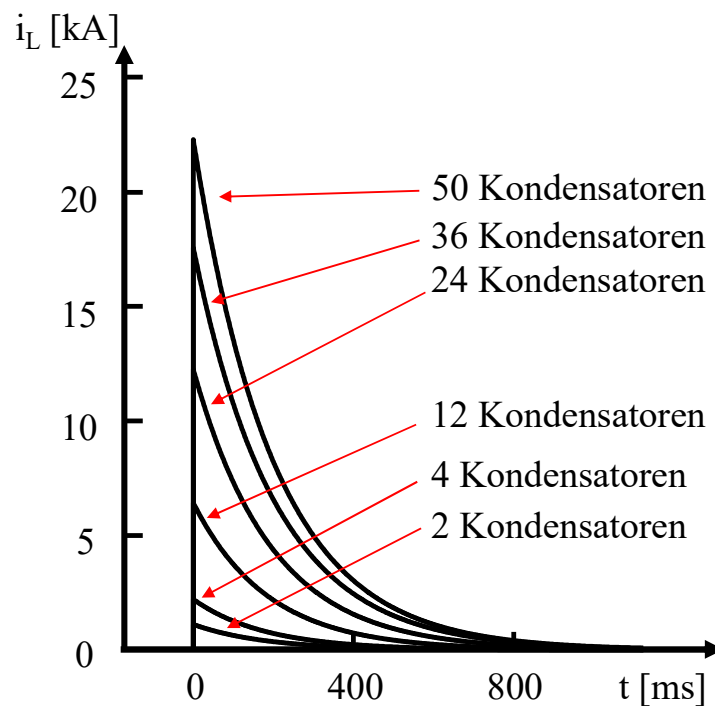


Bild 6.6 Ergebnisse der rechnerischen Simulation für die maximal möglichen Langzeitströme in Abhängigkeit von der Anzahl der verwendeten Kondensatoren

6.3 Maximale Spannung am Ausgang des Langzeitstrom-Generators

Für den Ausgang des Langzeitstrom-Generators ist zu beachten, dass bei Kombination mit einem externen Generator wesentlich höhere Spannungen anliegen können. Dies ist der Fall bei Verwendung eines Marx-Generators oder bei Kombination mit einem Stoßstrom-Generator.

6.3.1 Maximal zu erwartende Spannung bei Kombination mit einem Marx-Generator

Wird der Langzeitstrom-Generator mithilfe eines Funkenstrecken-Schalters betrieben, kann der an der Universität der Bundeswehr München bestehende Marx-Generator zum Zünden des Funkenstrecken-Schalters genutzt werden. Der Marx-Generator ist ein Stoßspannungs-Generator, der impulsförmige Spannungen mit einer typischen Impulsform von $1,2/50 \mu\text{s}$ erzeugt [90]. Der Marx-Generator hat 12 Stufen, die jeweils bis auf 100 kV aufgeladen werden können. Dies ermöglicht Spannungsimpulse bis etwa 1 MV zu erzeugen.

Jede Stufe des Marx-Generators verfügt über einen separaten Abgriff, sodass wesentlich geringere Spannungsimpulse darstellbar sind. Für das Zünden des Funkenstrecken-Schalters ist eine Spannung von einigen 10 kV ausreichend. Diese Spannung liegt am Ausgang des Langzeitstrom-Generators an und muss von diesem abgeblockt werden. Daher ist für diesen Betriebsfall die Vorschaltung einer Entkopplungsinduktivität $L_{\text{Entkopplung}}$ (siehe Kapitel 4.2) unerlässlich.

6.3.2 Maximal zu erwartende Spannung bei Kombination mit dem Stoßstrom-Generator

Im Folgenden wird der Fall betrachtet, dass sich beim Schalten des Stoßstrom-Generators die Generator-Spannung als Spannungswelle über die Zuleitungen zum Langzeitstrom-Generator ausbreitet. Trifft die Spannungswelle am Langzeitstrom-Generator auf einen hochohmigen Eingang, beispielsweise bei einem offenen Schalter, sind dort Spannungsüberhöhungen zu erwarten.

Um diese Spannungsüberhöhungen abzuschätzen, wurden (elektrodynamische) Berechnungen mit dem Rechenprogramm CONCEPT II durchgeführt [91]. Das Rechenprogramm basiert auf der Momenten-Methode bei Lösung der kompletten Maxwell – Gleichungen im Frequenzbereich. Die zeitlich abhängigen Größen wie Ströme

und Spannungen werden über die inverse Fourier-Transformation berechnet. Der Skin-Effekt ist bei den Berechnungen automatisch berücksichtigt. Die Grundlagen des Rechenprogramms und dessen Handhabung sind in [89] beschrieben.

Die Hochspannungshalle ist auf allen Seiten einschließlich der Decke und dem Boden mit durchgehenden Metallschirmen umgeben. Die Metallschirme an der Decke und an den Seitenwänden wurden durch idealleitende Platten nachgebildet, die in dreieckförmige Flächenelemente unterteilt sind. Der Boden wurde ebenfalls durch eine idealleitende Ebene nachgebildet, die in CONCEPT II über das Spiegelungs-Prinzip berücksichtigt wird. Bild 6.7 zeigt das Simulationsmodell, wobei aus Gründen der Sichtbarkeit nur eine Schirmwand dargestellt ist.

Die kupfernen Leitungen wurden durch runde Drahtsegmente mit einem Durchmesser von 8 mm (Querschnitt: 50 mm²) und einer Leitfähigkeit von $5,8 \cdot 10^7$ S/m [6] nachgebildet. Die Kapazität des Stoßstrom-Generators wurde mit 30 µF angenommen. Die Segmentierung der Flächen und Drähte in einzelne Elemente richtet sich nach der höchsten Frequenz, die bei den Berechnungen zu 30 MHz gewählt wurde, was einer Wellenlänge von $\lambda = 10$ m entspricht. Die maximale Länge der dreieckförmigen Flächenelemente betrug 1,2 m, was $\lambda/8$ entspricht, und die der Drahtsegmente betrug 1 m, was $\lambda/10$ entspricht. Die Segmentierung umfasste hierbei 1780 Draht- bzw. Flächenelemente.

Die Berechnungen wurden im Frequenzbereich von 1,5 kHz bis 30 MHz durchgeführt. Um die Anzahl der Frequenzen zu begrenzen, wurde der Frequenzbereich in 3 Intervalle unterteilt. Im untersten Intervall von 1,5 kHz bis 148,5 kHz betrugen die Frequenzschritte $\Delta f = 3$ kHz, im darüber liegenden Frequenzbereich bis 3 MHz betrugen sie 6 kHz und im darüber liegenden höchsten Frequenzbereich betrugen sie 30 kHz. Die Simulations-Rechnungen ergaben, dass die am Eingang des Langzeitstrom-Generators anliegende Spannung im ungünstigsten Fall um 40 % gegenüber der Ladespannung des Stoßstrom-Generators erhöht ist. Daher sind bei einer maximalen Ladespannung von 100 kV die Eingangselemente des Langzeitstrom-Generators für Spannungen von 140 kV auszulegen. Auch aus diesem Grund ist die Vorschaltung einer für eine solche Spannung ausgelegten Entkopplungsinduktivität $L_{\text{Entkopplung}}$ unerlässlich.

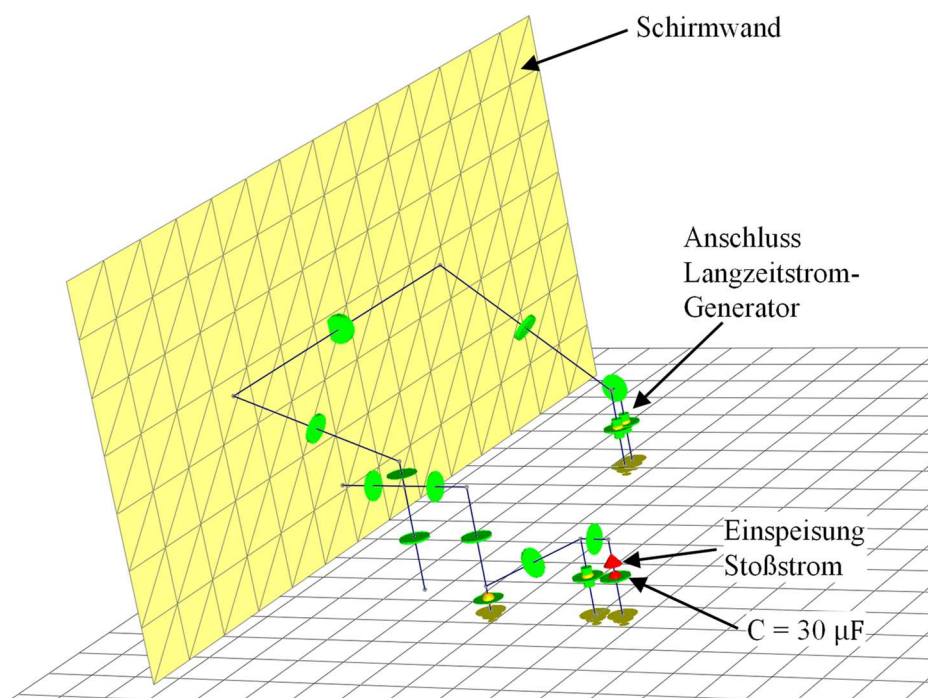


Bild 6.7 Vereinfachtes Simulationsmodell für das Programm CONCEPT II

7. Aufbau des Langzeitstrom-Generators

In den Kapiteln 4, 5 und 6 wurde das grundlegende Konzept des Langzeitstrom-Generators vorgestellt. Im Kapitel 7 und den folgenden Kapiteln wird nun die Umsetzung des Konzeptes in einen praktischen Aufbau behandelt. Dies betrifft sowohl den eigentlichen Langzeitstrom-Generator als auch die peripheren Einrichtungen, die zum Betrieb des Generators unerlässlich sind.

Bild 7.1 zeigt eine schematische Darstellung des Aufbaus des Langzeitstrom-Generators in der Hochspannungshalle der Universität der Bundeswehr München. Um die Personensicherheit zu gewährleisten, ist die Hochspannungshalle in zwei Bereiche unterteilt, die Hochspannungs-Seite und die Niederspannungs-Seite. Der Langzeitstrom-Generator befindet sich auf der Hochspannungs-Seite, die von der Niederspannungs-Seite durch einen metallenen Trennzaun abgegrenzt ist.

Auf der Hochspannungs-Seite befindet sich auch das Prüffeld ebenso wie der Stoßstrom-Generator, der optional genutzt werden kann. Das Prüffeld verfügt über eine integrierte Strom-Messeinrichtung, die allerdings nur zur Messung des Stoßstroms dient. Der Langzeitstrom wird separat gemessen. Hierzu dient eine zweite Strom-Messeinrichtung, die in den Langzeitstrom-Generator integriert ist. Wesentliche Komponenten des Langzeitstrom-Generators sind daneben die Einheit für die Stromerzeugung, die Einheit für die Stromformung und die Einheit zur Triggerung (Auslösung) des Generators.

Hinsichtlich der Personensicherheit muss gewährleistet sein, dass die Hochspannung von der Niederspannungs-Seite sicher abgeblockt wird. Hierzu dient der metallene Trennzaun, der auf Erdpotential liegt und Überschläge von der Hochspannungs-Seite zur Niederspannungs-Seite verhindert. Weiterhin verfügt die Hochspannungshalle über einen Sicherheitskreis, der bei Unterbrechung die Hochspannung automatisch abschaltet. Wird beispielsweise die Hochspannungs-Seite durch eine Tür im Trennzaun betreten, melden Sensoren das Öffnen der Tür, was zu einer Unterbrechung des Sicherheitskreises führt. Infolge dessen werden sämtliche spannungsführenden Bauteile auf der Hochspannungs-Seite kurzgeschlossen und geerdet. Hierzu zählen auch die Stromversorgung und die Stromerzeugungs-Einheit, die ebenfalls kurzgeschlossen und geerdet werden [92].

Nach Betreten der Hochspannungs-Seite ist es wichtig, dass der sichere Zustand der Anlage für das Personal augenscheinlich ist. Hierzu dient eine Erdungsstange, die sichtbar mit den zu erdenden Anlagenteilen verbunden wird. Daneben wird der Spannungszustand der Kondensatoren von mehreren Voltmetern angezeigt, so dass durch optische Überprüfung unmittelbar die Spannungsfreiheit festgestellt werden kann.

Die Steuerung des Sicherheitskreises sowie der Generatoren erfolgt von der Niederspannungsseite aus, ebenso wie die Messwert-Aufnahme, die Datenverarbeitung und Datenspeicherung. Dazu sind die Geräte und Einheiten auf der Hochspannungs-Seite mit der Niederspannungs-Seite über geschirmte Mess- und Steuerleitungen sowie optoelektronische Übertragungsstrecken verbunden (siehe Bild 7.1)

Die vorliegende Arbeit ist im weiteren Verlauf wie folgt gegliedert: Der Aufbau des Langstrom-Generators einschließlich seiner peripheren Einrichtungen wird in den Kapiteln 7 bis 10 beschrieben. Das vorliegende Kapitel 7 widmet sich im Weiteren dem Kernstück des Langzeitstrom-Generators, nämlich der Stromerzeugungs-Einheit und der Stromformungs-Einheit. Die Triggerung des Generators, die sowohl über mechanische Schalter als auch über Funkenstrecken-Schalter erfolgen kann, ist Gegenstand von Kapitel 8. Die peripheren Einrichtungen wie die Steuerung des Generators, der Sicherheitskreis sowie die Messwert-Aufnahme und Datenverarbeitung werden in Kapitel 9 vorgestellt. In Kapitel 10 wird abschließend die Kopplung des Stoßstrom-Generators an den Langzeitstrom-Generator behandelt.

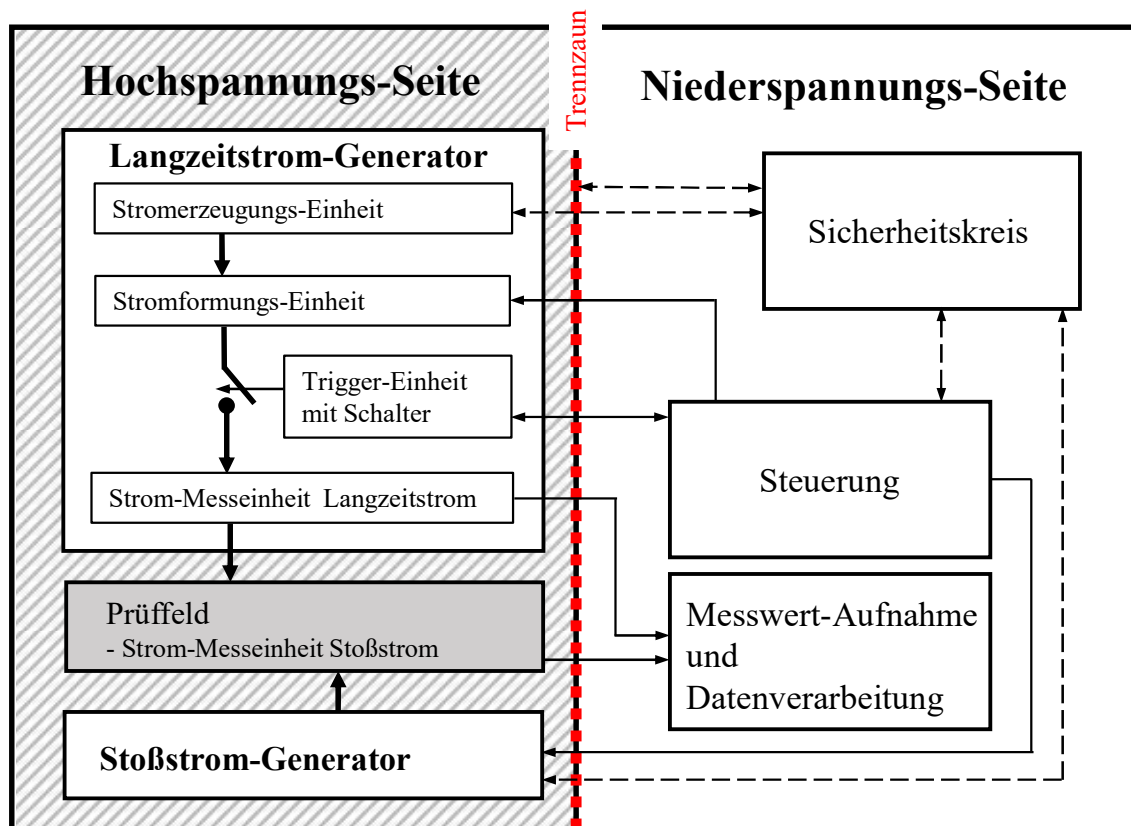


Bild 7.1 Schematische Darstellung des Aufbaus des Langzeitstrom-Generators in der Hochspannungshalle der Universität der Bundeswehr München

7.1 Stromerzeugungs-Einheit

Die Stromerzeugungs-Einheit besteht im Wesentlichen aus einem Hochspannungs-Ladegerät und einer Kondensatorbank mit insgesamt 50 Kondensatoren mit je einer Kapazität von 4,4 mF, wie bereits in Kapitel 4 erwähnt. Um die Kapazität der Kondensatorbank möglichst variabel gestalten zu können, wurden die Kondensatoren in Kondensatoren-Stränge zu je 4 parallel geschalteten Kondensatoren angeordnet. Die Kapazität jedes Kondensatorstrangs beträgt somit 17,6 mF ($4 \times 4,4 \text{ mF}$).

Die so entstandenen 12 Kondensatoren-Stränge (mit insgesamt 48 Kondensatoren) wurden in vier Module mit je drei Kondensatoren-Strängen aufgeteilt. Jedes Modul verfügt folglich über eine Kapazität von 52,8 mF ($12 \times 4,4 \text{ mF}$). Von den 50 Kondensatoren verblieben zwei, die nicht in diesen Modulen untergebracht sind. Sie wurden in einem kleineren Sondermodul eingebaut und dienen der verfeinerten Einstellung der Gesamtkapazität.

Die variable Anzahl der verwendeten Kondensatoren bringt es mit sich, dass die elektrischen Verbindungen ebenfalls variabel gestaltet sind. Dies stellte eine besondere Herausforderung an die Sicherheitssysteme dar. Bei Abschaltung des Langzeitstrom-Generators ist nämlich zu beachten, dass bei allen möglichen Schaltzuständen die Kondensatoren stets entladen sind und somit ein sicherer Betrieb ohne Personengefährdung gewährleistet ist.

7.1.1 Kondensator-Module

7.1.1.1 Mechanischer Aufbau der Kondensator-Module

Jedes Kondensator-Modul besteht aus einem Grundgestell (Kondensator-Modul-Gestell), den darin platzierten Kondensatoren und den elektrischen Anschlüssen. Beim mechanischen Aufbau war zu beachten, dass das maximal zulässige Gewicht nicht überschritten wird. Um es transportieren und stapeln zu können, wird das maximal zulässige Gewicht vom vorhandenen (elektrischen) Hubwagen bestimmt, der eine maximal zulässige Hublast von 1,2 t aufweist.

Aufgrund dieser Begrenzung wurde entschieden, dass ein einzelnes Modul für 12 Kondensatoren ausgelegt wird. Da ein einzelner Kondensator ein Gewicht von etwa 70 kg aufweist, beträgt das Gesamtgewicht der Kondensatoren $12 \times 70 \text{ kg} = 840 \text{ kg}$. Hinzu kommt das Gewicht des Gestells, welches einschließlich der Auf- und Anbauten etwa 250 kg beträgt, wodurch sich das Gesamtgewicht jedes Moduls zu etwa 1,1 t ergibt.

Bild 7.2 zeigt eine schematische Darstellung des Gestells eines Kondensator-Moduls. Das Kondensator-Modul-Gestell mit einer Höhe von 1,5 m und einer Grundfläche von 1,4 m x 1,4 m bietet Platz für drei Kondensator-Stränge zu je 4 Kondensatoren. Der Rahmen besteht aus verschweißtem Stahl-Vierkant-Rohr mit den Abmessungen 50 mm x 50 mm. An den oberen Ecken des Gestells sind Montage-Ösen angebracht, um das Modul hochheben zu können. Die Montage-Ösen dienen zudem als seitliche Halterungen für die Füße eines darüber gestapelten Moduls. Der Boden des Gestells besteht aus einer Multiplexplatte (Holzplatte) mit einer rutschfesten Gummimatte als Auflage, um eventuellen Vibrationen entgegenzuwirken. Den oberen Abschluss bilden Halterungen aus Stahl-Vierkant-Rohren (Abmessung: 30 mm x 30 mm), die der Befestigung der Kondensatoren dienen.

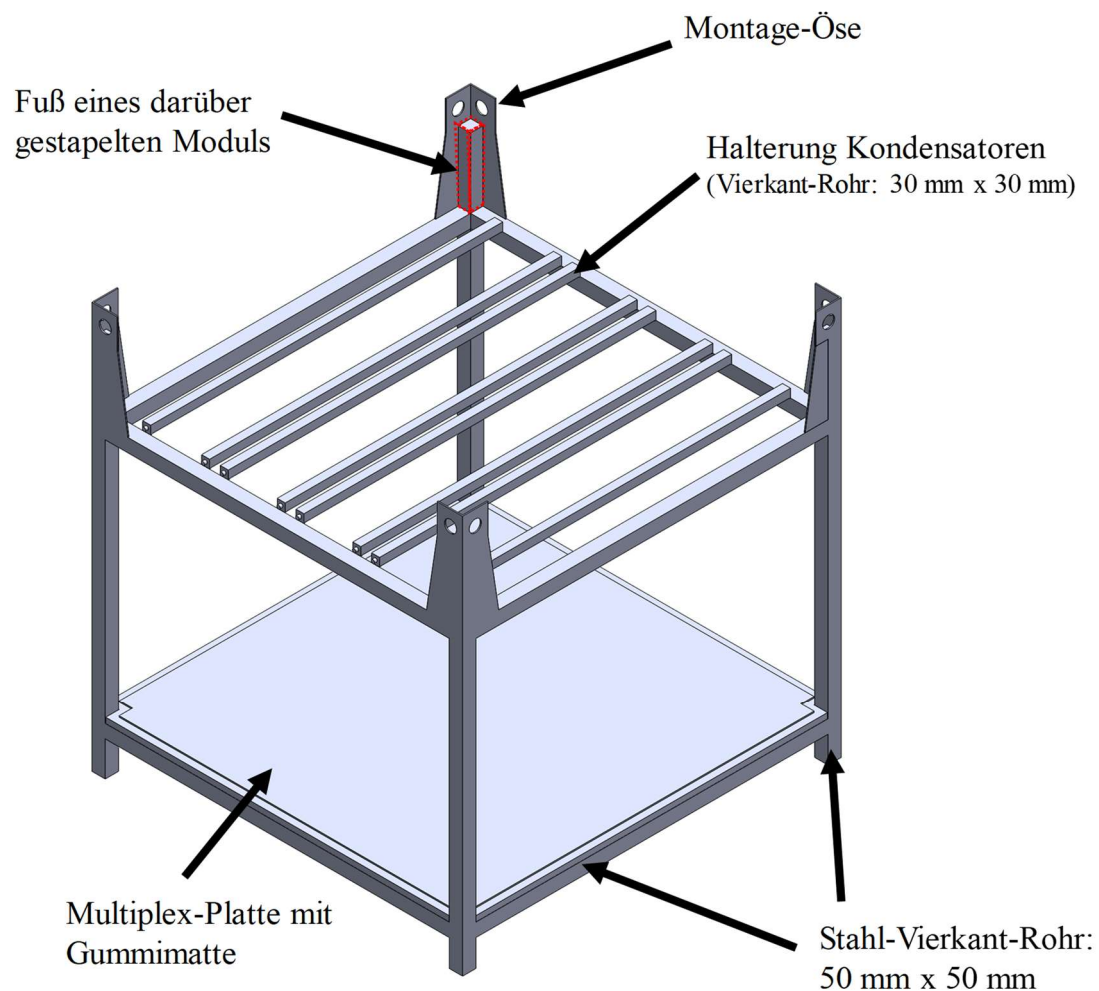


Bild 7.2 Schematischer Aufbau eines Kondensator-Modul-Gestells

Bild 7.3 zeigt beispielhaft den Aufbau von Kondensator-Modul 1, das drei Kondensator-Stränge (mit je vier Kondensatoren) aufweist. Die Kondensatoren jedes Strangs sind über Kondensator-Strang-Verbindungen miteinander verbunden. Jede Kondensator-Strang-Verbindung besteht aus drei elektrisch leitenden Schienen, nämlich der Erdungsschiene, der Ladeschiene und der Entladeschiene. Durch Auftrennen der Kondensator-Strang-Verbindungen können einzelne Kondensator-Stränge herausgeschaltet werden. Das Herausschalten von einzelnen Kondensator-Strängen ist allerdings nur bei Modul 1 vorgesehen, da es bei den anderen Modulen nicht erforderlich ist, um die Kapazität der Kondensatorbank einzujustieren (näheres hierzu siehe Kapitel 7.1.1.2).

Bild 7.3 zeigt auch das kleinere Sondermodul, das über 2 Kondensatoren verfügt, die individuell durch Auftrennen der Kondensator-Strang-Verbindungen herausgeschaltet werden können. Auf diese Weise kann die Gesamtkapazität des Langzeitstrom-Generators individuell angepasst werden.

Um Platz zu sparen, wurde Modul 2 auf Modul 1 und Modul 3 auf Modul 4 gestapelt. Bild 7.4 zeigt den schematischen Aufbau der gestapelten Kondensator-Module mit den zugehörigen Verbindungen zwischen den Modulen. Durch Auftrennen dieser Verbindungen können die einzelnen Module und somit die in ihnen installierten Kondensatoren herausgeschaltet werden.

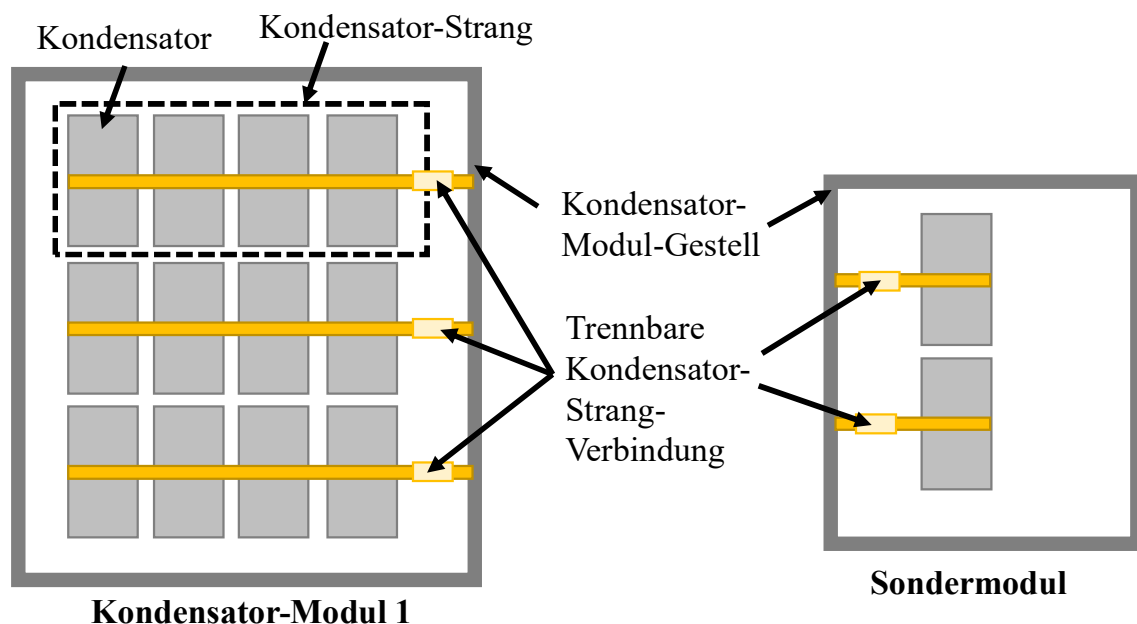


Bild 7.3 Skizze der Draufsicht auf das Kondensator-Modul 1 und das Sondermodul mit trennbaren Kondensator-Strang-Verbindungen

Um ungehinderten Zugang zu den Kondensator-Modulen zu ermöglichen, wurden die beiden Stapel der Kondensator-Module in einem Abstand von 1,2 m zueinander platziert. Außerdem wurden die Verbindungen zwischen den Stapeln (Verbindung zwischen Kondensator-Modulen 2 und 3) in einer Höhe von etwa 2,5 m realisiert, damit die unteren Kondensator-Module 1 und 4 von allen Seiten frei zugänglich sind.

Soll die Gesamtkapazität modulweise erhöht werden, wird zunächst Kondensator-Modul 1 mit Kondensator-Modul 2 verbunden. Dann werden nacheinander die Verbindungen zu Kondensator-Modul 3 und Kondensator-Modul 4 geschaffen. Wie bereits erwähnt, erfolgt die weitere Anpassung der Gesamtkapazität durch das Heraus- bzw. Hinzuschalten von einzelnen Kondensator-Strängen und Kapazitäten. Das zur feineren Justierung dienende Sondermodul ist aus praktischen Gründen unmittelbar mit dem Kondensator-Modul 1 verbunden.

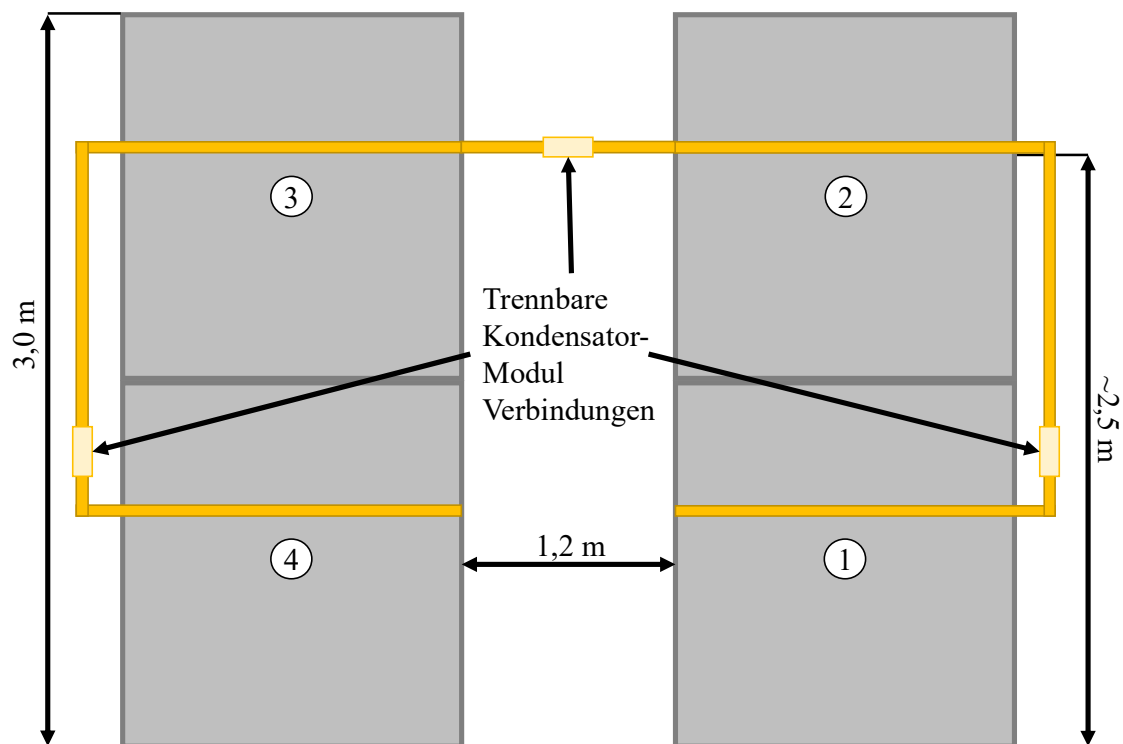


Bild 7.4 Skizze der Vorderansicht der gestapelten Kondensator-Module 1 bis 4 mit Verbindungen zwischen den Modulen

7.1.1.2 Elektrische Verschaltung der Kondensator-Module

Bild 7.5 zeigt den schematischen Aufbau eines Kondensator-Moduls. Die Aufladung der Kondensatoren erfolgt über eine Ladeschiene, die den Hochspannungsanschluss (Pluspol) der Kondensatoren mit dem Hochspannungsanschluss des Hochspannungs-Ladegeräts verbindet. Der andere Anschluss (Minuspole) ist geerdet und über die Erdungsschiene mit der Erde des Hochspannungs-Ladegeräts verbunden.

Um die Lebensdauer der Kondensatoren zu erhöhen, wird die Stromentnahme durch Verwendung eines Vorwiderstands begrenzt. Die Stromentnahme erfolgt daher nicht direkt am Hochspannungsanschluss der Kondensatoren, sondern über eine separate Entladeschiene mit dazwischen geschalteten Vorwiderständen.

Die Vorwiderstände sind auch notwendig, um gegebenenfalls die gesamte Kondensatorenergie aufnehmen zu können. Im ‚worst case‘ wird jeder Vorwiderstand bei einer maximalen Ladespannung von 2,5 kV mit einer (maximalen) Energie von etwa 14 kJ belastet. Da diese Belastung bei mehreren Beanspruchungen nacheinander auftreten kann, ist der Vorwiderstand hinsichtlich einer deutlich höheren Energieaufnahme dimensioniert: Es wurden für die Vorwiderstände jeweils zwei scheibenförmige Keramikwiderstände verwendet, wobei jeder Widerstand für eine Energieaufnahme bis zu 120 kJ spezifiziert ist. Die scheibenförmigen Einzelwiderstände (Firma: HVP, Typ: AB410) haben die Form eines quadratischen Toroids mit einem Innendurchmesser von 3,3 cm, einem Außendurchmesser von 15 cm und einer Dicke von 2,54 cm.

Alle Vorwiderstände wurden zu $4\ \Omega$ gewählt, ausgenommen hiervon ist ein Kondensatorstrang von Modul 1, bei dem die Vorwiderstände auf $2\ \Omega$ reduziert sind. Diese Reduzierung war notwendig, um die (Strom-) Komponente B nach EUROCAE ED-84 [33] realisieren zu können.

Die Entladeschiene, die Erdungsschiene und die sonstigen Verbindungen wurden aus massivem Kupfer mit einem Mindestquerschnitt von $150\ \text{mm}^2$ ausgeführt. Vernachlässigt man den sehr geringen Widerstand dieser Verbindungen, ist der Innenwiderstand der Stromerzeugungs-Einheit nur von den Vorwiderständen bestimmt. Unter dieser Voraussetzung hat ein Kondensator-Strang (4 Kondensatoren) einen Innenwiderstand von $1\ \Omega$. Hiervon ausgenommen ist der Kondensator-Strang mit den $2\ \Omega$ -Vorwiderständen in Modul 1, bei dem der Innenwiderstand (des Kondensator-Strangs) $0,5\ \Omega$ beträgt.

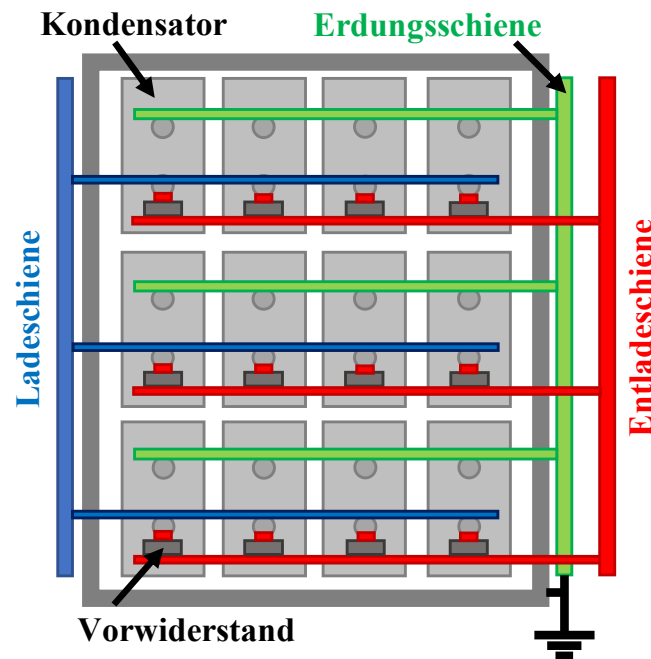


Bild 7.5 Skizze der Verschaltung eines Kondensator-Moduls mit Entlade- (rot), Lade- (blau) und Erdungsschiene (grün)

Folglich beträgt der Innenwiderstand der Module 2, 3 und 4 je $0,333 \, \Omega$ (3 Kondensator-Stränge zu je $1 \, \Omega$), während er bei Modul 1 auf $0,25 \, \Omega$ reduziert ist (2 Kondensator-Stränge zu je $1 \, \Omega$, 1 Kondensator-Strang zu $0,5 \, \Omega$). Beim Sondermodul (2 Kondensatoren) beträgt der Innenwiderstand $2 \, \Omega$, so dass sich folgender Innenwiderstand (R_{L-i}) des Langstrom-Generators bei Verwendung aller Module ergibt:

$$R_{L-i} = \frac{1}{\frac{1}{0,333 \, \Omega} + \frac{1}{0,333 \, \Omega} + \frac{1}{0,333 \, \Omega} + \frac{1}{0,25 \, \Omega} + \frac{1}{2 \, \Omega}} = 74,1 \, m\Omega \quad (7.1)$$

Um die Personensicherheit zu gewährleisten, wurde jedes Modul mit einem eigenen Erdungssystem ausgestattet. Bild 7.6 zeigt das Ersatzschaltbild des Erdungssystems bei geöffneten Erdungsschaltern ($S_{L-Erdung}$). Der Erdungsschalter verbindet die Entladeschiene und die Erdungsschiene über einen Erdungswiderstand ($R_{L-Erdung}$) und entlädt so die Kondensatoren automatisch bei Abschalten des Langzeitstrom-Generators. Der Erdungsschalter ist normalerweise ein geschlossener Schalter, der ein ungewolltes Aufladen der Kondensatoren verhindert und erst bei Anschalten des Langzeitstrom-Generators geöffnet wird. Der Erdungsschalter wird vom Sicherheitskreis angesteuert. Wird der Sicherheitskreis geöffnet, wird das Signal zum Erdungsschalter unterbrochen und dieser schließt automatisch.

Die Kondensatoren werden dann über den Innenwiderstand der Module (R_{L-M}) und den Erdungswiderstand ($R_{L-Erdung}$) der Module entladen und kurzgeschlossen. Da jedes Kondensator-Modul mit einem Erdungswiderstand von $4\ \Omega$ ausgestattet ist, wird von einer Ladungsfreiheit der Kondensatoren nach etwa 1,1 s ausgegangen. Hierbei wird angenommen, dass die Kondensatoren spätestens nach 5 Zeitkonstanten (5τ) entladen sind ($\tau = R_{L-Erdung} \cdot C_{L-M} = 4\ \Omega \cdot 0,0528\ \text{F} = 0,21\ \text{s}$).

Wird der Erdungsschalter ausgelöst, wird die in den Kondensatoren gespeicherte Energie im Wesentlichen in den Erdungswiderständen ($R_{L-Erdung}$) umgesetzt. Die wesentlich kleineren Innenwiderstände der Module tragen hierbei nur unwesentlich bei. Geht man von einer maximalen Ladespannung von 2,5 kV aus, werden die einzelnen Erdungswiderstände ($R_{L-Erdung}$) der Module mit einer Energie von bis zu 165 kJ belastet. Da jeder Erdungswiderstand so ausgelegt ist, dass er eine wesentlich höhere Energie von mindestens 520 kJ aufnehmen kann, können sie mit mindestens 4 unmittelbar aufeinander folgenden Maximal-Beanspruchungen ($4 \times 165 = 660\ \text{kJ}$) beaufschlagt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ein nennenswerter Teil der Energie durch Kühlung bereits während des Versuchs-Zyklus abgeführt wird.

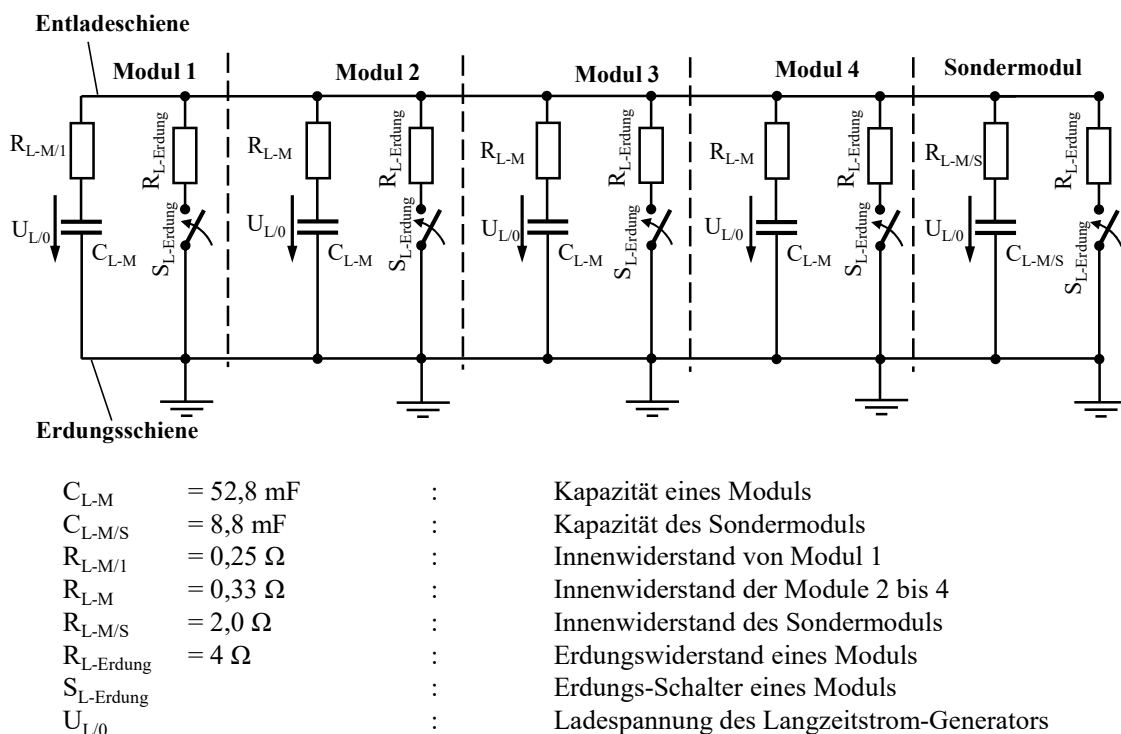


Bild 7.6 Ersatzschaltbild des Erdungssystems der Module während der Versuche bei geöffneten Erdungsschaltern

Bild 7.7 zeigt das Ersatzschaltbild von Kondensator-Modul 1. Wie bereits erwähnt, hat dieses Modul die Besonderheit, dass alle drei Kondensator-Stränge abtrennbar sind. Dazu werden die rot gekennzeichneten Verbindungen entfernt. Nach Abtrennung der Kondensator-Stränge, verfügen die Kondensatoren über keine Verbindungen weder zur Ladeschiene noch zur Entladeschiene. Dadurch werden die abgetrennten Kondensatoren nicht mehr aufgeladen.

Andererseits werden die abgetrennten Kondensatoren in diesem Fall auch nicht entladen, was hinsichtlich des Personenschutzes nicht zulässig ist. Um die Kondensatoren bei Öffnung des Sicherheitskreises zuzuschalten, wurden in jedem Kondensator-Strang Zu-Schalter S_{L-Zu} eingefügt. Die Zu-Schalter verbinden die Kondensator-Stränge mit der Entladeschiene und sorgen so für die Entladung der Kondensatoren. Die Zu-Schalter sind normalerweise geschlossene Schalter, die erst bei Anschalten des Langzeitstrom-Generators geöffnet werden. Sie werden vom Sicherheitskreis angesteuert. Wird der Sicherheitskreis geöffnet, wird das Signal zum Zu-Schalter unterbrochen und dieser schließt automatisch.

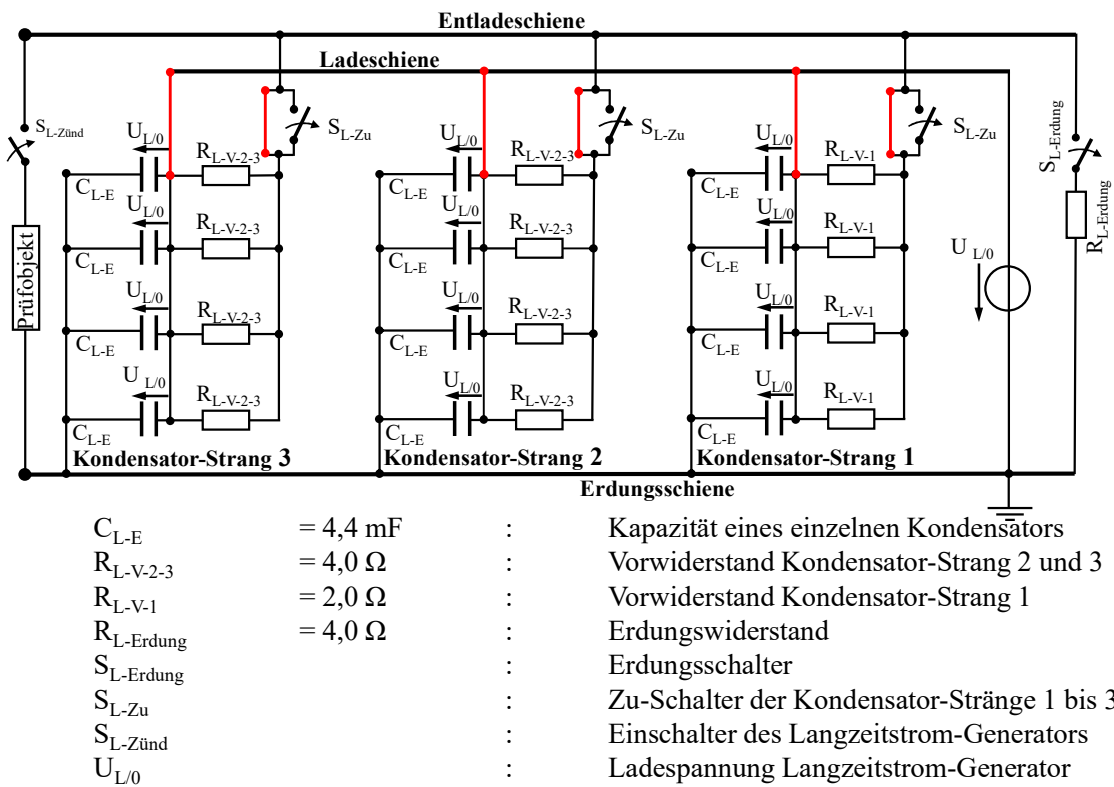


Bild 7.7 Ersatzschaltbild des Kondensator-Moduls 1 mit den rot markierten Trennstellen für die drei Kondensator-Stränge während der Versuche mit geöffneten Erdungs- und Zu-Schaltern

Bild 7.8 zeigt je eine fotografische Aufnahme des Zu-Schalters S_{L-Zu} für die Kondensator-Stränge von Modul 1 (Bild 7.8a) und des Erdungsschalters $S_{L-Erdung}$ für die Erdung der einzelnen Module (Bild 7.8b). Beiden Schaltern ist gemeinsam, dass sie normalerweise geschlossen sind.

An den Zu-Schalter (S_{L-Zu}) werden wesentlich geringere Anforderungen gestellt, da der Verschleiß der Kontakte durch die Strom-Belastung wesentlich geringer ist. Daher wurde ein Hochspannungsrelais mit Kontakten aus Silberlegierung anstelle der Wolfram-Legierung ausgewählt. Bild 7.8a zeigt das Hochspannungsrelais, das bis Spannungen von 15 kV isolieren kann (Firma: Ross Engineering, Typ: E15-NC-15-0-31).

Mit dem Erdungswiderstand eines Moduls ($R_{L-Erdung}$) von $4\ \Omega$ ist der maximale Strom über den Erdungsschalter auf etwa 600 A begrenzt. Unter Berücksichtigung einer gewissen Sicherheitsmarge wurde entschieden, den Erdungsschalter hinsichtlich seiner Stromtragfähigkeit und seiner Isolierspannung höher zu dimensionieren. Als Erdungsschalter wurde daher ein Hochspannungsrelais (Firma: Ross Engineering, Typ: E25-NC) ausgewählt, das wesentlich höhere Ströme bis 2500 A schalten kann (siehe Bild 7.8b). Im offenen Zustand ist der Schalter gegenüber Spannungen von 25 kV isoliert, wesentlich höheren Spannungen als die maximale Ladespannung von 2,5 kV. Um den Abbrand an den Elektroden zu minimieren, wurde eine Wolfram-Legierung als Kontaktmaterial verwendet.

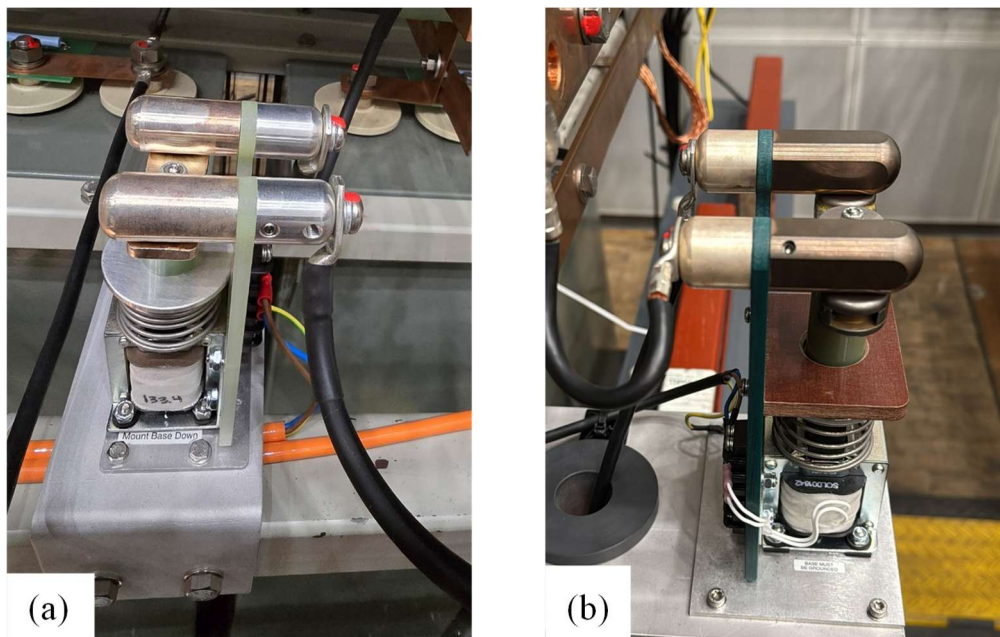


Bild 7.8 Fotografische Aufnahmen (a) des Zu-Schalters S_{L-Zu} und (b) des Erdungsschalters $S_{L-Erdung}$

7.1.1.3 Zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen für den Langzeitstrom-Generator

Wie Bild 7.6 entnommen werden kann, sind die einzelnen Erdungsschalter ($S_{L-Erdung}$) parallelgeschaltet – außerdem werden sie synchron betätigt. Der Ausfall eines Erdungsschalters stellt daher nicht zwangsweise ein Sicherheitsrisiko dar, weil in diesem Fall die Kondensatoren des betroffenen Kondensator-Moduls über die verbleibenden Erdungsschalter entladen werden. Dies gilt allerdings nur, wenn die Module im Verbund betrieben werden.

Wird das vom Ausfall des Erdungsschalters betroffene Modul einzeln betrieben, ist die Erdung der Kondensatoren nicht mehr gegeben und ihr Betriebszustand ist undefiniert. Um diesem Sicherheitsrisiko entgegenzuwirken, wurde jedes Kondensator-Modul mit einer separaten Spannungsanzeige ausgestattet, um unmittelbar die Spannungsfreiheit feststellen zu können. Als zusätzliche Maßnahme wurde beschlossen, dass das Sondermodul dauerhaft mit Modul 1 verbunden ist. Damit wird sichergestellt, dass immer zwei Erdungsschalter im Stromkreis vorhanden sind.

Bild 7.9 zeigt die Spannungsanzeige neben dem Erdungsschalter eines Kondensator-Moduls. Die Spannungsanzeige (1) ist zwischen der Entladeschiene (2) und der Erdungsschiene (3) an das Kondensator-Modul angeschlossen und befindet sich direkt neben dem Erdungsschalter (4). So kann auf einen Blick überprüft werden, ob der Erdungsschalter geschlossen und das Modul entladen ist.

Um die Funktion der Anzeige sicherzustellen, wurden für die Zuleitungen keine „normalen“ Kabel, sondern höherwertige Hochspannungskabel mit einem Leiterquerschnitt von $1,5 \text{ mm}^2$ und einer Spannungsfestigkeit von 5 kV verwendet. Für die Anzeige selbst wurde ein modifiziertes Drehspulinstrument der Firma VOLTcraft (Typ: AM-86X65) eingesetzt. Das passive Drehspulinstrument benötigt keine Stromversorgung, es ist wartungsarm und störunempfindlich.

Für eine dauerhafte Sicherheit werden üblicherweise beide Pole eines Kondensators kurzgeschlossen, was allerdings im vorliegenden Fall nicht möglich ist. Um dennoch einen hinreichenden Schutz über einen Potentialausgleich zu erreichen, wurden die Pole jeden einzelnen Kondensators mit einer hochohmigen Verbindung überbrückt, um ein ungewolltes Aufladen der Kondensatoren bei längeren Standzeiten zu vermeiden. Dazu wurde ein Drahtwiderstand von $25 \text{ M}\Omega$ (Firma: Ohmite, Typ: MOX-3N-132505FE) mit einer Spannungsfestigkeit von 30 kV und einer Dauerleistung von 4 W verwendet. In Bild 7.10 ist der Drahtwiderstand mit der Nummer (1) erkennbar.



Bild 7.9 Spannungsanzeige neben dem Erdungsschalter eines Kondensator-Moduls

Bei den metallenen Verbindungen wurde unterschieden, ob sie betriebsmäßig Strom und Spannung führen oder nicht. Führen sie betriebsmäßig keinen Strom und keine Spannung wie die Gestelle der Module, wurden sie grundsätzlich geerdet. Bei den Verbindungen und Bauteilen wurde weiterhin unterschieden, ob sie Bestandteile des Sicherheitskreises/Erdungssystems sind oder ob sie für den sonstigen Betrieb eingesetzt werden.

Falls diese Komponenten Bestandteile des Sicherheitskreises/Erdungssystems sind, muss bei einem Umbau des Generators gewährleistet sein, dass sie nicht entfernt oder in ihrer Funktionstüchtigkeit eingeschränkt werden. Es ist daher eine optische Erkennung sinnvoll zwischen sicherheitsrelevanten Verbindungen, die nicht gelöst werden dürfen, und unkritischen Verbindungen, die bei einem Umbau entfernt werden können. Um die sicherheitsrelevanten (Schraub-) Verbindungen zu unterscheiden, wurden diese mit einem roten Siegelack markiert.

Bild 7.10 zeigt beispielhaft einen Strang des Kondensator-Moduls. Da die Schraubverbindungen der Anschlüsse sicherheitsrelevant sind, sind sie mit rotem Siegellack markiert (2). Jeder Kondensator (3) verfügt aus Gründen der Redundanz über zwei Anschlüsse für den Pluspol und zwei Anschlüsse für den Minuspol. Die beiden Anschlüsse wurden mit einem Kupferblech überbrückt, wodurch die Strom-Belastung an den einzelnen Anschlüssen verringert wird.

Die Minuspole der Kondensatoren sind mit der Erdungsschiene kontaktiert, wozu ein Kabel (4) mit einem Kupfer-Querschnitt von 16 mm^2 verwendet wird. Die Pluspole der Kondensatoren sind über den Vorwiderstand (5) an die Entladeschiene (6) angeschlossen. Da auf der Entladeschiene höhere Ströme auftreten können, wurde sie als Kupferschiene mit einem Leiterquerschnitt von 300 mm^2 ausgeführt. Über die Ladeschiene (7) fließt hingegen nur ein geringer Ladestrom von maximal 6 A. Die Ladeschiene wurde daher mit einem geringeren (Kupfer-) Querschnitt von 20 mm^2 dimensioniert.

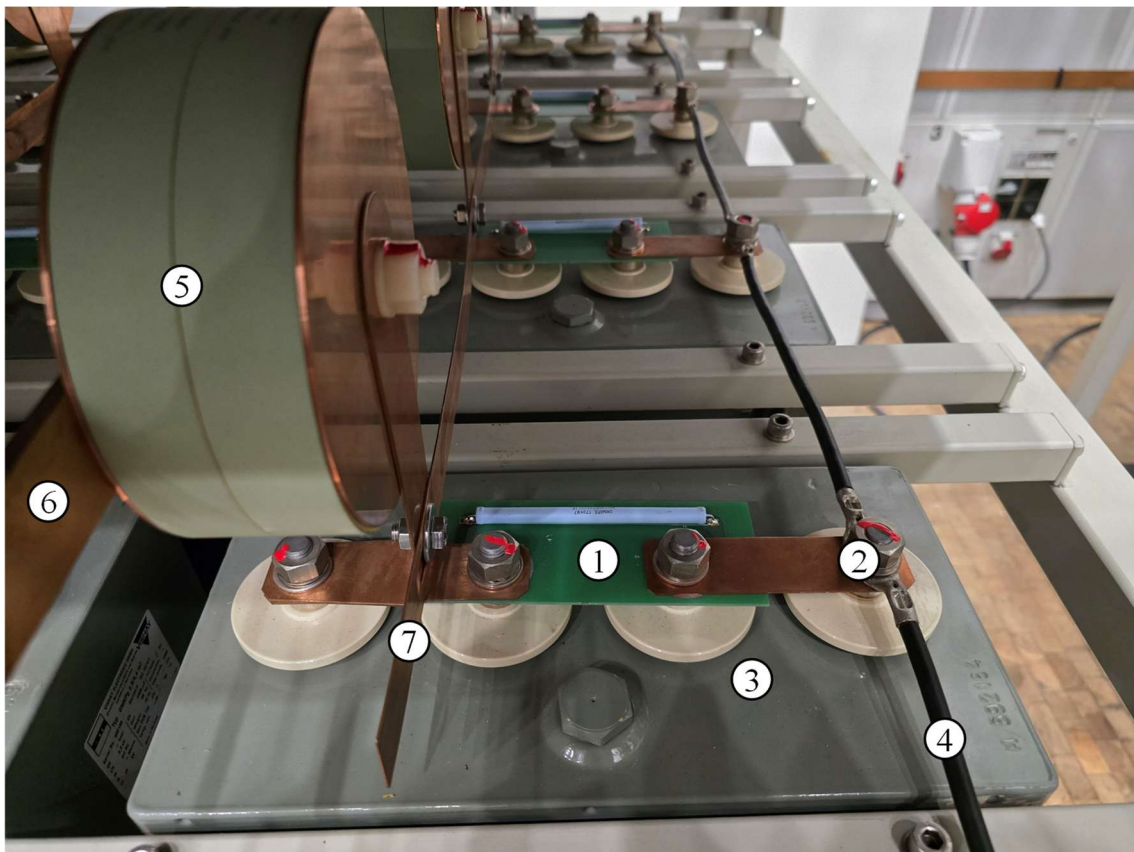


Bild 7.10 Elektrische Anschlüsse der Kondensatoren eines Kondensatoren-Stranges mit Kennzeichnung der sicherheitsrelevanten Verbindungen durch roten Siegellack

7.1.1.4 Überblick über den Aufbau der Kondensator-Module

Bild 7.11 gibt einen Überblick über die Verschaltung der Anschlüsse und Anbauten am Beispiel von Kondensator-Modul 1. Die Kondensatoren (1) stehen zur Stabilisierung innerhalb des Kondensator-Modul-Gestells auf einer Gummimatte. Die Erdung und Stromentnahme erfolgt durch vorgebaute massive Kupferverbindungen der Erdungsschiene (2) und der Entladeschiene (3) mit ihren Verbindungen zum darüber befindlichen Kondensator-Modul 2 (4) und zum vorgelagerten Sondermodul (hier nicht sichtbar, siehe Bild 7.12 (5)). Die Ladeschiene (5) ist hingegen aus Gründen der optimierten Leitungsverlegung zur Rückseite des Kondensator-Moduls geführt. Die Zu-Schalter S_{L-Zu} (6), welche die herausnehmbare Verbindung zwischen der Entladeschiene und den Kondensator-Strängen überbrücken, sind in Bild 7.11 unmittelbar neben den Vorwiderständen (7) zwischen Lade- und Entladeschiene platziert.

Die Entladeschiene ist über den Erdungsschalter (8) und den Erdungswiderstand (9) an die Erdungsschiene angeschlossen. Das Gestell des Kondensator-Moduls (10) ist über ein Kupfergeflecht-Band (11) mit der Erdungsschiene verbunden und auf diese Weise über einen Erdungspunkt im Hallenboden geerdet. Zur Messung der Ladespannung dient ein Spannungsteiler (12), der an die Entladeschiene angeschlossen ist. Um die Ansteuerung des Langzeitstrom-Generators zu vereinfachen, wurden sämtliche Anschlüsse an einem Signal-Verteiler (13) zusammengefasst.

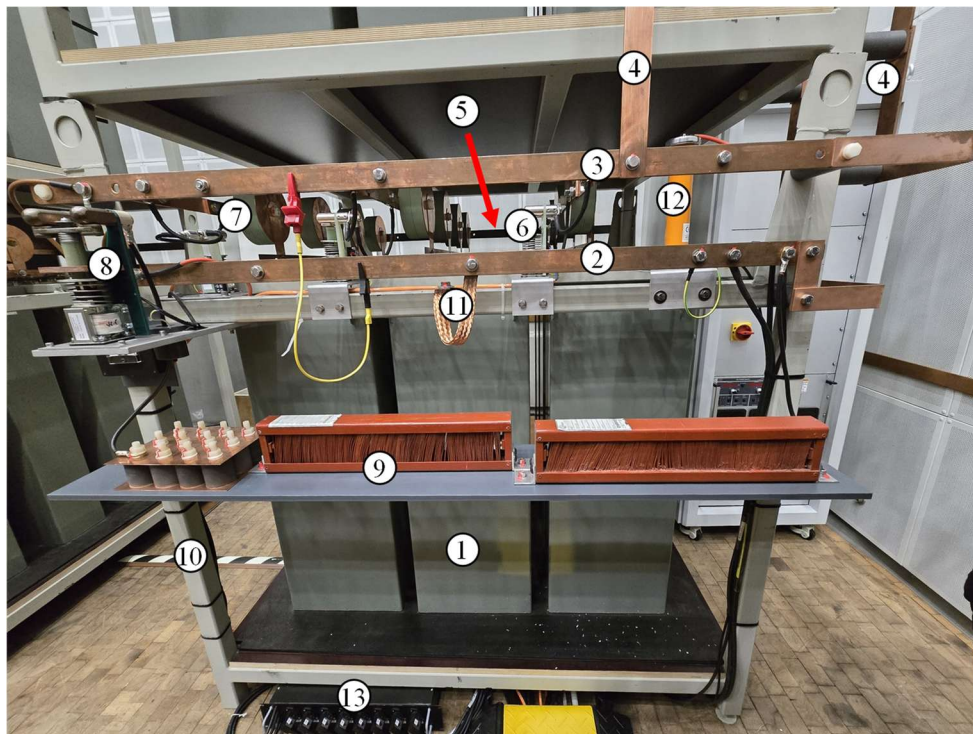
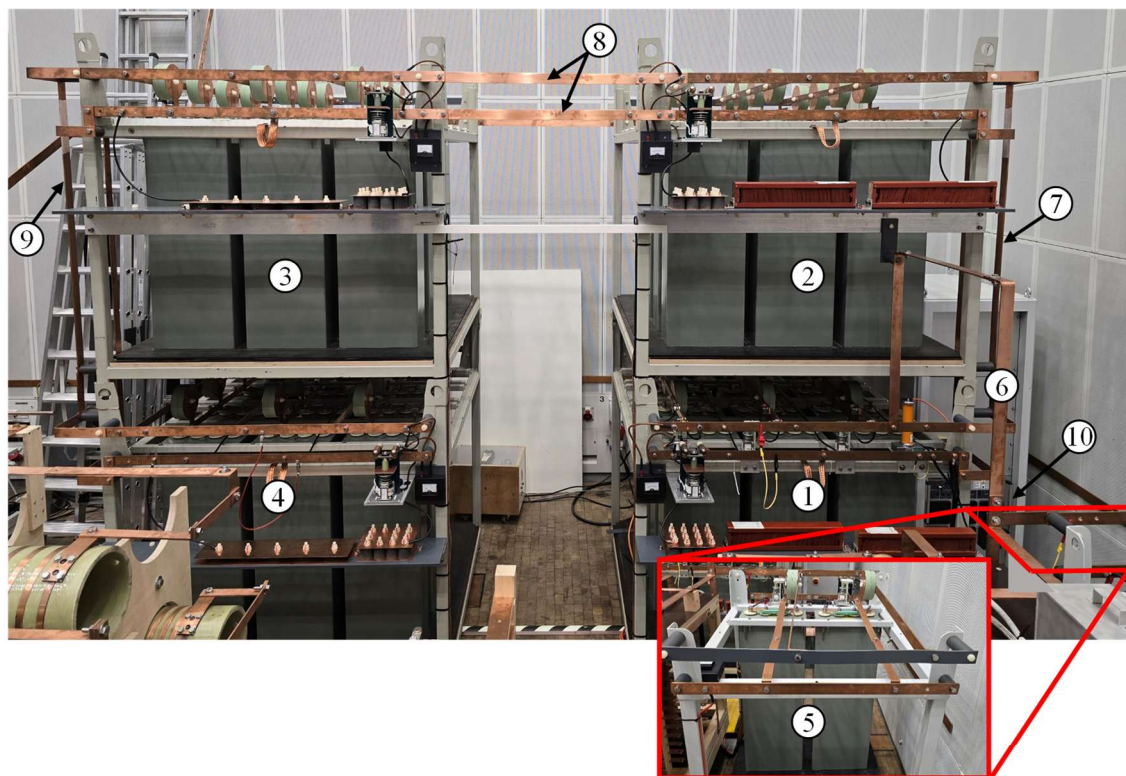


Bild 7.11 Verschaltung der Anschlüsse und Anbauten am Kondensator-Modul 1

Bild 7.12 zeigt die Kondensator-Module und ihre Verschaltung. Modul 2 (2) ist auf Modul 1 (1) gestapelt und Modul 3 (3) ist auf Modul 4 (4) gestapelt. Die Stapel sind in einem Mindestabstand von 1,2 m zueinander sowie von der (geerdeten) Hallenwand aufgestellt, sodass sie von allen Seiten frei zugänglich sind. Die Kondensator-Module sind über Kupferschienen mit der Stromformenden-Einheit (6) und untereinander (7-9) verbunden, wobei das Sondermodul (5), das die Bildeinfügung gesondert darstellt, dauerhaft mit Modul 1 verbunden (10) ist.



- | | |
|------------------------|---|
| 1. Kondensator-Modul 1 | 6. Verbindung Kondensator-Modul 1 mit Stromformungs-Einheit |
| 2. Kondensator-Modul 2 | 7. Verbindung Kondensator-Modul 1 mit 2 |
| 3. Kondensator-Modul 3 | 8. Verbindung Kondensator-Modul 2 mit 3 |
| 4. Kondensator-Modul 4 | 9. Verbindung Kondensator-Modul 3 mit 4 |
| 5. Sondermodul | 10. Verbindung zum Sondermodul |

Bild 7.12 Übersicht über die Kondensator-Module und ihre Verschaltungen

7.1.2 Hochspannungs-Ladegerät

Zur Aufladung der Kondensatoren wird ein Hochspannungs-Ladegerät der Firma FuG vom Typ HCK 7500-2500 MOD eingesetzt. Die Stromversorgung des Ladegeräts erfolgt über einen dreiphasigen 64 A/0,4 kV-Drehstromanschluss. Bei einem maximalen Ladestrom von 6 A und einer maximalen Leistung von 15 kW kann die gesamte Kondensatorbank innerhalb von etwa 1 ½ Minuten, wie bereits in Kapitel 4.3.1 erwähnt, auf 2,5 kV aufgeladen werden.

Das Hochspannungs-Ladegerät befindet sich auf der Hochspannungs-Seite, wird aber von der Niederspannungs-Seite aus über eine potentialtrennende Lichtwellenleiter (LWL) - Verbindung angesteuert. Als besondere Sicherheitsmaßnahme verfügt es über einen sogenannten Interlock-Schalter, der vom Sicherheitskreis der Hochspannungshalle gesteuert wird. Wird der Sicherheitskreis unterbrochen, wird der Interlock-Schalter automatisch geöffnet, mit der Folge, dass der Ladevorgang gestoppt und das Hochspannungs-Ladegerät geerdet wird.

Bild 7.13 zeigt eine fotografische Aufnahme des Hochspannungs-Ladegeräts. Auf der Frontplatte (der Vorderseite) wurde nachträglich ein Hauptschalter eingebaut, über den die Drehstromleitung dreiphasig unterbrochen werden kann (siehe Bild 7.13b). Mit dieser Sicherheitsmaßnahme lässt sich das Hochspannungs-Ladegerät komplett von der Spannungsversorgung trennen, beispielsweise für Wartungsarbeiten. Das Bedienfeld, ebenfalls auf der Vorderseite, dient zur Auswahl der Grundeinstellungen, insbesondere der maximal einstellbaren Ladespannung.

Das Hochspannungs-Ladegerät verfügt über ein internes Erdungssystem, bestehend aus einem Erdungsschalter und einem Erdungswiderstand. Da der Erdungswiderstand für eine Energieaufnahme bis 25 kJ ausgelegt ist, wäre er bei Aufnahme der in den Kondensator-Modulen gespeicherten weitaus höheren Energiemenge überlastet. Um eine solche Überlastung auszuschließen, wird der Strom aus der Kondensator-Bank abgeblockt. Dies geschieht mittels der beiden in Sperrichtung geschalteten Hochspannungs-Dioden der Firma Infineon (Typ: DD261N26K), die auf der Rückseite des Hochspannungs-Ladegeräts installiert sind (siehe Bild 7.13a). Um bei einem Versagen der Dioden den Stromfluss dennoch unterbrechen zu können, wurde als zusätzlicher Schutz eine Hochspannungs-Sicherung der Firma Siba (Typ: 9023520.12,5) eingebaut. Die Sicherung ist eine Hochleistungs-Schmelzsicherung, die den Strom innerhalb einiger Millisekunden unterbricht.

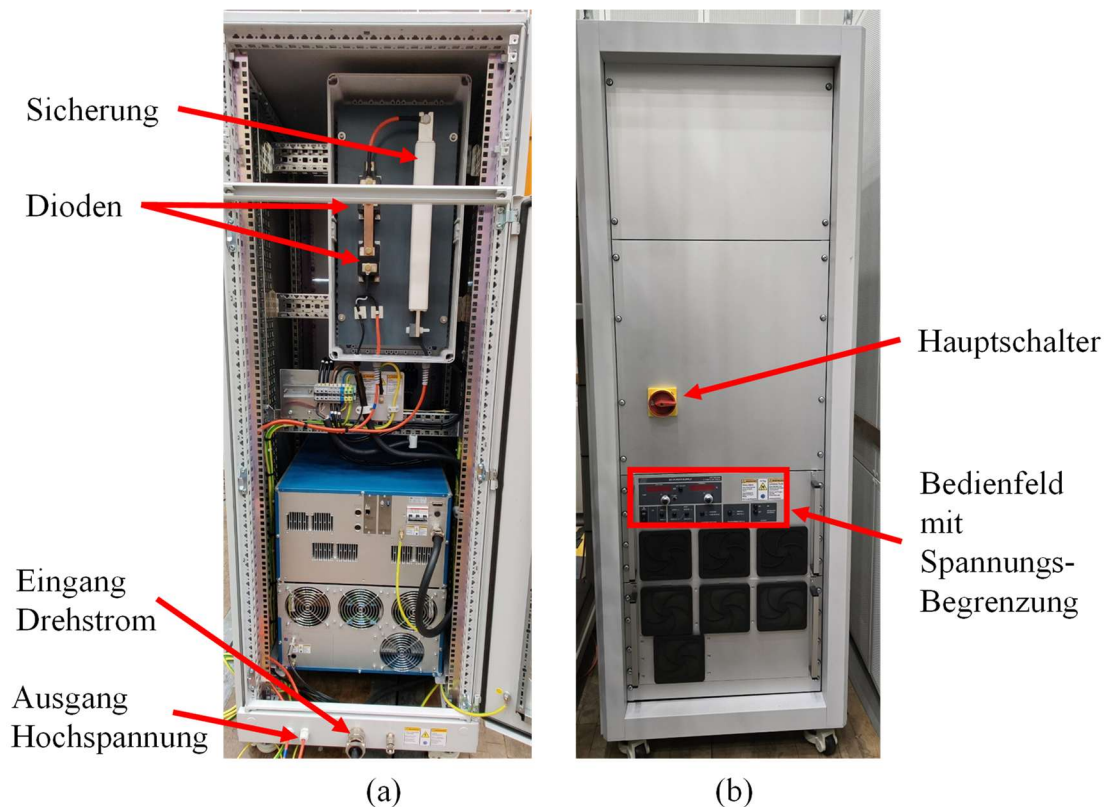


Bild 7.13 Fotografische Aufnahme des Hochspannungs-Ladegeräts:
 (a) Rückseite des Hochspannungs-Ladegeräts
 (b) Vorderseite des Hochspannungs-Ladegeräts

7.2 Stromformungs-Einheit

Die Einheit zur Stromformung besteht im Wesentlichen aus drei Baugruppen. Die erste Baugruppe umfasst eine variable Widerstandskaskade, die zur Einstellung der Höhe des Langzeitstroms dient. Die zweite Baugruppe beinhaltet die Systemschalter. Die Systemschalter dienen zum einen zum Anschalten und Ausschalten des Langzeitstroms. Zum anderen dienen sie dazu, Widerstände durch Überbrückung aus der Widerstandskaskade herauszuschalten, um auf diese Weise den Stromfluss zu vergleichmäßigen (siehe Kapitel 5 und 6). Die dritte Baugruppe umfasst eine variable Induktivität, die in Form einer modular aufgebauten Spulen-Schaltung realisiert ist. Sie dient zur Stabilisierung des Lichtbogens und zur Entkopplung des Langzeitstrom-Generators vom Stoßstrom-Generator (näheres hierzu siehe Kapitel 10).

7.2.1 Widerstandskaskade und Systemschalter

Die Widerstandskaskade wurde zusammen mit den Systemschaltern auf einem fahrbaren Gestell aufgebaut. Das Gestell besteht aus einer hölzernen Rahmenkonstruktion mit einer darauf angebrachten Multiplex-Grundplatte (Holzplatte). Bild 7.14 zeigt eine schematische Darstellung. Die Widerstandskaskade in der rechten Bildhälfte ist in zwei Widerstandstürme unterteilt. In der linken Bildhälfte befinden sich auf der unteren Ebene vier Strom-formende-Schalter, die zum Überbrücken der einzelnen Widerstände der Widerstandskaskade dienen. In der darüber liegenden Ebene sind die Schalter zum Einschalten und Ausschalten des Langzeitstrom-Generators installiert.

Die Widerstandskaskade und die Systemschalter sind ortsfest verbaut. Um die Strom-formenden-Schalter mit den Widerständen kontaktieren zu können, wurden die Anschlüsse der Widerstandskaskade auf eine Verteilerschiene geführt. Aus dem gleichen Grund wurden die Anschlüsse der Strom-formenden-Schalter auf eine Schaltschiene geführt. Die eigentliche Kontaktierung der Schalter mit der Widerstandskaskade erfolgt dann über Leitungen im Verbindungsbereich zwischen beiden Schienen.

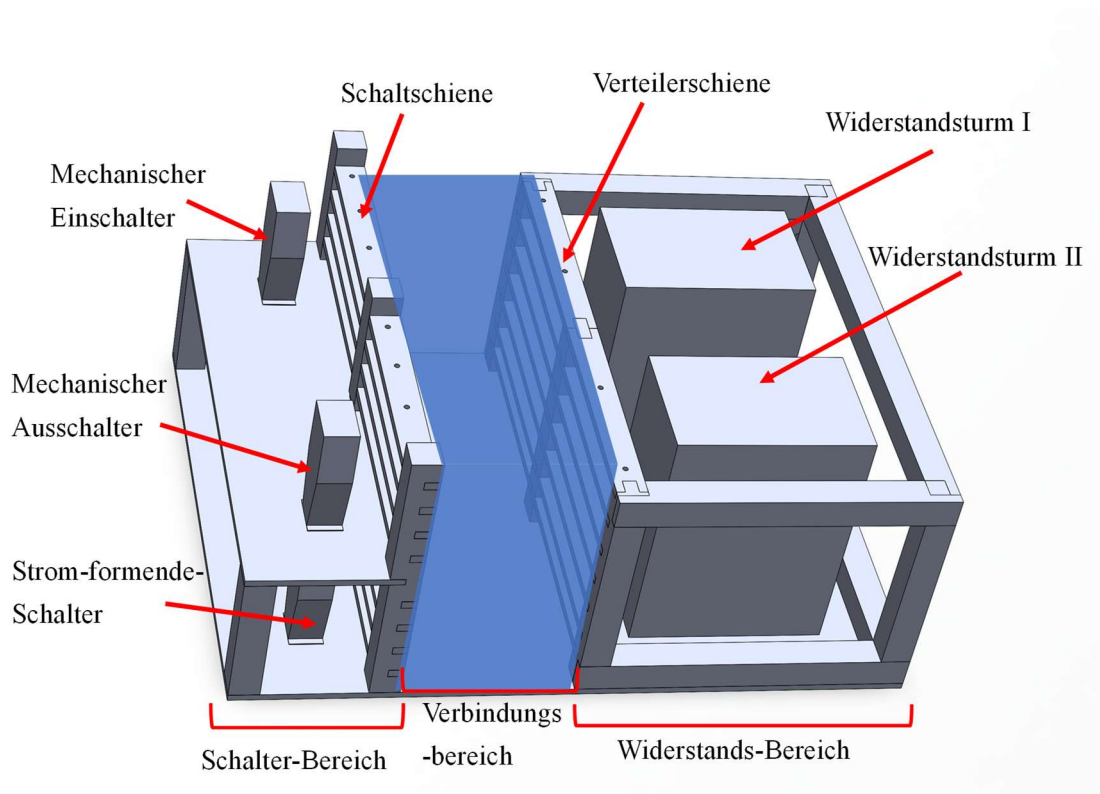


Bild 7.14 Schematische Darstellung der auf einem gemeinsamen Gestell aufgebauten Widerstandskaskade und Systemschalter

7.2.1.1 Aufbau der Widerstandskaskade

Bild 7.15 zeigt einen Ausschnitt aus der Widerstandskaskade: Diese besteht aus einer Abfolge von geschichteten Widerständen mit dazwischen liegenden 2 mm dicken Kontaktierungsplatten aus Kupfer. Jeder Widerstand setzt sich aus sechs Einzelwiderständen zusammen, wovon jeder von ihnen eine Energie von 120 kJ aufnehmen kann. Bei den scheibenförmigen Einzelwiderständen handelt es sich um Keramikwiderstände der Firma HVP (Typ: AB410). Somit kann jeder Widerstand einer Stufe eine Energie von bis 720 kJ ($6 \times 120 \text{ kJ}$) aufnehmen (vgl. Kapitel 5.3).

Da der Energieumsatz bei jeder Beanspruchung wesentlich kleiner ist, ergeben sich keine praktischen Beschränkungen hinsichtlich einer möglichen thermischen Überlastung, auch nicht bei direkt hintereinander folgenden Versuchen. Zudem bewirkt die kühlende Wirkung durch die Kupferplatten eine erhebliche Energieabfuhr.

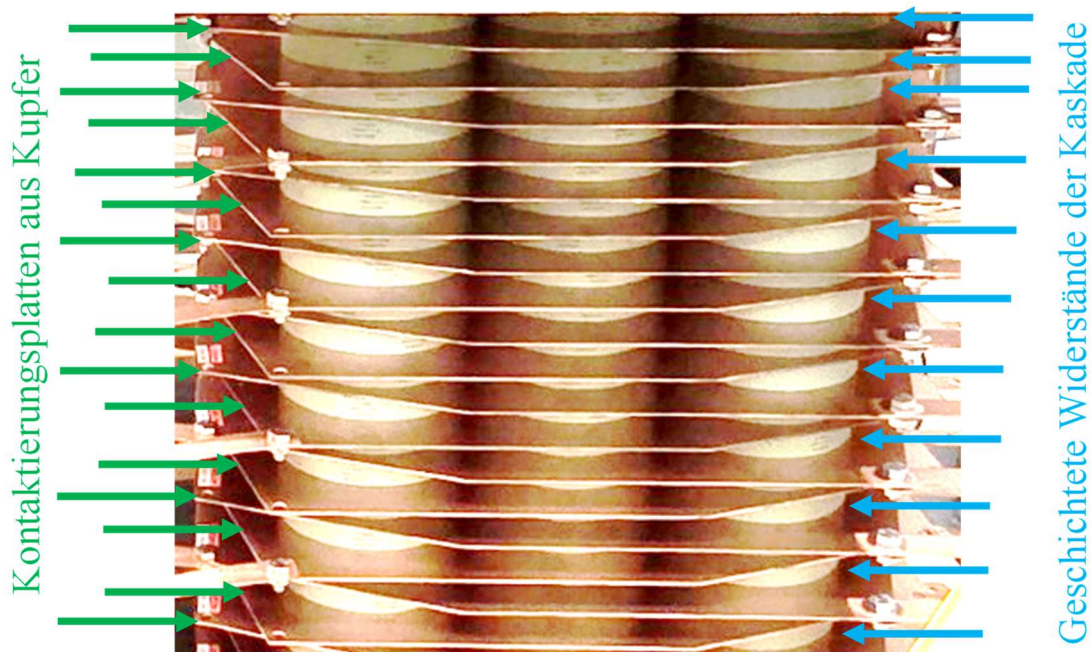


Bild 7.15 Bildausschnitt aus der Widerstandskaskade

Die Widerstandskaskade verfügt über 48 Stufen, die auf zwei Widerstandstürme aufgeteilt sind. Tabelle 7.1 enthält die Werte der Einzel-Widerstände (R_{L-v}) und der Summen-Widerstände (ΣR_{L-v}), die aus Messungen ermittelt wurden und von Stufe zu Stufe zunehmen. Die Werte der Einzel-Widerstände reichen von $0,017 \, \Omega$ für Stufe 1 bis $2,153 \, \Omega$ für Stufe 48. Gegenüber den Widerstandswerten laut Datenblatt (siehe Tabelle 5.1) sind die Unterschiede vernachlässigbar gering. Beispielsweise beträgt der Summen-Widerstand der 48. Stufe $25,6 \, \Omega$ laut Datenblatt und $25,5 \, \Omega$ gemäß Messungen.

Widerstandsturm I			Widerstandsturm II		
v-te Stufe	Einzel-Widerstand R_{L-v} in $[\Omega]$	Summen-Widerstand ΣR_{L-v} in $[\Omega]$	v-te Stufe	Einzel-Widerstand R_{L-v} in $[\Omega]$	Summen-Widerstand ΣR_{L-v} in $[\Omega]$
1	0,017	0,017	25	0,254	1,718
2	0,017	0,034	26	0,253	1,971
3	0,016	0,050	27	0,265	2,236
4	0,017	0,067	28	0,253	2,489
5	0,017	0,084	29	0,262	2,751
6	0,017	0,101	30	0,311	3,061
7	0,031	0,132	31	0,521	3,582
8	0,031	0,163	32	0,518	4,100
9	0,032	0,195	33	0,523	4,623
10	0,032	0,227	34	0,519	5,142
11	0,032	0,259	35	0,522	5,664
12	0,031	0,290	36	0,520	6,184
13	0,068	0,358	37	1,040	7,224
14	0,066	0,424	38	1,030	8,254
15	0,066	0,490	39	1,030	9,284
16	0,067	0,557	40	1,040	10,324
17	0,065	0,622	41	1,052	11,376
18	0,066	0,688	42	1,038	12,414
19	0,128	0,816	43	2,159	14,573
20	0,129	0,945	44	2,201	16,774
21	0,130	1,075	45	2,230	19,004
22	0,128	1,203	46	2,160	21,164
23	0,131	1,334	47	2,161	23,335
24	0,130	1,464	48	2,153	25,488

Tabelle 7.1 Einzel- und Summen-Widerstände der Widerstandskaskade entsprechend den Messungen

Bild 7.16 zeigt eine fotografische Aufnahme der beiden Widerstandstürme. Zur Fixierung der Keramikwiderstände und der Kupferplatten wurden runde Holzstäbe durch das Mittenloch der Keramikwiderstände geführt. Durch das hohe Eigengewicht der Keramikwiderstände und Kupferplatten wird ein ausreichend guter Kontakt erzeugt. Der Anpressdruck wird noch verstärkt durch jeweils sechs Messingscheiben, die auf die oberste Kupferplatte gelegt sind.

Wie aus Bild 7.16 entnommen werden kann, befindet sich sowohl der Strom-Eingang (Stromeinspeisung) als auch der Strom-Ausgang (Stromentnahme) auf der vorderen Seite der Widerstandstürme. Da die zwischen Ein- und Ausgang liegenden Widerstände den Gesamtwiderstand bestimmen, lässt er sich durch Änderung des Abgriffs am Ausgang leicht anpassen.

Auf der gegenüberliegenden Seite sind ebenfalls Abgriffe erkennbar. Die Abgriffe dienen allerdings nicht der Einstellung des Gesamtwiderstandes, sondern bilden die Anschlüsse an die Strom-formenden-Schalter.

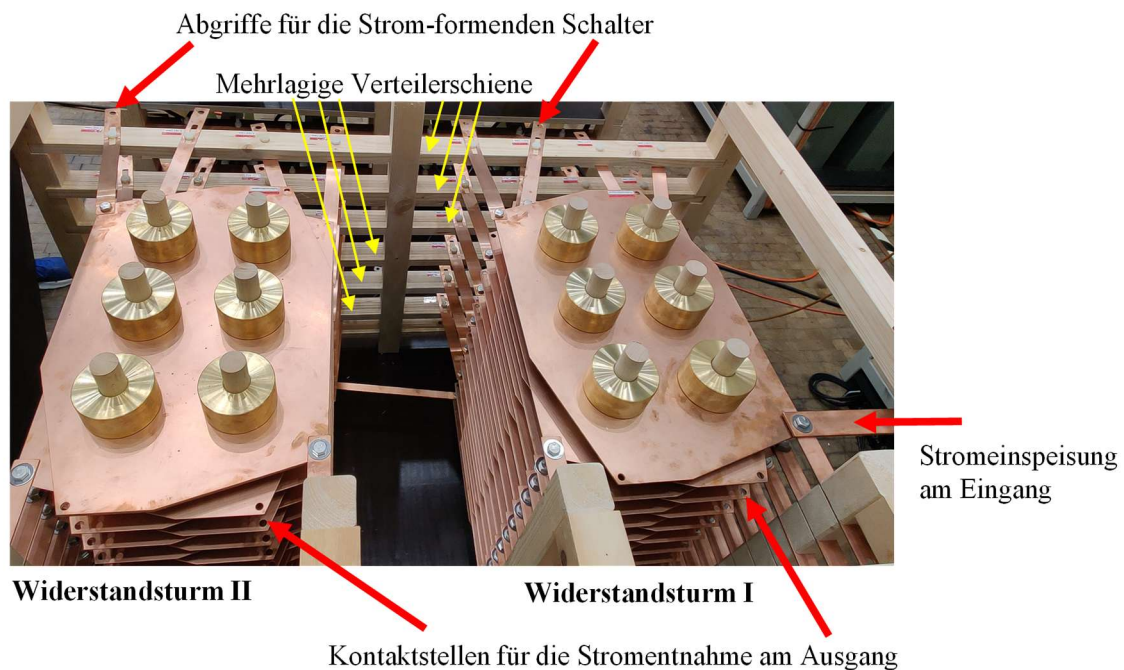


Bild 7.16 Fotografische Aufnahme der Widerstandstürme mit dahinterliegender mehrlagiger Verteilerschiene

Die Abgriffe/Kontaktstellen an den Kupferplatten sind in Bild 7.17 nochmals verdeutlicht. Dargestellt ist eine Stufe der Widerstandskaskade mit einer oberen und einer unteren Kupferplatte und sechs dazwischenliegenden Keramikwiderständen. Die

schräffierten Bereiche in der linken Bildhälfte dienen als Kontaktflächen für die Abgriffe der Strom-formenden-Schalter, während die gegenüberliegenden schraffierten Bereiche (in der rechten Bildhälfte) die Kontaktflächen für die Abgriffe der Stromentnahme zur Einstellung des Gesamtwiderstandes bilden.

Da der Abstand der Platten durch die Dicke der Keramikwiderstände von 2,54 cm bestimmt ist, wären die Isolationsabstände bei direkt übereinanderliegenden Abgriffen zu gering. Aus diesem Grund wurde den Kupferplatten eine spezielle achsensymmetrische Form gegeben. Durch diese spezielle Formgebung sind die Abgriffe versetzt, so dass nur jede zweite Kontaktfläche übereinander zum Liegen kommt und so ein hinreichender Isolationsabstand gewahrt wird.

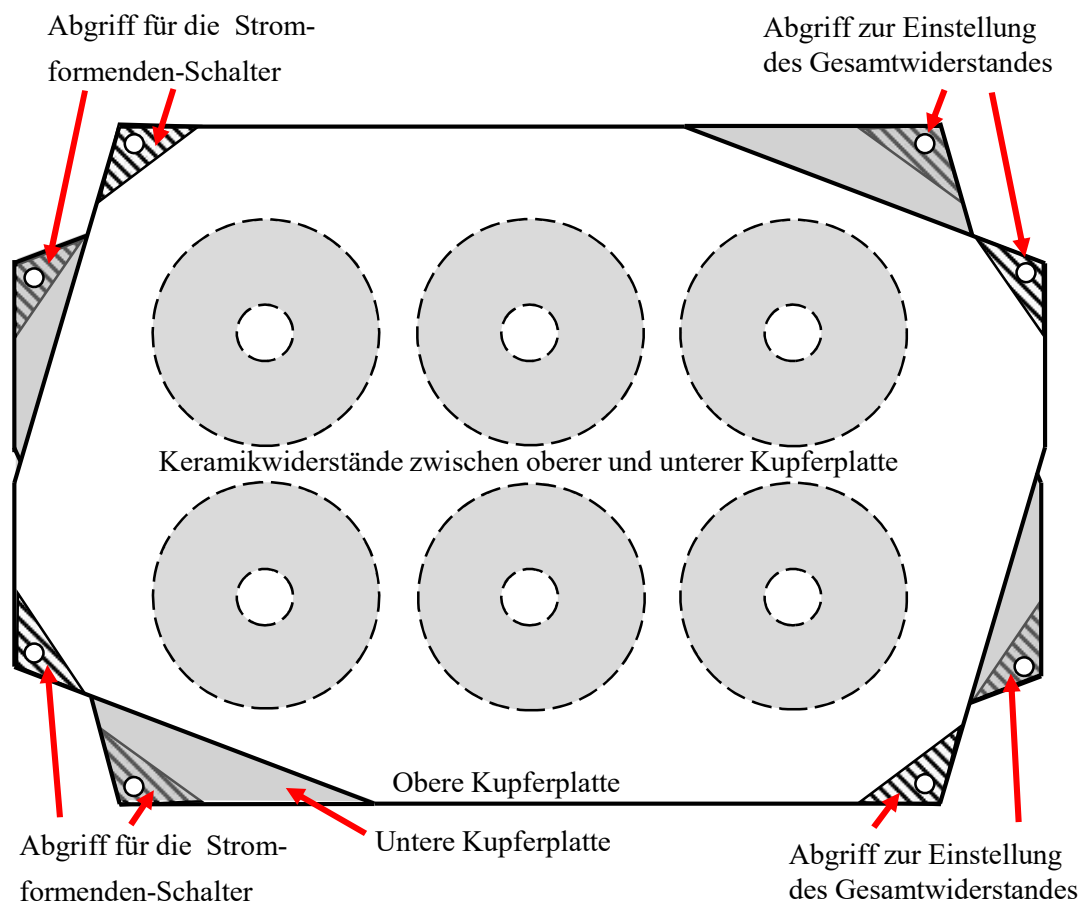


Bild 7.17 Abgriffe an den Kupferplatten für die Strom-formenden-Schalter und zur Einstellung des Gesamtwiderstandes

Bild 7.18 zeigt die Vorderseite der Widerstandstürme mit den davor befindlichen Installationen zur Stromentnahme (am Ausgang). Die Stromentnahme erfolgt über eine Abzweigung der Ausgangsschiene, über die der Strom abgeführt wird. Dazu wurden die

Abgriffe der Kupferplatten in vier Speisesträngen (mit Holzhalterungen) zusammengefasst und herausgeführt. Damit ist die Möglichkeit geschaffen, durch Verbindung zwischen dem betreffenden herausgeführten Abgriff und der Ausgangsschiene den geforderten Gesamtwiderstand leicht einstellen zu können.

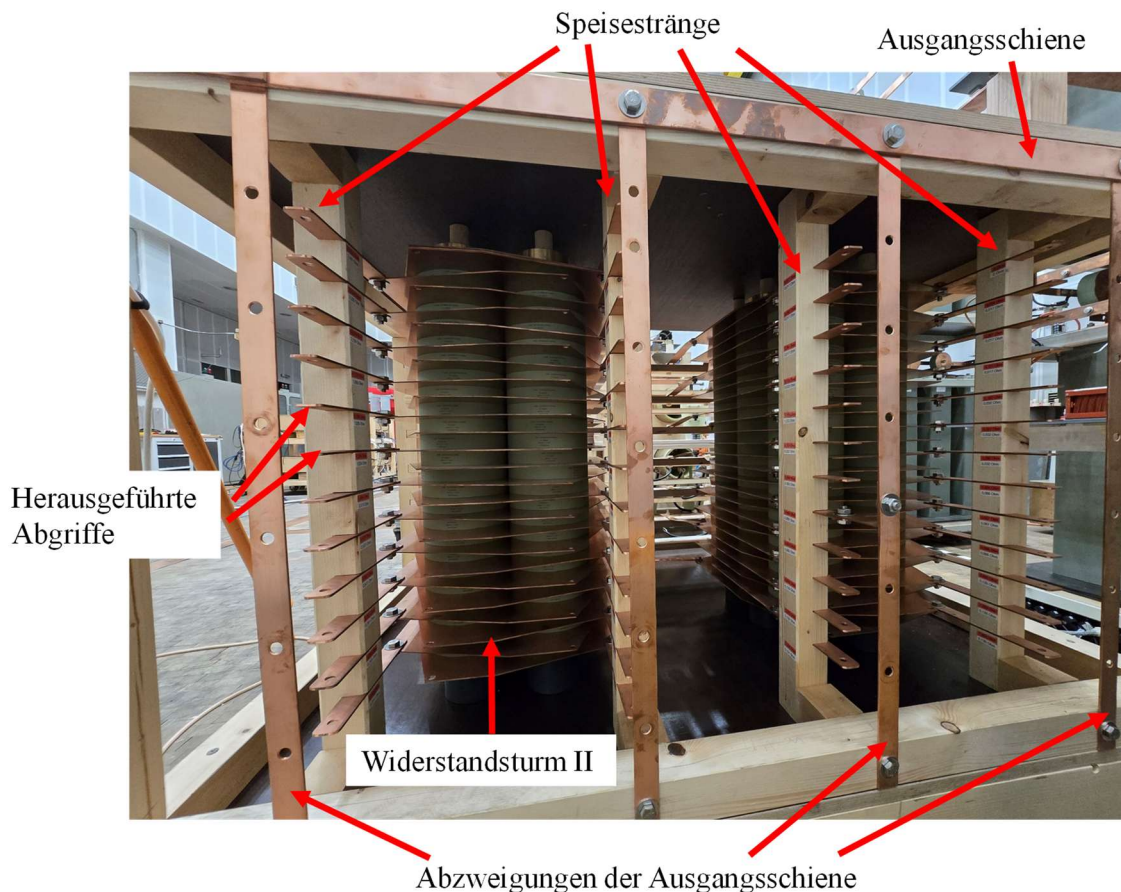


Bild 7.18 Vorderseite der Widerstandstürme mit den davor befindlichen Installationen zur Stromentnahme

Bild 7.19 verdeutlicht die Vorgehensweise in einer schematischen Darstellung. Die Abgriffe an den Kupferplatten der Widerstandstürme sind durch Kupferschienen herausgeführt. Die Kupferschienen sind 30 mm breit und haben eine Dicke von 1 mm. Aufgrund der geringen Dicke sind sie etwas flexibel und dienen daher auch der Zugentlastung.

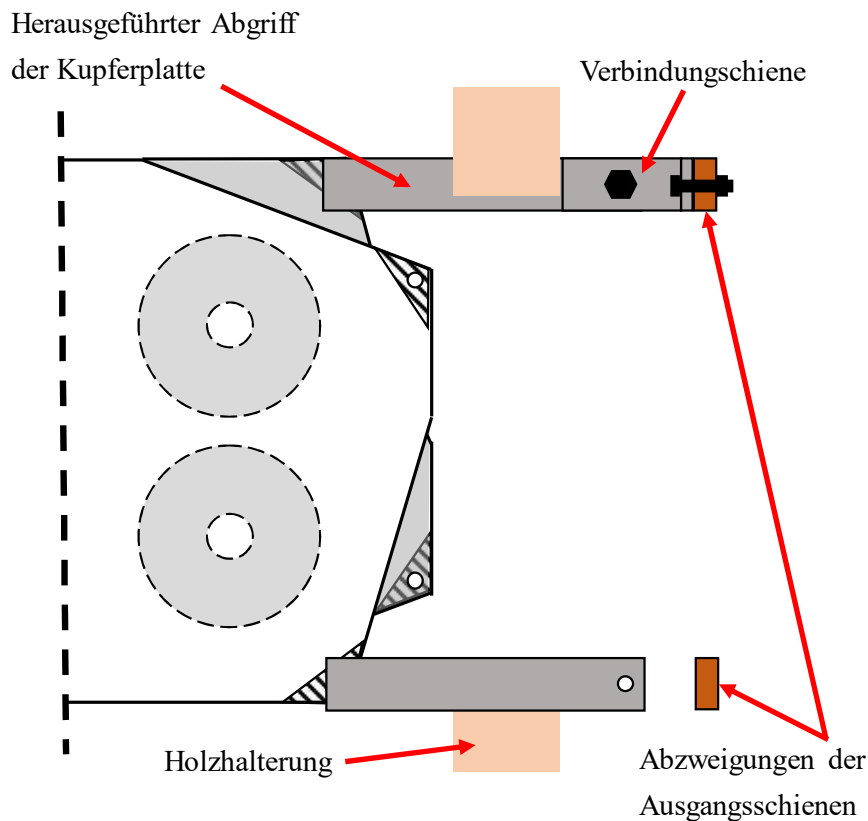


Bild 7.19 Schematische Darstellung des Anschlusses einer Stufe der Widerstandskaskade an die Ausgangsschiene

7.2.1.2 Verbindung zwischen der Widerstandskaskade und den Strom-formenden-Schaltern

Bild 7.20 zeigt eine schematische Darstellung des Verbindungsbereichs zwischen der Widerstandskaskade und den Strom-formenden-Schaltern. Der Verbindungsbereich ist auf der linken Seite durch die Schaltschiene und auf der gegenüberliegenden Seite durch die Verteilerschiene begrenzt.

Die Schaltschiene besteht aus 16 einzelnen übereinander angebrachten Kupferschienen, die durch Holzhalterungen fixiert sind. An die Kupferschienen sind die Strom-formenden-Schalter fest angeschlossen. Die Verteilerschiene besteht aus insgesamt 9 Ebenen mit jeweils einer Holzhalterung. An jede Holzhalterung sind die Abgriffe von 8 Kupferplatten der Widerstandstürme herausgeführt.

Bild 7.21 zeigt beispielhaft eine fotografische Aufnahme des Verbindungsbereichs mit angeschlossenen Verbindungsleitungen zwischen Schaltschiene und Verteilerschiene.

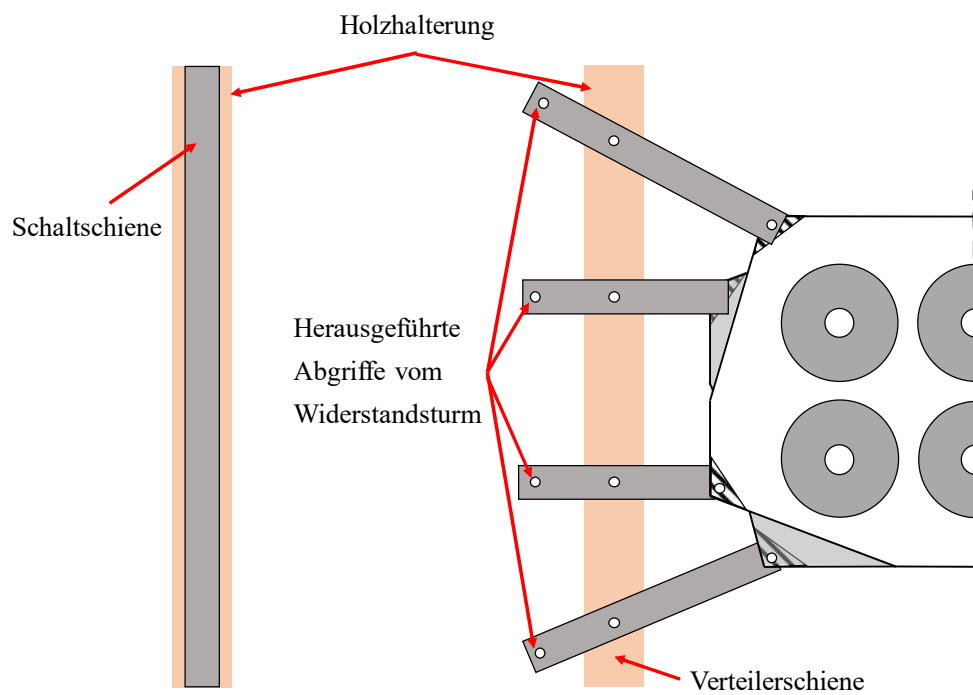


Bild 7.20 Schematische Darstellung des Verbindungsbereichs zwischen der Widerstandskaskade und den Strom-formenden-Schaltern



Bild 7.21 Verbindungsbereich mit angeschlossenen Verbindungsleitungen zwischen Schaltschiene und Verteilerschiene

7.2.1.3 Aufbau des Schalter-Bereichs mit den Systemschaltern

Bild 7.22 zeigt eine fotografische Aufnahme der Einheit mit den Systemschaltern. Auf der unteren Ebene sind die vier Strom-formenden-Schalter (S_{L-1} bis S_{L-4}) installiert. Diese überbrücken einzelne oder mehrere Stufen der Widerstandstürme und müssen dementsprechend gegen die über den Stufen abfallende Spannung isoliert sein. Wird der Langzeitstrom-Generator mit dem Stoßstrom-Generator kombiniert, können im ungünstigsten Fall Spannungen von einigen 10 kV an den Schaltkontakten des Schalters anliegen. Als Strom-formender-Schalter wurde daher ein Hochspannungsrelais (Firma: Ross Engineering, Typ: E60-NO-80-0-31) ausgewählt, das im offenen Zustand eine Spannungsfestigkeit von 60 kV aufweist.

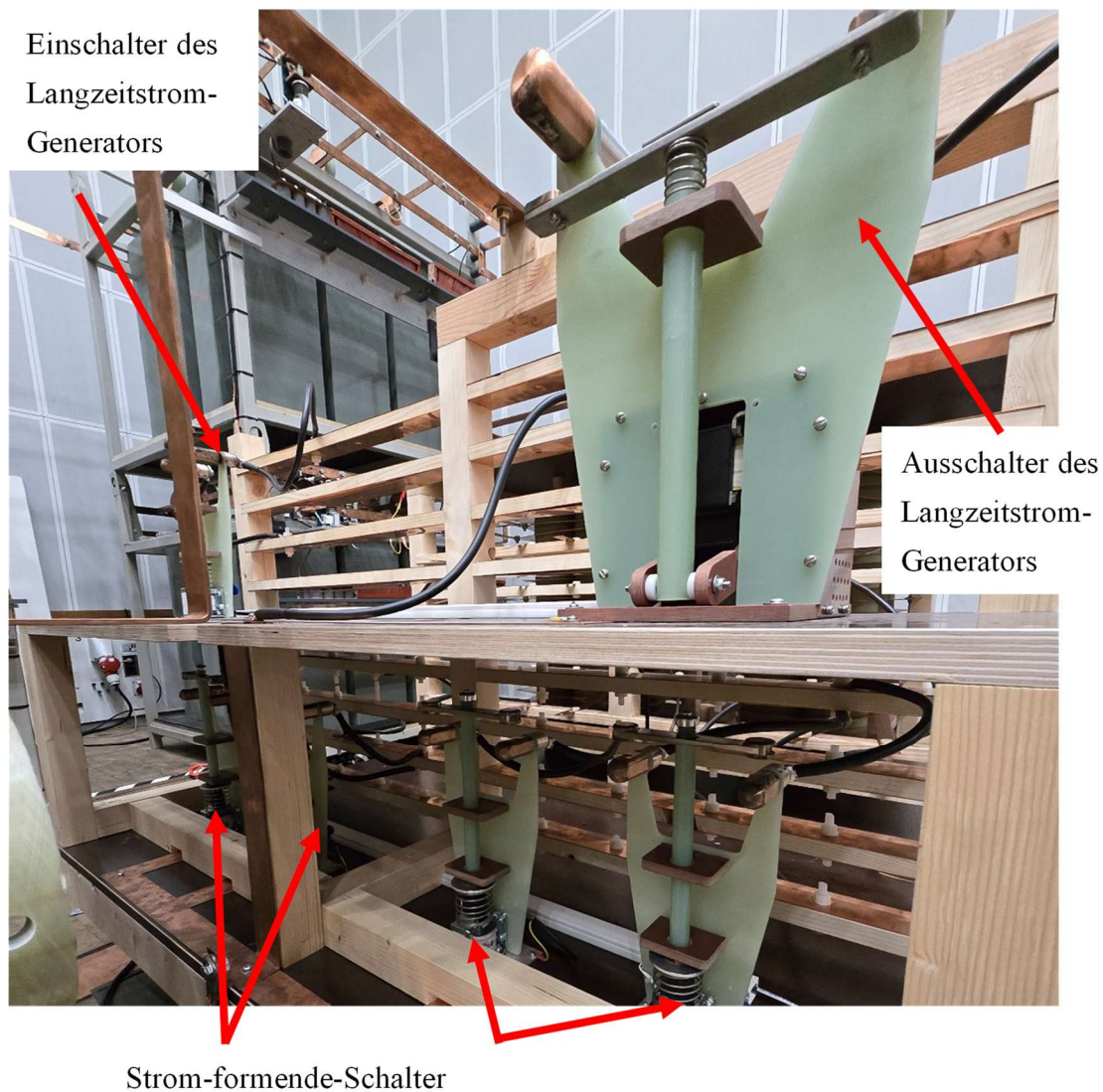


Bild 7.22 Schalter-Bereich mit den Systemschaltern

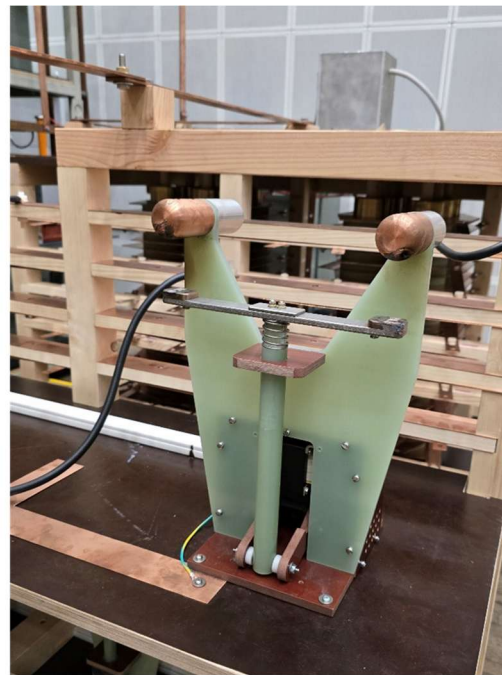
Auf der oberen Ebene sind die Schalter für das Ein- und Ausschalten des Langzeitstrom-Generators installiert. Als Einschalter wurde dasselbe Hochspannungsrelais (Firma: Ross Engineering, Typ: E60-NO-80-0-31) wie bei den Strom-formenden-Schaltern gewählt.

An den Ausschalter werden höhere Anforderungen gestellt, da er gegenüber Spannungen des Stoßstrom-Generators im ungünstigsten Fall von bis zu 100 kV isolieren muss. Deshalb wurde hierfür ein Hochspannungsrelais (Firma: Ross Engineering, Typ: ED100-NO-100) gewählt, das eine Spannungsfestigkeit von 100 kV aufweist. Der Ausschalter ist parallel zum Prüfobjekt eingebaut und wird beim Ausschalten geschlossen. Mit dem Ausschalter wird der Strom daher nicht ausgeschaltet, sondern über einen Bypass am Prüfobjekt vorbeigeleitet. Dadurch kommutiert der Strom am Prüfobjekt in den Ausschalter und wird auf diese Weise zu Null gebracht.

Bild 7.23 zeigt eine fotografische Aufnahme der beiden Schalter. Beiden Schaltertypen ist gemeinsam, dass sie normalerweise offen sind. Wie bei den Erdungsschaltern wurden auch hier spezielle Kontakte aus einer Wolfram-Legierung verwendet, um den Abbrand an den Elektroden zu vermeiden.



(a)



(b)

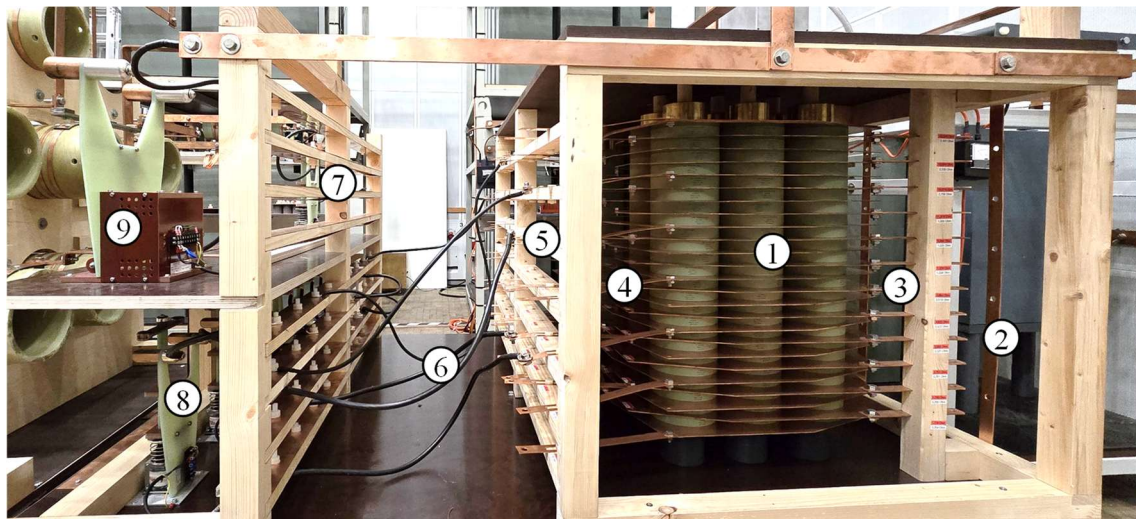
Bild 7.23 Fotografische Aufnahme (a) des Einschalters und (b) des Ausschalters des Langzeitstrom-Generators

7.2.1.4 Übersicht über den Aufbau der Widerstandskaskade und der Systemschalter

Bild 7.24 zeigt eine Übersicht über den Aufbau der Widerstandskaskade und der Systemschalter auf dem gemeinsamen Gestell. Die Widerstandskaskade (1) ist an ihrem Ausgang mit einer Abzweigung der Ausgangsschiene (2) über die herausgeführten Abgriffe der Kupferplatten (3) verbunden.

Zur Stromformung werden die auf der gegenüberliegenden Seite herausgeführten Abgriffe der Kupferplatten (4) auf eine Verteilerschiene (5) geführt, von dort über flexible Verbindungs-Leitungen (6) mit den Schaltschienen (7) verbunden, an die wiederum die vier Strom-formenden-Schalter S_{L-1} bis S_{L-4} (8) angeschlossen sind.

Während sich die Strom-formenden-Schalter auf der unteren Ebene der Schaltereinheit befinden, sind der Ausschalter (9) und der Einschalter (hier nicht sichtbar) in der Ebene darüber installiert.



1. Widerstandskaskade
2. Abzweigung der Ausgangsschiene (Ausgang der Widerstandskaskade)
3. Herausgeführte Abgriffe der Kupferbleche zur Ausgangsschiene
4. Herausgeführte Abgriffe der Kupferbleche zu den Verteilerschienen
5. Verteilerschienen
6. Flexible Verbindungs-Leitungen
7. Schaltschienen
8. Strom-formende-Schalter
9. Ausschalter

Bild 7.24 Übersicht über den Aufbau der Widerstandskaskade mit der Einheit für die Hochspannungsschalter

7.2.2 Induktivität des Langzeitstrom-Generators

Bild 7.25 zeigt eine schematische Darstellung der modular aufgebauten Induktivität des Langzeitstrom-Generators. Der modulare Aufbau umfasst insgesamt acht Spulen, die in einem Holzgestell gelagert sind. Gemäß Datenblatt haben zwei Spulen jeweils eine Induktivität von $100\ \mu\text{H}$, vier Spulen haben jeweils eine Induktivität von $60\ \mu\text{H}$ und zwei Spulen weisen eine Induktivität von jeweils $40\ \mu\text{H}$ auf, so dass sich im Idealfall durch Hintereinanderschaltung aller Spulen eine maximale Induktivität von $520\ \mu\text{H}$ ergibt.

Die Induktivität ist räumlich nach der Widerstandskaskade mit den Systemschaltern angeordnet. Der Eingang der Induktivität befindet sich auf der in Bild 7.25 nicht sichtbaren Rückseite der Spulen. Aufgrund der vorerwähnten Daten der einzelnen Spulen kann die Gesamtgröße der Induktivität in weitem Rahmen zwischen $40\ \mu\text{H}$ und $520\ \mu\text{H}$ verändert werden. Dazu wurden die Anschlüsse der Spulen sowohl auf der Vorderseite als auch auf der Rückseite herausgeführt, um sie entsprechend seriell oder parallel verschalten zu können. Zu diesem Zweck dienen Kupferschienen mit einem Leiterquerschnitt von $150\ \text{mm}^2$.

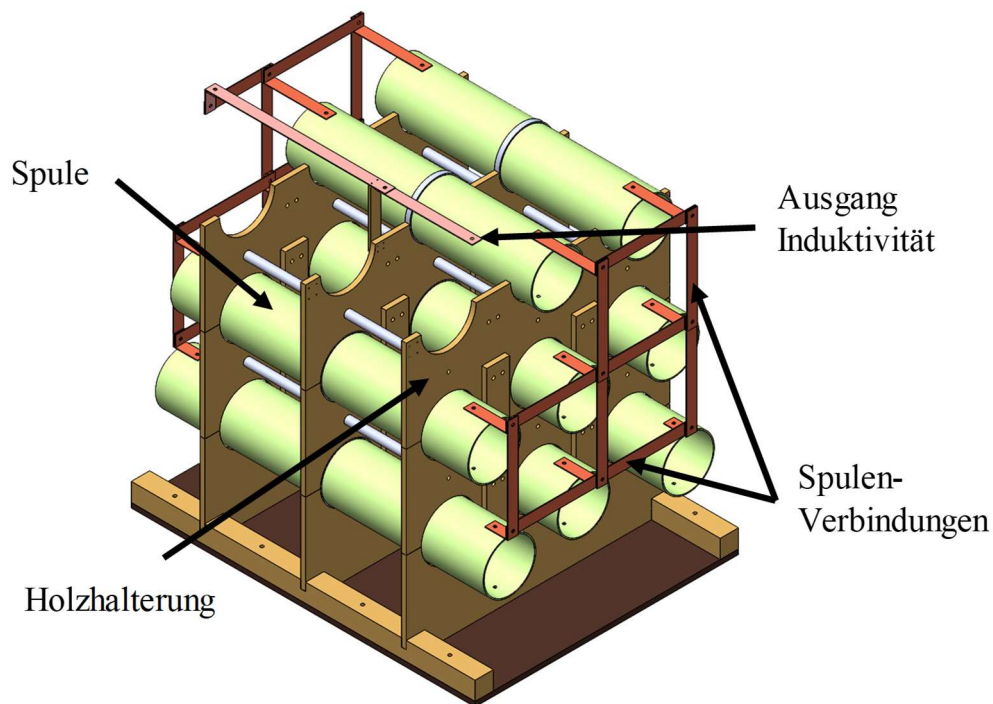


Bild 7.25 Schematische Darstellung der modular aufgebauten Induktivität des Langzeitstrom-Generators

Die einzelnen Spulen bestehen aus je einem GFK-Zylinder, der als Trägermaterial dient und einen Durchmesser von 230 mm aufweist. Auf diesen GFK-Zylinder sind die Windungen der Spule gewickelt und durch einen Überzug aus GFK mechanisch fixiert. Die Wicklungen der Spulen bestehen aus Kupfer-Flachmaterial mit einem Leiterquerschnitt von 75 mm^2 .

Die Induktivität ist auf einem fahrbaren Gestell aufgebaut. Das Gestell besteht aus einer hölzernen Rahmenkonstruktion mit einer darauf angebrachten Multiplex-Grundplatte (Holzplatte). Bild 7.26 zeigt eine fotografische Aufnahme. Da bei Verbindung mit dem Stoßstrom-Generator im „worst case“ eine Spannung von 140 kV am Ausgang der Induktivität anliegen kann (siehe Kapitel 6.3.2), wurde der Ausgang (Verbindung zum Prüffeld) am oberen Ende der Induktivität platziert, um den notwendigen Isolationsabstand einzuhalten. Aus dem gleichen Grund wurden alle Spulen mindestens 15 cm voneinander bzw. von geerdeten Teilen entfernt platziert.

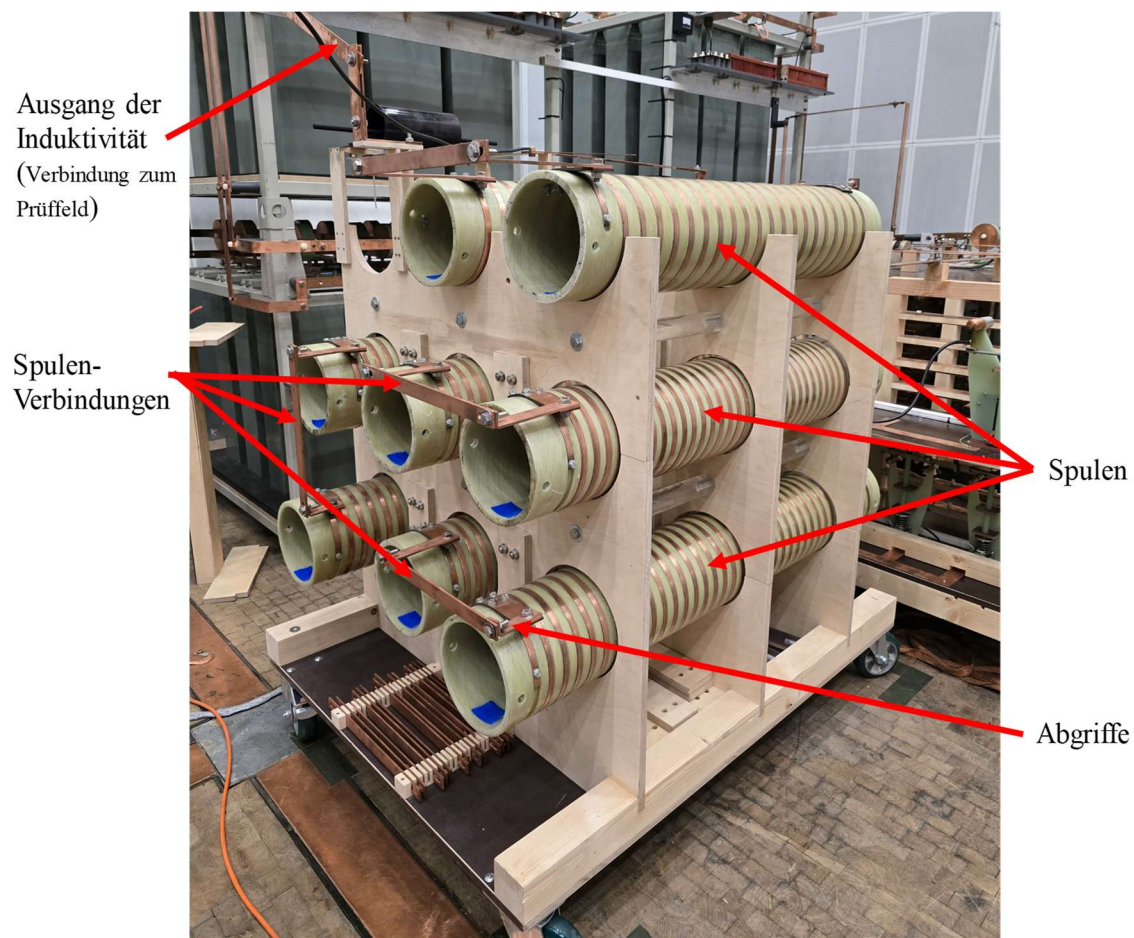


Bild 7.26 Fotografische Aufnahme der modular aufgebauten Induktivität auf einem hölzernen Rahmengestell

7.3 Langzeitstrom-Generator in der Hochspannungshalle

Bild 7.27 zeigt eine fotografische Aufnahme des Langzeitstrom-Generators in der Hochspannungshalle der Universität der Bundeswehr München. Wie dem Übersichtsbild entnommen werden kann, sind die Kondensator-Module 1 bis 4 und das Hochspannungs-Ladegerät im hinteren Bereich der Hochspannungshalle installiert. Im vorgelagerten Bereich befinden sich das (Kondensator-)Sondermodul, das fahrbare Gestell mit der Widerstandskaskade sowie das fahrbare Gestell mit der Induktivität. In den vorgelagerten Bereich wurde auch die Entladeschiene herausgeführt, um dort einen definierten, leicht einsehbaren Erdungspunkt zu schaffen. An diesem Erdungspunkt wird die Erdungsstange nach Herstellung der Spannungsfreiheit bei Betreten der Hochspannungs-Seite eingehängt.

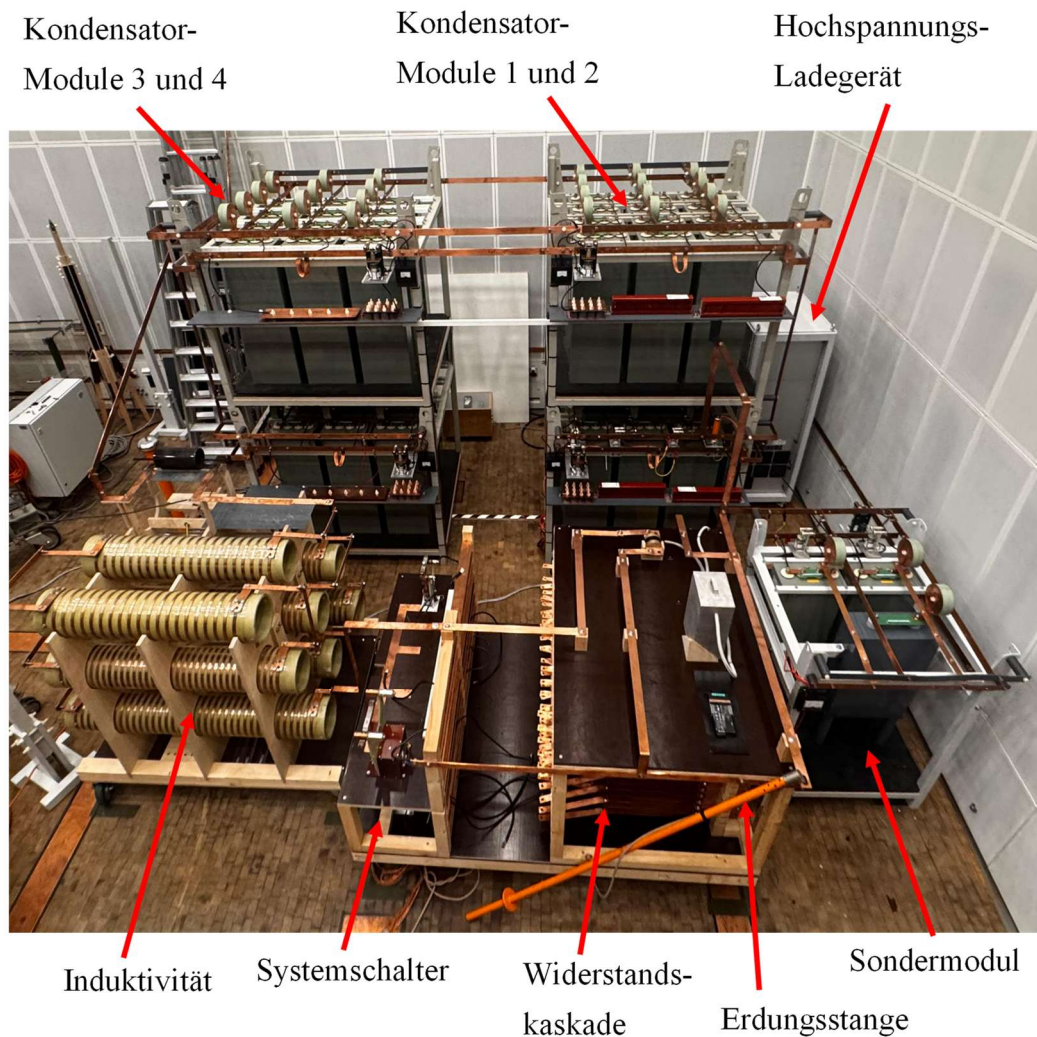


Bild 7.27 Fotografische Aufnahme des Langzeitstrom-Generators in der Hochspannungshalle der Universität der Bundeswehr München

8. Triggerung des Langzeitstrom-Generators

Für die Triggerung, d.h. das Auslösen des Langzeitstrom-Generators, sind zwei Möglichkeiten vorgesehen: Je nach Anforderung kann die Triggerung entweder mit einem mechanischen oder einem Funkenstrecken-Schalter erfolgen.

Ein mechanischer Schalter bietet Vorteile, wenn die Schaltverzugszeit, die typischerweise im Bereich von einigen zehn Millisekunden liegt, toleriert werden kann. Daher kann ein mechanischer Schalter nur eingesetzt werden, wenn keine zeitliche Synchronisation mit kürzerer Zeitdauer erforderlich ist. Dies ist in der Regel der Fall, wenn nur der Langzeitstrom ohne zeitliche Kopplung mit anderen Impulsen wie dem Stoßstrom realisiert wird.

Ist dies nicht der Fall, wird ein elektrischer Funkenstrecken-Schalter verwendet. Damit ist es möglich, den Langzeitstrom-Generator mit einer vernachlässigbaren Schaltverzugszeit im Bereich von etwa einer Mikrosekunde einzuschalten. Nachteilig daran ist allerdings, dass (im Gegensatz zum mechanischen Einschalter) ein Hochspannungs-Zündfunke (zum Auslösen des Funkenstrecken-Schalters) von einem zusätzlichen externen Gerät bereitgestellt werden muss.

Weist das Prüfobjekt eine Ansprechspannung auf, die höher ist als die Ladespannung des Langzeitstrom-Generators, kann ebenfalls kein mechanischer Einschalter verwendet werden. Dies kann beispielsweise bei Prüfobjekten vorliegen, die eine Funkenstrecke mit entsprechend hoher Durchzündspannung beinhalten. In diesem Fall kann ebenfalls nur ein elektrischer Funkenstrecken-Schalter verwendet werden. Die Spannung muss hoch genug sein, um sowohl den Funkenstrecken-Schalter auszulösen als auch die Funkenstrecke des Prüfobjekts zu überbrücken.

8.1 Auslösung des Langzeitstrom-Generators über einen mechanischen Einschalter

Die Auslösung des Langzeitstrom-Generators mittels mechanischem Einschalter ($S_{L-Zünd}$) stellt die einfachste Art der Triggerung dar. Wie im Ablaufdiagramm in Bild 8.1 dargestellt ist, schaltet die auf der Niederspannungs-Seite befindliche Steuer-Einheit den Langzeitstrom-Generator über eine interne SPS-Steuerung ein. Nach Betätigung des Einschalters werden die (mechanischen) Strom-formenden-Schalter sowie der (mechanische) Ausschalter sukzessive hinzugeschaltet. Um diese Schaltvorgänge zu synchronisieren, ist es erforderlich, dass die Schaltverzugszeiten bestimmt und entsprechend kompensiert werden.

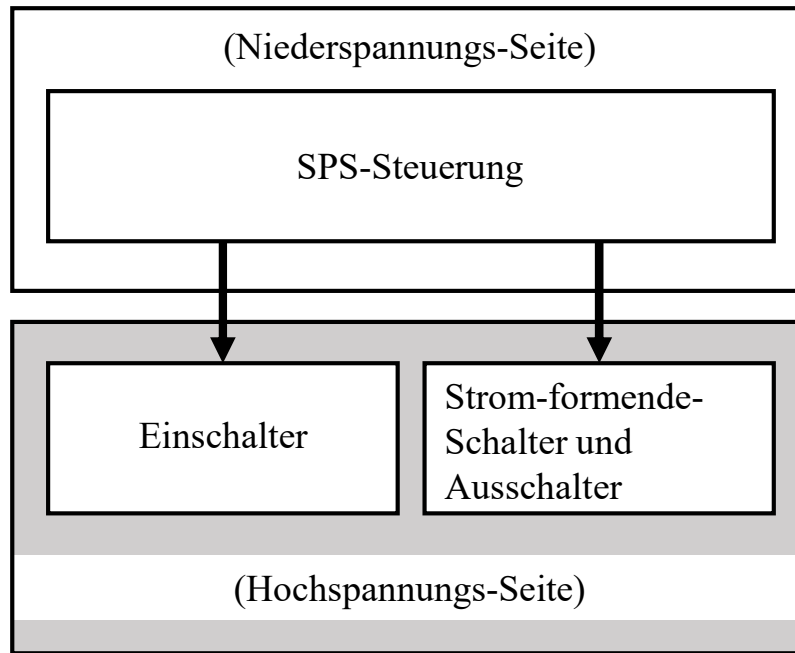


Bild 8.1 Steuerung des Langzeitstrom-Generators über mechanische (System)-Schalter

8.1.1 Bestimmung der Schaltverzugszeiten der mechanischen Schalter

Um die Schaltverzugszeiten der einzelnen Schalter zu ermitteln, wurden die mechanischen Schalter (Strom-formenden-Schalter S_{L-1} bis S_{L-4} , Einschalter $S_{L-Zünd}$ und Ausschalter S_{L-P}) zeitversetzt (bei Untersuchungen mit dem Langzeitstrom) ausgelöst. Anschließend wurden die Schaltverzugszeiten aus dem zeitlichen Verlauf des Langzeitstroms bestimmt. Die Schaltverzugszeit (t_{Verzug}) ergibt sich aus der Differenz der gemessenen Schaltzeit ($t_{gem. SZ}$) zu der eingestellten Schaltzeit ($t_{eing. SZ}$):

$$t_{Verzug} = t_{gem. SZ} - t_{eing. SZ} \quad (8.1)$$

Tabelle 8.1 enthält die in den Datenblättern angegebenen Schaltverzugszeiten. Für die Strom-formenden-Schalter (S_{L-1} , ... , S_{L-4}) sowie für den Einschalter ($S_{L-Zünd}$) ist eine Schaltverzugszeit von jeweils 40 ms angegeben, während sie für den Ausschalter (S_{L-P}) 100 ms beträgt. Tabelle 8.1 enthält auch die tatsächlichen Werte, die auf den arithmetischen Mittelwerten von jeweils fünf gemessenen Schaltzeiten beruhen. Wie zu erkennen ist, sind die tatsächlichen Schaltverzugszeiten tendenziell etwas länger als im Datenblatt angegeben, mit Ausnahme des Ausschalters (S_{L-P}), der eine deutlich kürzere Schaltverzugszeit von 69 ms aufweist.

	Schaltzeit		Schaltverzugszeit		
Schalter	Eingestellt $t_{\text{eing. SZ}}$ [ms]	Gemessen $t_{\text{gem. SZ}}$ [ms]	t_{Verzug} gemessen [ms]	t_{Verzug} Datenblatt [ms]	Abweichung vom Datenblatt
S _{L-1}	100	147	47	40	+ 17,5 %
S _{L-2}	200	254	58	40	+ 35 %
S _{L-3}	280	326	46	40	+ 15 %
S _{L-4}	380	419	39	40	- 2,5 %
S _{L-Ein}	400	442	42	40	+ 5 %
S _{L-P}	0	69	69	100	- 31 %

Tabelle 8.1: Gemessene Schaltverzugszeit und Abweichung gegenüber dem Datenblatt

8.1.2 Einbau des mechanischen Einschalters

Bild 8.2 zeigt den mechanischen Einschalter (S_{L-Zünd}), der auf der oberen Ebene im Schalter-Bereich der Widerstandskaskade eingebaut ist. Die Kontakte des Einschalters sind mithilfe von isolierten 16 mm² Kupferkabeln auf der einen Seite mit dem Ausgang der Widerstandskaskade und auf der anderen Seite mit dem Eingang der Induktivität verbunden.

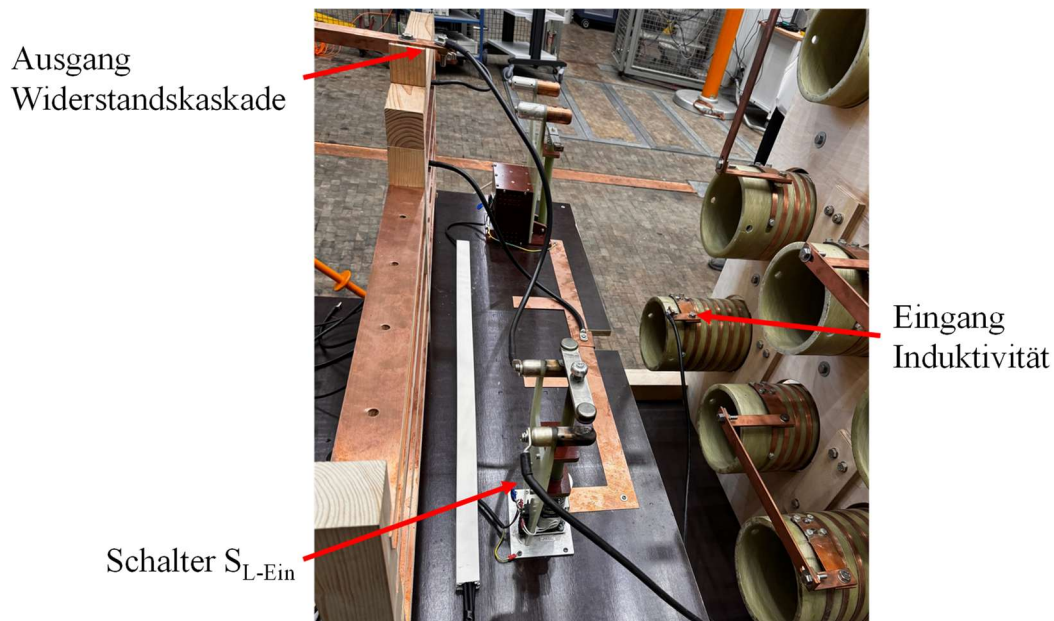


Bild 8.2 Einbau des mechanischen Einschalters S_{L-Zünd}

8.2 Auslösung des Langzeitstrom-Generators über einen Funkenstrecken-Schalter

Die elektrische Auslösung des Langzeitstrom-Generators erfolgt durch einen Funkenstrecken-Schalter, der die leitende Verbindung zum Prüfobjekt herstellt. Hierzu wird ein externer Zündgenerator benötigt, der mit einem Hochspannungsimpuls den Funkenstrecken-Schalter auslöst. Als Zündgenerator wird der Marx-Generator verwendet, der im Hochspannungslabor zur Erzeugung von Stoßspannungen bereits vorhanden ist (siehe z.B. [90] und Kapitel 6.3.1).

Bild 8.3 zeigt das Ablaufdiagramm des Trigger-Vorgangs. Der Trigger-Vorgang beginnt damit, dass die Steuerung des Marx-Generators je einen Steuerimpuls an den Marx-Generator und an die SPS-Steuerung ausgibt. Daraufhin wird der Marx-Generator ausgelöst, der dann den Funkenstrecken-Schalter zündet. Zeitgleich startet eine Uhr in der SPS-Steuerung, woraufhin die Strom-formenden-Schalter sowie der Ausschalter den eingestellten Zeiten entsprechend ausgelöst werden.

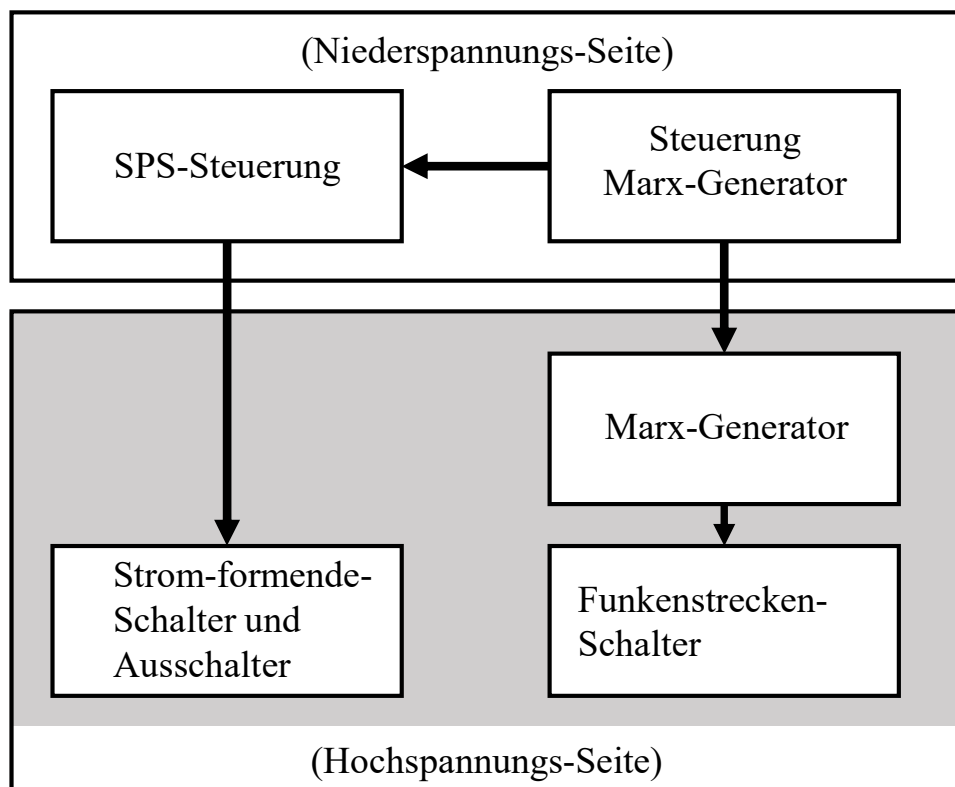


Bild 8.3 Auslösung des Langzeitstrom-Generators über Funkenstrecken-Schalter

8.2.1 Auswahl des Funkenstrecken-Schalters

Bei der Auswahl des Funkenstrecken-Schalters ist insbesondere darauf zu achten, dass die Elektroden eine hinreichende Hitzebeständigkeit aufweisen. Daher wurde ausschließlich Wolfram-Kupfer als Elektrodenmaterial verwendet, das extrem thermisch belastbar ist. Gleichwohl führte das Fließen des Langzeitstroms und die damit verbundene erhebliche Ladungsmenge zum deutlichen Abbrand an den Elektroden.

Bild 8.4 zeigt ein Beispiel für das Abbrand-Verhalten bei Verwendung üblicher Kugelkalotten als Elektroden. Beim weiteren Verlauf der Untersuchungen hat sich gezeigt, dass der Abbrand so hoch war, dass letztere regelmäßig ausgetauscht werden mussten. Je nach Stärke und Dauer des Langzeitstroms war dies bereits nach einigen zehn Versuchen erforderlich.

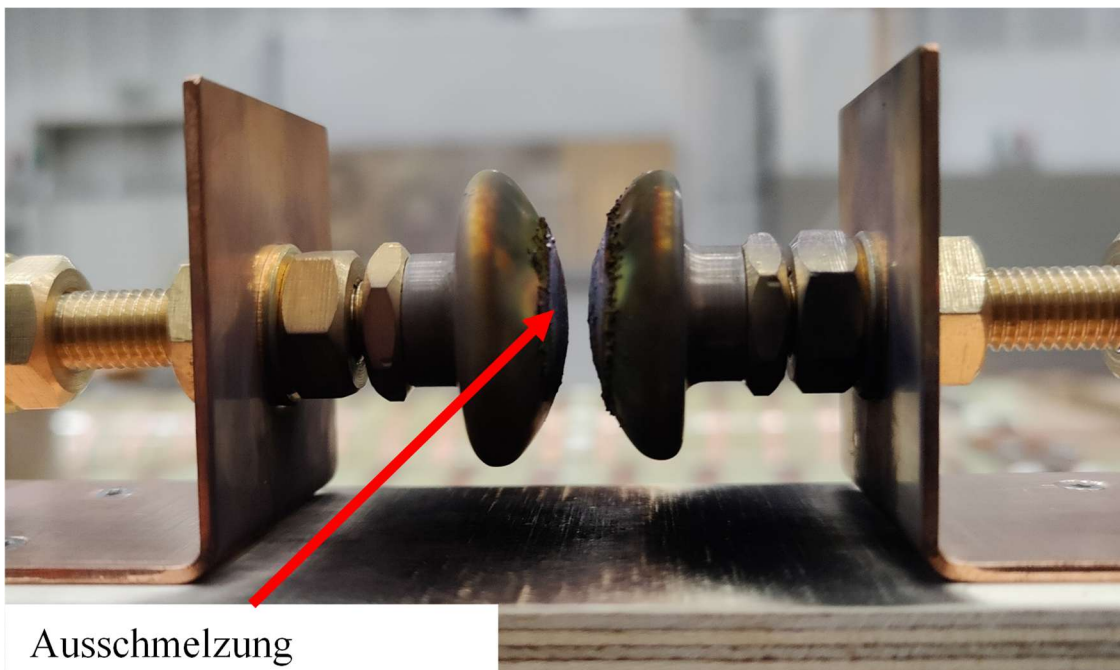


Bild 8.4 Funkenstrecken-Schalter mit Ausschmelzungen an den Kugelkalotten-Elektroden aus Wolfram-Kupfer

Um diese Nachteile zu vermeiden, wurde der Funkenstrecken-Schalter modifiziert. Der modifizierte Funkenstrecken-Schalter verwendet als Elektroden zwei Stangen aus Wolfram-Kupfer mit einem Durchmesser von 11 mm. Wie aus Bild 8.5 ersichtlich ist, stehen sich die zwei Wolfram-Kupfer-Stangen gegenüber und bilden so einen Spalt, der als Entladungsraum für die Funkenstrecke dient.

Der Abbrand an den Stangen kann zwar nicht verhindert werden, so dass sich auch in diesem Fall der Abstand zwischen den Elektroden stetig vergrößert. Der Abstand kann jedoch relativ einfach korrigiert werden. Die Wolfram-Kupfer-Stangen werden nämlich durch Klemmverbindungen in Kupfer-Halterungen fixiert. Durch Lösen der Klemmverbindung können die Wolfram-Kupfer-Stangen einfach nachgeschoben und der Abstand zwischen den Elektroden kann so nachjustiert werden.

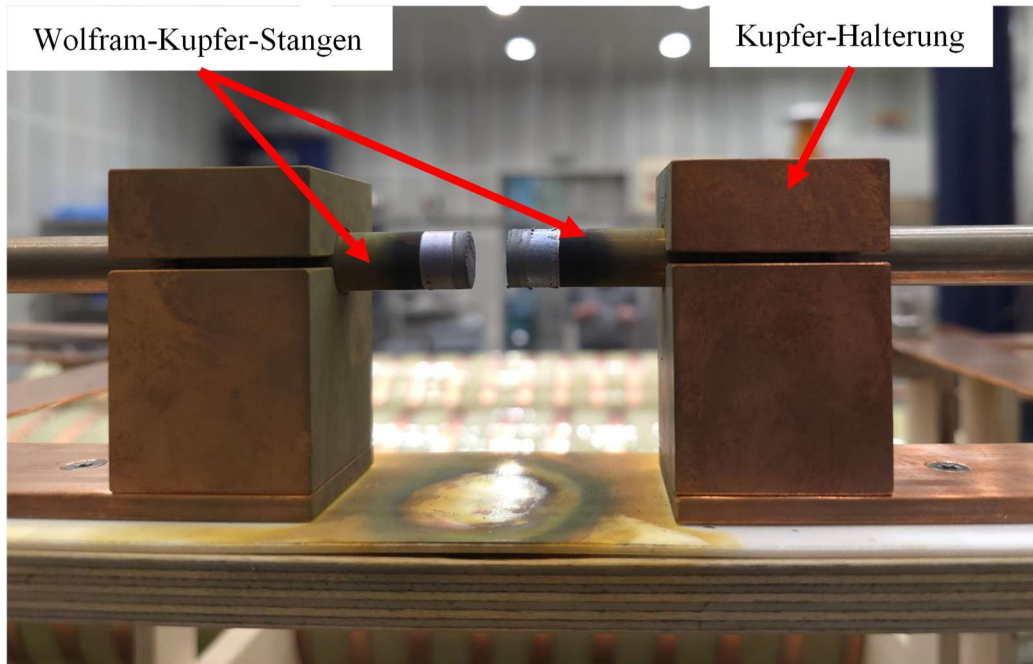


Bild 8.5 Funkenstrecken-Schalter mit Stangen-Elektroden aus Wolfram-Kupfer

8.2.2 Einbau des Funkenstrecken-Schalters

Der Funkenstrecken-Schalter ist am Ausgang der Induktivität eingebaut. Um einen unkontrollierten Funkenflug von den Stangen-Elektroden (des Funkenstrecken-Schalters) zu vermeiden, wurde der Schalter eingehaust. Die Einhausung besteht aus einem Plexiglas-Zylinder, der über den Funkenstrecken-Schalter gestülpt und zum Druckausgleich auf beiden Seiten offengelassen wurde. Aufgrund der starken Verrußung ist der Plexiglas-Zylinder in Bild 8.6 nur mehr als schwarzes röhrenförmiges Gebilde erkennbar. Der Funkenstrecken-Schalter ist zwischen den Anschlusspunkten 1 und 2 eingebaut. Wird anstelle des Funkenstrecken-Schalters ein mechanischer Einschalter eingesetzt, werden die Anschlusspunkte mit einer Schiene aus Kupfer überbrückt. Auf diese Weise wird der Funkenstrecken-Schalter aus dem Stromkreis genommen.

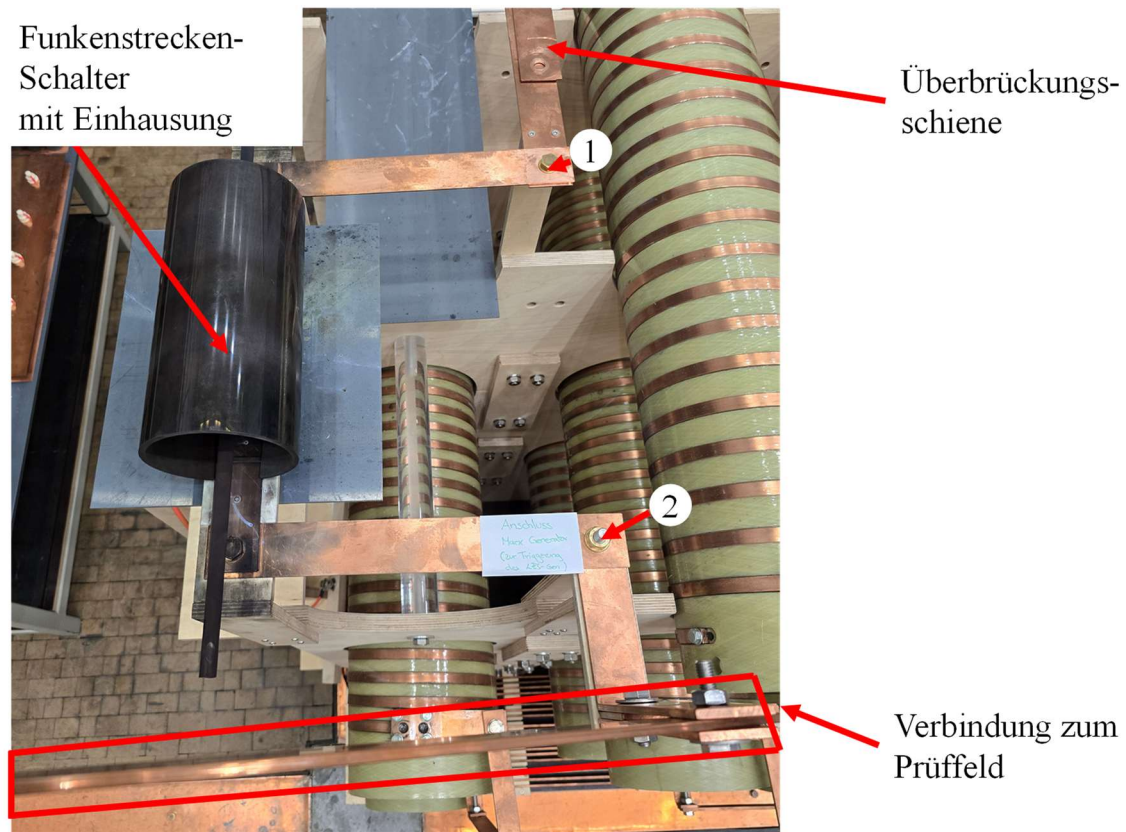


Bild 8.6 Einbau des Funkenstrecken-Schalters

8.2.3 Technische Realisierung der elektrischen Triggerung

Von der Steuerung des Marx-Generators (siehe Bild 8.3) wird ein optischer Trigger-Impuls an einen Umsetzer gegeben, der unmittelbar am Marx-Generator eingebaut ist. Der Umsetzer wandelt den optischen Trigger-Impuls in einen elektrischen Impuls von 900 V. Dieser elektrische Impuls wird am Ausgang des Umsetzers abgegriffen und an einen Trigger-Transformator weitergeleitet. Bild 8.7 zeigt den bereits vorhandenen Umsetzer und den Trigger-Transformator. Der Trigger-Transformator erzeugt aus dem 900 V-Impuls einen 9 kV-Zündimpuls, der schließlich den Marx-Generator auslöst.

Der (elektrische) Impuls von 900 V wird am Ausgang des Umsetzers zum zweiten Mal abgegriffen und von dort zu einem zweiten (ergänzten) Umsetzer (nicht dargestellt in Bild 8.7) geführt. Dieser zweite Umsetzer wandelt den elektrischen 900 V-Impuls zurück in ein optisches Signal, das zu der SPS-Steuerung des Langzeitstrom-Generators geführt wird, wo es weiterverarbeitet wird.

Optischer Trigger-Impuls von der
Steuerung des Marx-Generators

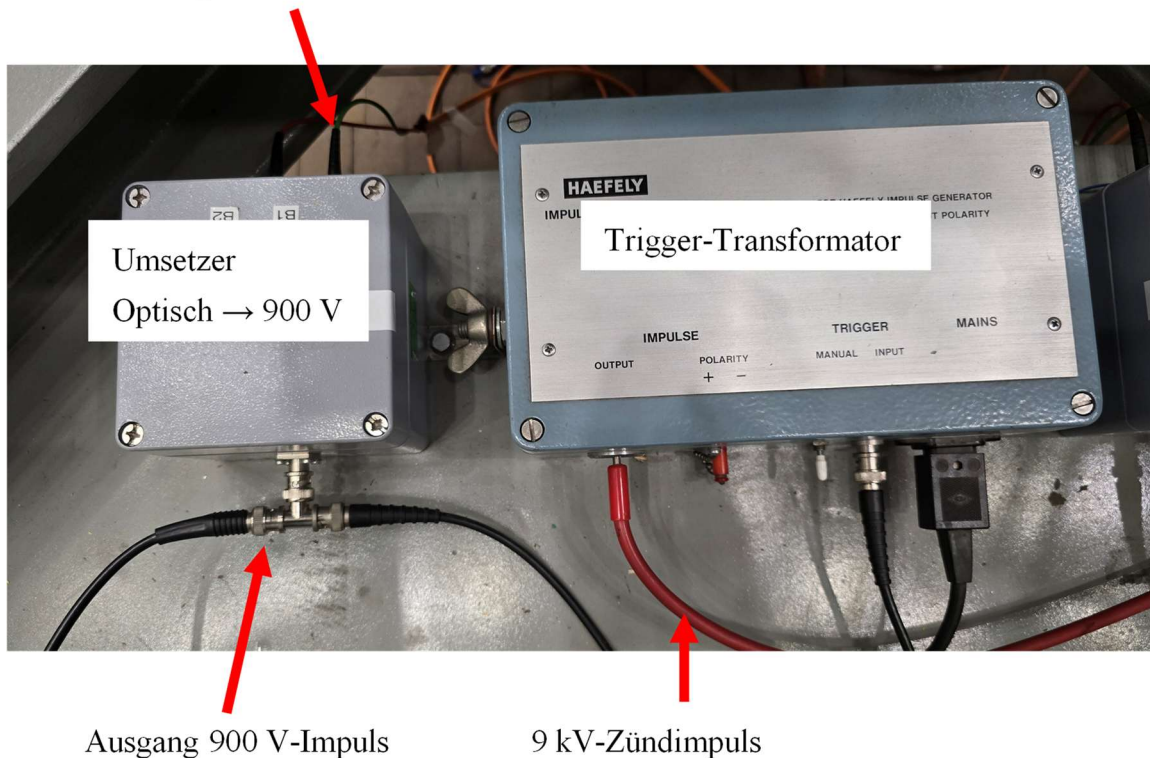


Bild 8.7 Umsetzer mit Trigger-Transformator

Bild 8.8 zeigt den Anschluss des Funkenstrecken-Schalters an dem Abgriff an der dritten Stufe des Marx-Generators. Zur Anbindung dient ein flexibles Kabel mit einem Kupfer-Querschnitt von 16 mm^2 (siehe Kapitel 6.3.1).

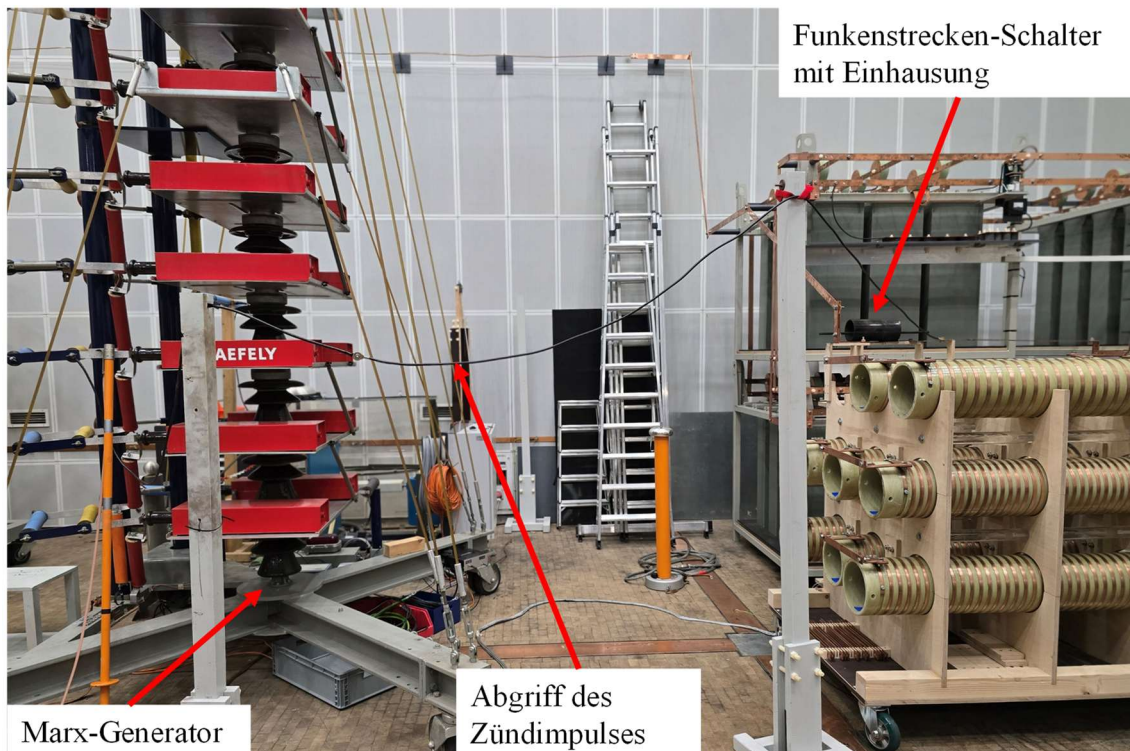


Bild 8.8 Anbindung des Marx-Generators an den Funkenstrecken-Schalter

8.3 Triggierung des Langzeitstrom-Generators bei Kombination mit dem Stoßstrom-Generator

Wird eine kombinierte Prüfung mit Stoßstrom und Langzeitstrom durchgeführt, wird in der gegenwärtigen Normung gefordert, dass der (energiereiche) Stoßstrom als erste Komponente wirksam ist, dem der Langzeitstrom als zweite Komponente unmittelbar nachfolgt. Dies bedeutet für die zeitliche Abfolge, dass zunächst der Stoßstrom-Generator ausgelöst und dann der Langzeitstrom-Generator hinzugeschaltet wird. Da der Stoßstrom unmittelbar in den Langzeitstrom übergeht, kann für das Hinzuschalten kein mechanischer Schalter aufgrund von dessen relativ hoher Schaltverzugszeit verwendet werden. In diesem Fall wird daher ausschließlich der Funkenstrecken-Schalter eingesetzt.

Wie aus Bild 8.9 hervorgeht, werden die Einspeisungen des Langzeitstroms und des Stoßstroms am Prüffeld zusammengeführt. Der Langzeitstrom-Generator liegt somit im selben Prüfkreis wie der Stoßstrom-Generator. Der Spannungsimpuls beim Auslösen des Stoßstrom-Generators wird daher automatisch an den Langzeitstrom-Generator weitergeleitet, so dass der Funkenstrecken-Schalter des Langzeitstrom-Generators zeitsynchron mitausgelöst wird. Dies ist der Grund, weshalb auf einen zusätzlichen externen Zündgenerator verzichtet werden kann.

Auch wenn somit der Stoßstrom-Generator und der Langzeitstrom-Generator nahezu gleichzeitig ausgelöst werden, beginnt der Langzeitstrom mehr oder weniger unbeeinflusst erst nach Abklingen des Stoßstroms zu fließen. Dies liegt daran, dass zum einen die Induktivität des Langzeitstrom-Generators den Stoßstrom abblockt. Zum anderen bewirkt diese Induktivität, dass der Stromfluss aus dem Langzeitstrom-Generator erst mit Verzögerung einsetzt, sodass ein merklicher Langzeitstrom erst nach Beendigung des Stoßstroms zum Fließen kommt.

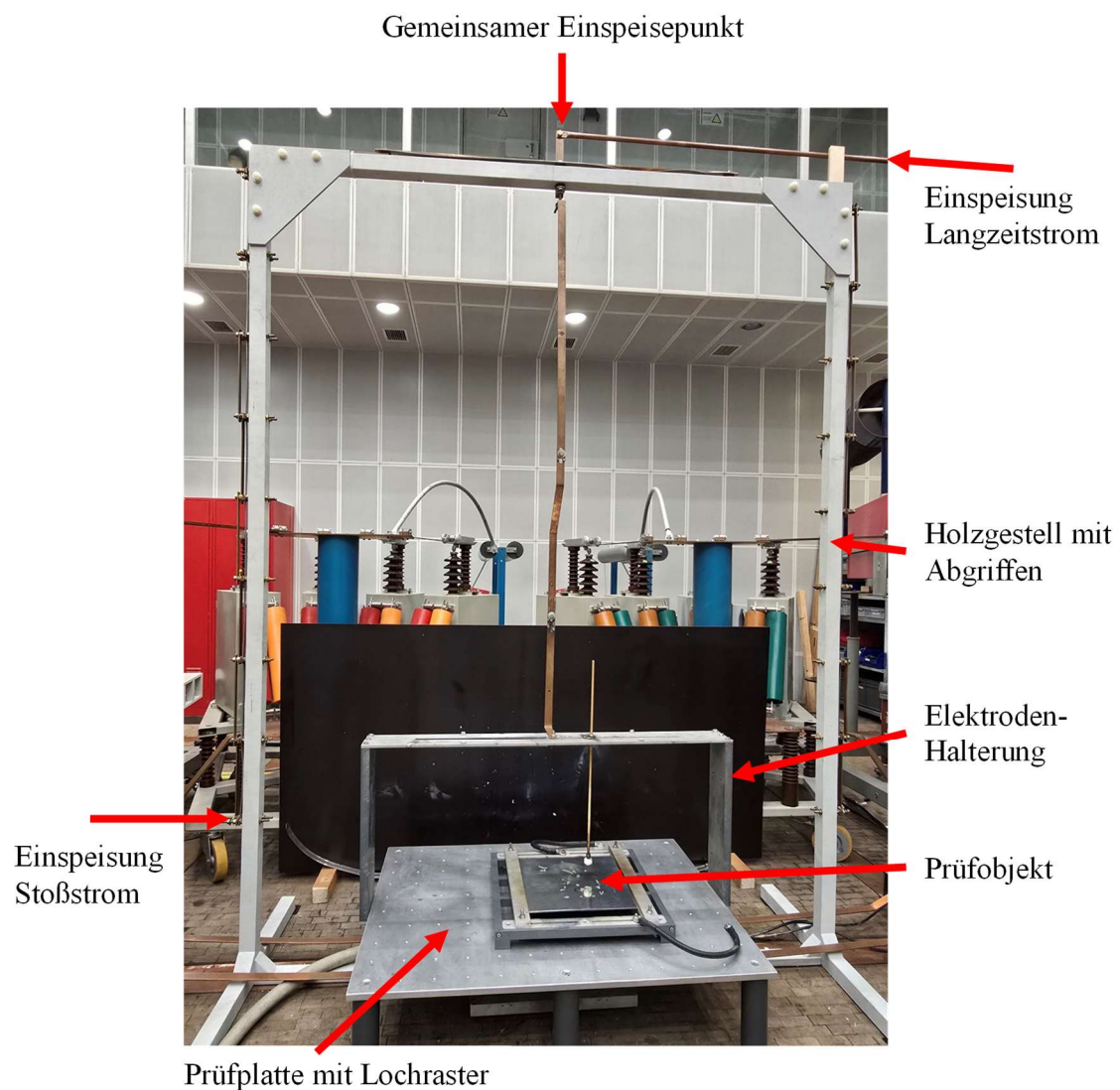


Bild 8.9 Prüfanordnung mit Anschlüssen an den Stoßstrom- und Langzeitstrom-Generator

Bild 8.10 verdeutlicht den Trigger-Vorgang, der analog zur Triggerung mit dem Marx-Generator erfolgt. Der Trigger-Vorgang beginnt damit, dass die Steuerung des Stoßstrom-Generators je einen Steuerimpuls an den Stoßstrom-Generator und an die SPS-Steuerung des Langzeitstrom-Generators ausgibt. Daraufhin wird der Stoßstrom-Generator ausgelöst, in Folge dessen der Funkenstrecken-Schalter geschlossen wird. Gleichzeitig startet eine Uhr in der SPS-Steuerung, worauf die Strom-formenden-Schalter sowie der Ausschalter den eingestellten Zeiten entsprechend ausgelöst werden.

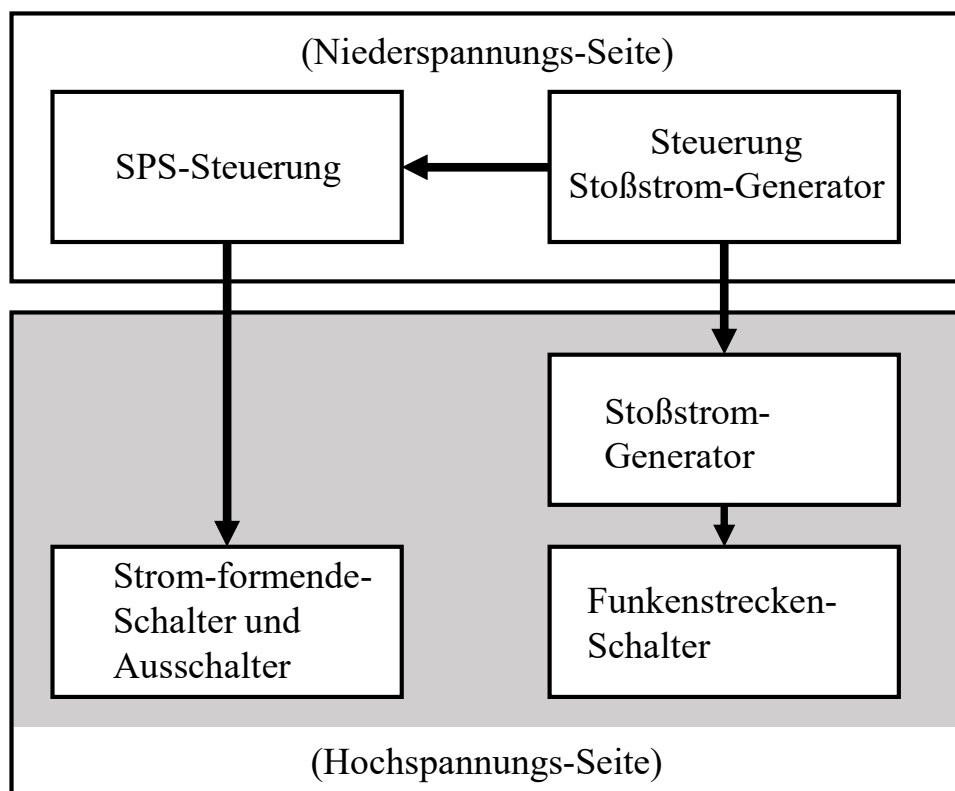


Bild 8.10 Auslösung des Langzeitstrom-Generators bei Kombination mit dem Stoßstrom-Generator

9. Steuerung und Sicherheitsmaßnahmen für den Langzeitstrom-Generator

Die Steuerung des Langzeitstrom-Generators einschließlich der entsprechenden Sicherheitseinrichtungen wurde schon teilweise in den Kapiteln 7 und 8 behandelt. Allerdings standen hierbei die Maßnahmen auf der Hochspannungs-Seite im Vordergrund. Im vorliegenden Kapitel werden nun die Maßnahmen auf der Niederspannungs-Seite beschrieben.

Bild 9.1 zeigt einen Überblick über die niederspannungsseitigen Komponenten der Steuerungs- und der Sicherheitseinrichtungen. Diese umfassen zum einen die Steuer-Einheit, mit welcher der Betrieb des Hochspannungs-Ladegeräts sowie die Auslösung der Systemschalter (Einschalter, Ausschalter und Strom-formende-Schalter) geregelt wird. Zum anderen betreffen sie die Erweiterung des Sicherheitskreises, um den Langzeitstrom-Generator sicher abzuschalten. Die Sicherheit ist hergestellt, wenn das Hochspannungs-Ladegerät (über den Interlock-Schalter) abgeschaltet ist und die Kondensatoren über die Sicherheitsschalter (Erdungsschalter, Zu-Schalter) entladen, kurzgeschlossen und geerdet sind.

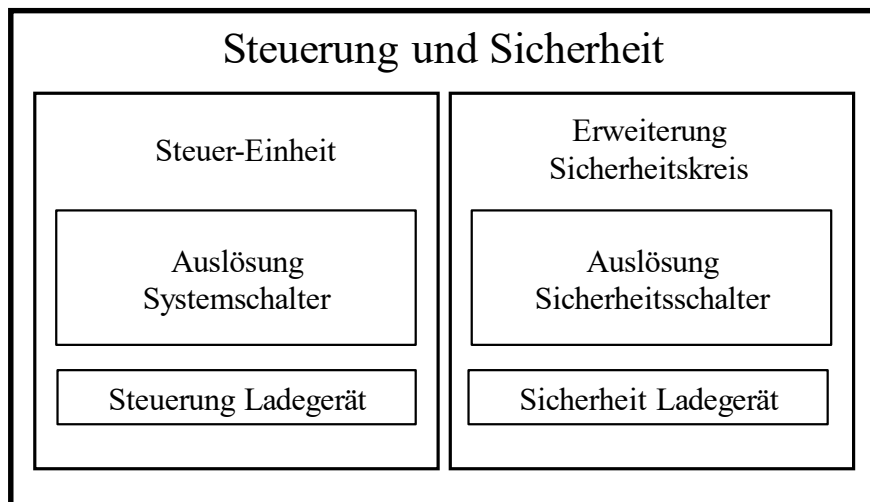


Bild 9.1 Überblick über die niederspannungsseitigen Maßnahmen für die Steuerung und die Sicherheit des Langzeitstrom-Generators

Hinsichtlich der geforderten Personensicherheit ist es sinnvoll, dass der Betriebszustand des Langzeitstrom-Generators durch eine einfache Sichtprüfung unmittelbar nachvollziehbar ist. Daher wurden sämtliche Komponenten für die Steuerung des Langzeitstrom-Generators einschließlich der Sicherheitseinrichtungen in einem einzigen 19“-Schaltschrank verbaut. Die Vorderseite des Schaltschranks ist in Bild 9.2 dargestellt.

Der Übersichtlichkeit halber sind zudem die einzelnen Komponenten ihrer Funktionalität entsprechend angeordnet. Im oberen Teil des Schaltschranks befinden sich die Komponenten zur Steuerung des Hochspannungs-Ladegeräts und zur Auslösung der Systemschalter. Im unteren Teil sind hingegen die Geräte zur Gewährleistung der Sicherheit installiert.



Bild 9.2 19“-Schaltschrank mit den Komponenten zur Steuerung des Hochspannungs-Ladegeräts und der Systemschalter und zur Gewährleistung der Sicherheit des Langzeitstrom-Generators

Um die Personensicherheit zu gewährleisten, wird eine spezielle Sicherheitsvorrichtung (siehe Bild 9.2) eingesetzt, die in den bestehenden Sicherheitskreis der Hochspannungshalle integriert ist. Der Sicherheitskreis basiert auf einer 24 V-Wechselspannungsleitung, die durch sämtliche Gitter des Trennzauns zwischen der Niederspannungs- und Hochspannungsseite durchgeschleift ist und alle Sicherheitskontakte für Türen und Erdungsstangen erfasst. Wird der Sicherheitskreis beispielsweise durch Öffnen einer Tür aufgetrennt, wird die 24 V-Wechselspannungsleitung unterbrochen mit der Folge, dass durch die damit verbundene Spannungslosigkeit der Leitung die Hochspannungshalle automatisch abgeschaltet wird, d.h. alle Hochspannungsgeräte werden ausgeschaltet und alle Hochspannungskondensatoren werden entladen, kurzgeschlossen und geerdet.

Die auf der Hochspannungs-Seite eingesetzten mechanischen Sicherheitsschalter benötigen für ihre Betätigung eine 230 V-Wechselspannung. Die benötigte Wechselspannung wird am Ausgang der Sicherheitsvorrichtung bereitgestellt. Voraussetzung ist allerdings, dass der Sicherheitskreis geschlossen ist. Ist der Sicherheitskreis hingegen unterbrochen, wird die 230 V-Wechselspannung automatisch abgeschaltet. Infolgedessen werden sämtliche Kondensatoren des Langzeitstrom-Generators geerdet und das Hochspannungs-Ladegerät wird abgeschaltet. Bild 9.3 zeigt das Ablaufdiagramm dieses Vorgangs.

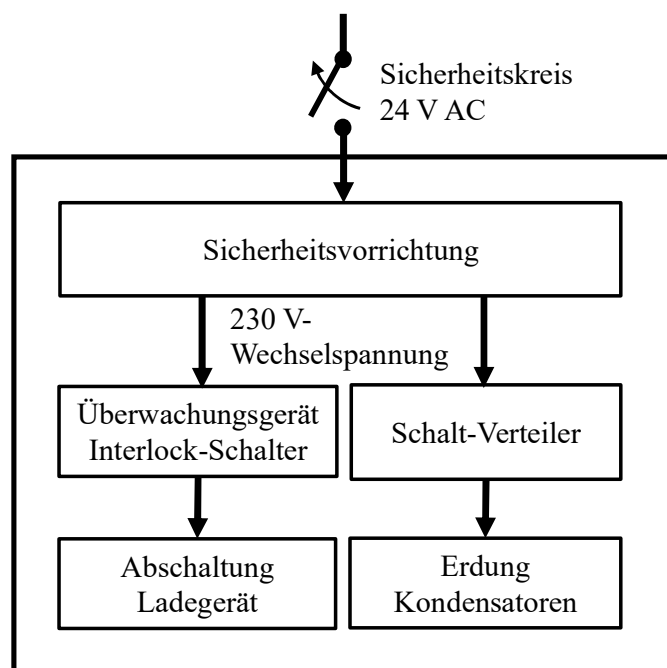


Bild 9.3 Ablaufdiagramm für die Erweiterung des Sicherheitskreises

Wie bereits in Kapitel 7 erwähnt, verfügt das Hochspannungs-Ladegerät als besondere Sicherheitsmaßnahme über einen sogenannten Interlock-Schalter. Der Interlock-Schalter ist normalerweise offen, und das Hochspannungs-Ladegerät ist in diesem Fall abgeschaltet. Um das Hochspannungs-Ladegerät anzuschalten, wird ein externes Überwachungsgerät eingesetzt. Das Überwachungsgerät schließt den Interlock-Schalter bei anliegender 230 V-Wechselspannung und öffnet ihn, sobald der Sicherheitskreis unterbrochen und dadurch die Wechselspannung abgeschaltet wird.

Auch die Erdung der Kondensatoren erfolgt nicht direkt über die Sicherheitsvorrichtung, sondern über einen dazwischengeschalteten Schalt-Verteiler. Der Schalt-Verteiler befindet sich auf der Hochspannungs-Seite unmittelbar neben den Kondensator-Modulen. Ist die 230 V-Wechselspannung abgeschaltet und der Schalt-Verteiler daher spannungslos, werden die Sicherheitsschalter automatisch geschlossen und die Kondensatoren entladen.

Die Sicherheitsvorrichtung und das Überwachungsgerät für den Interlock-Schalter sind in Bild 9.4 dargestellt. Die Schaltzustände werden durch Kontrollleuchten angezeigt. Am Überwachungsgerät des Interlock-Schalters zeigt das Leuchten der weißen Kontrollleuchte an, dass der Interlock-Schalter eingeschaltet ist und somit das Hochspannungs-Ladegerät betriebsbereit ist. An der Sicherheitsvorrichtung zeigt das Leuchten der roten Kontrollleuchte an, dass sie eingeschaltet ist. Leuchtet die grüne Kontrollleuchte, ist der Sicherheitskreis geschlossen (das 24 V-Wechselspannungssignal liegt an) und das Gerät ist betriebsbereit. Leuchtet die weiße Kontrollleuchte, ist die 230 V-Wechselspannung auf den Ausgang der Sicherheitsvorrichtung geschaltet.

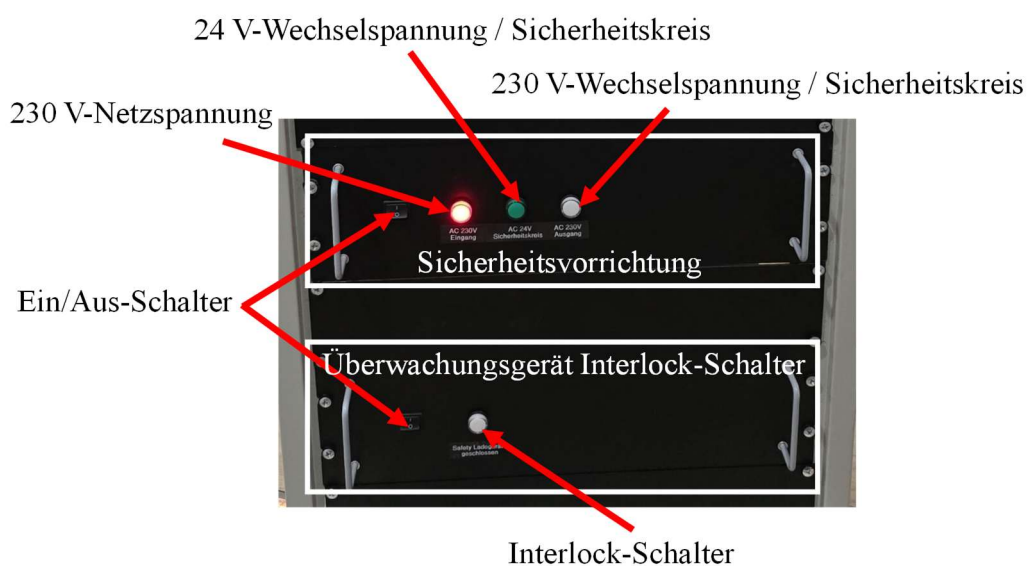


Bild 9.4 Sicherheitsvorrichtung und Überwachungsgerät des Interlock-Schalters

9.2 Steuerung des Langzeitstrom-Generators

9.2.1 Steuerung des Hochspannungs-Ladegeräts

Das Hochspannungs-Ladegerät verfügt über eine Fernsteuerung (Firma: FuG, Typ: Fernsteuereinheit für HCK 7500-2500 MOD SN: 23375-01), mit der über ein Bedienfeld die Ladespannung und der Ladestrom eingestellt sowie der Ladevorgang gestartet und beendet werden kann. Hierfür ist die Fernsteuerung über eine Lichtwellenleiter-Verbindung mit dem Hochspannungs-Ladegerät verbunden.

Am Bedienfeld ist zudem die tatsächliche am Ausgang des Hochspannungs-Ladegeräts herrschende Spannung ablesbar. Da geladene Kondensatoren eine besondere Personengefährdung darstellen, wird der Ladezustand der Kondensatoren aus Sicherheitsgründen durch ein zweites Gerät überwacht. Dazu wird die Spannung direkt an den Kondensatoren gemessen. Für diese Kontrollmessung wird ein Spannungsteiler mit dem Übersetzungsverhältnis 1 : 1000 (Firma: Hilo-Test, Typ: HVT 10 RC # 1404037) eingesetzt, der über ein 50 Ω -Koaxialkabel an ein Digital-Voltmeter angeschlossen ist (Firma: Schlumberger, Typ: Solatron 7055 Microprocessor Voltmeter). Bild 9.5 zeigt die Geräteanordnung mit dem Bedienfeld der Fernsteuerung im unteren Bildbereich und der Kontrollmessung durch das Digital-Voltmeter im oberen Bildbereich.

Kontroll-
Spannungsmessung

Fernsteuerung
Hochspannungs-
Ladegerät



Bild 9.5 Fernsteuerung des Ladegeräts und das darüber installierte Digital-Voltmeter für die Kontroll-Spannungsmessung

9.2.2 Steuerung der Systemschalter

Für das Ein- und Ausschalten des Langzeitstrom-Generators und bei Betätigung der Strom-formenden-Schalter ist es erforderlich, dass der Ablauf der Schalthandlungen zeitlich koordiniert erfolgt. Hierfür wird eine SPS-Steuerung verwendet, die in einem zeitlichen Raster von 10 ms die Schaltsignale an die Systemschalter (Strom-formende-Schalter, Ein- und Ausschalter) über den bereits erwähnten dazwischengeschalteten Schalt-Verteiler abgibt, in dem auch die Verbindungen zu den Sicherheitsschaltern realisiert sind. Welche Schalter zu welcher Zeit geschaltet werden, wird zuvor in einer „Systemschalter-Auswahl“ festgelegt.

Bild 9.6 zeigt das Ablaufdiagramm der zeitlichen Steuerung. Der Langzeitstrom-Generator wird angeschaltet durch einen Trigger-Impuls, der durch manuelle Betätigung eines Tasters oder durch einen externen elektrischen Impuls ausgelöst wird. Die manuelle Triggerung ist vorzuziehen, wenn der Langzeitstrom-Generator allein betrieben wird. Wird der Langzeitstrom-Generator allerdings zusammen mit dem Stoßstrom-Generator betrieben, lässt sich die zeitliche Synchronisation beider Generatoren in der Regel nur durch elektrische Triggerung erreichen. Wie bereits in Kapitel 8 erwähnt, wird hierfür der 900 V-Impuls am Marx-Generator abgegriffen. Der 900 V-Impuls wird dort in ein optisches Trigger-Signal gewandelt, das über eine Lichtwellenleitung zur SPS-Steuerung geführt wird. Dort wird es wiederum in ein elektrisches Trigger-Signal gewandelt, wozu ein der SPS-Steuerung vorgeschalteter Umsetzer benutzt wird.

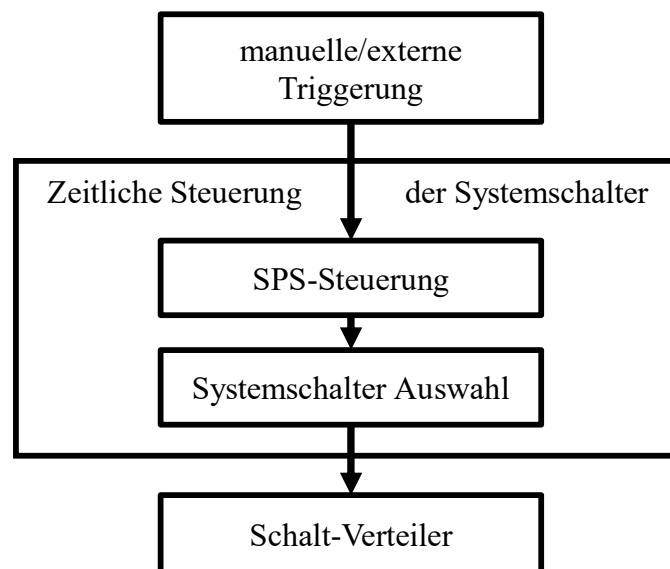


Bild 9.6 Ablaufdiagramm der zeitlichen Steuerung der Systemschalter

Bild 9.7 zeigt den Ablaufplan der SPS-Steuerung. Eine SPS-Steuerung ist eine Art Kleincomputer, der zur Steuerung eines Gerätes eingesetzt und auf digitaler Basis programmiert wird [93]. Die SPS-Steuerung wurde mithilfe zweier LOGO!-Systeme (Firma: Siemens, Typ: LOGO! 8.3) realisiert. Jedes LOGO!-System besteht aus einem LOGO!-Netzteil, einer LOGO!-Steuerung und einem LOGO!-Display.

Jedes LOGO!-System verfügt über vier Kanäle mit je einem Ausgang, über den jeweils ein Schalter im Hochspannungsfeld betätigt werden kann. Um die Schaltvorgänge der vier Strom-formenden-Schalter sowie den Einschalter und den Ausschalter steuern zu können, werden allerdings sechs Kanäle benötigt. Daher wurde die SPS-Steuerung mit zwei LOGO!-Systemen realisiert, die zeitgleich getriggert werden. Somit stehen insgesamt acht Kanäle zur Verfügung, wobei zwei Kanäle als Reserve dienen. Wie aus Bild 9.7 entnommen werden kann, steuert das erste LOGO-System (LOGO!-1) die Ausgänge 1 bis 4 und das zweite LOGO!-System (LOGO!-2) die Ausgänge 5 bis 8. Gleichwohl kann jedes LOGO!-System auch allein betrieben werden. Fällt ein LOGO!-System aus, stehen somit immer noch vier Kanäle zur Verfügung.

Mit den LOGO!-Systemen wird letztendlich nur die 230 V-Wechselspannung, die am Kanaleingang anliegt, über ein Relais auf den Ausgang geschaltet. Über das LOGO!-Display wird hierbei die Schaltzeit für die einzelnen Schalter eingestellt. Aufgrund einer programmtechnischen Eigenart der LOGO!-Steuerung werden spätestens nach Ablauf einer festgelegten Zeitspanne immer alle Kanäle geschaltet, auch diejenigen, die nicht benötigt werden. Um diese nicht benötigten Kanäle auszublenden, wird das in Bild 9.6 dargestellte Gerät mit der Bezeichnung „Systemschalter Auswahl“ eingesetzt. Dieses Gerät dient lediglich dazu, die Schaltsignale der nicht benötigten Kanäle abzublocken.

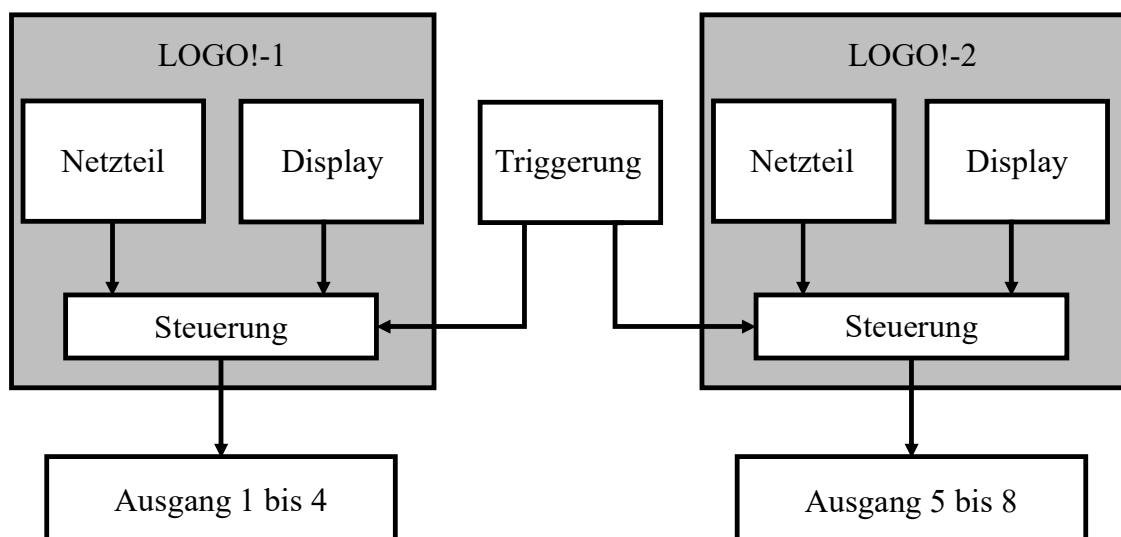


Bild 9.7 Ablaufplan der SPS-Steuerung mit zwei LOGO!-Systemen

Bild 9.8 zeigt die Verkabelung der SPS-Steuerung, die in einem 19“-Gehäuse eingebaut ist. Um die beiden LOGO!-Systeme möglichst autark betreiben zu können, werden die Systeme über getrennte 230 V-Stromleitungen versorgt. Aus dem gleichen Grund sind die beiden LOGO!-Systeme im 19“-Gehäuse räumlich voneinander getrennt eingebaut.

Auf der linken Seite befindet sich die LOGO!-1 mit der Steuerung (1), dem Netzteil (2), dem Display (3) und einer Adapterschaltung für das elektrische Trigger-Signal (4). Entsprechend befindet sich auf der rechten Seite die LOGO!-2 mit der Steuerung (5), dem Netzteil (6), dem Display (7) und einer Adapterschaltung für das elektrische Trigger-Signal (8). Die LOGO!-1 steuert die ersten vier Ausgänge (9) auf der linken Seite und die LOGO!-2 steuert die übrigen vier Ausgänge (10) auf der rechten Seite. Der detaillierte Stromlaufplan der SPS-Steuerung ist in Bild 9.9 dargestellt.

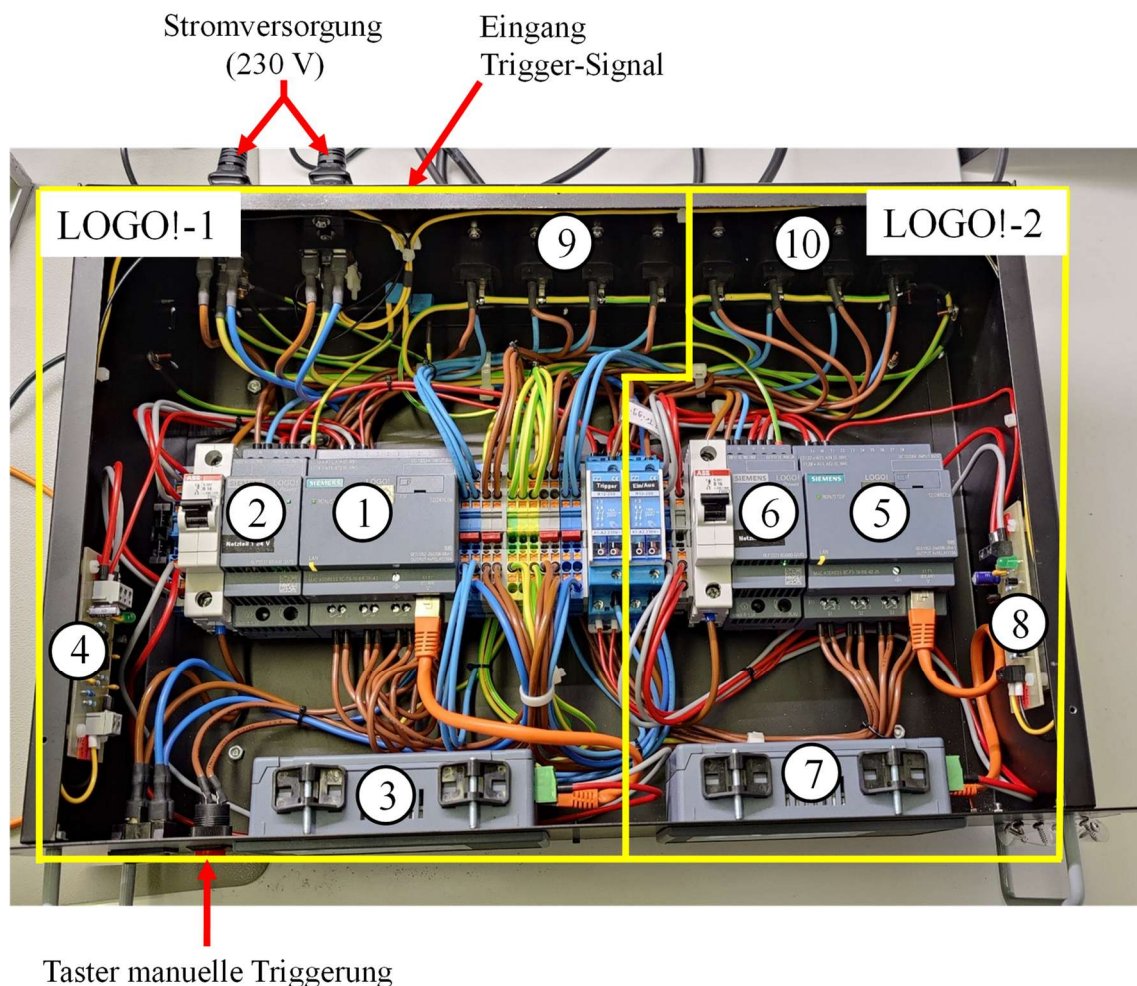


Bild 9.8 Aufbau der SPS-Steuerung

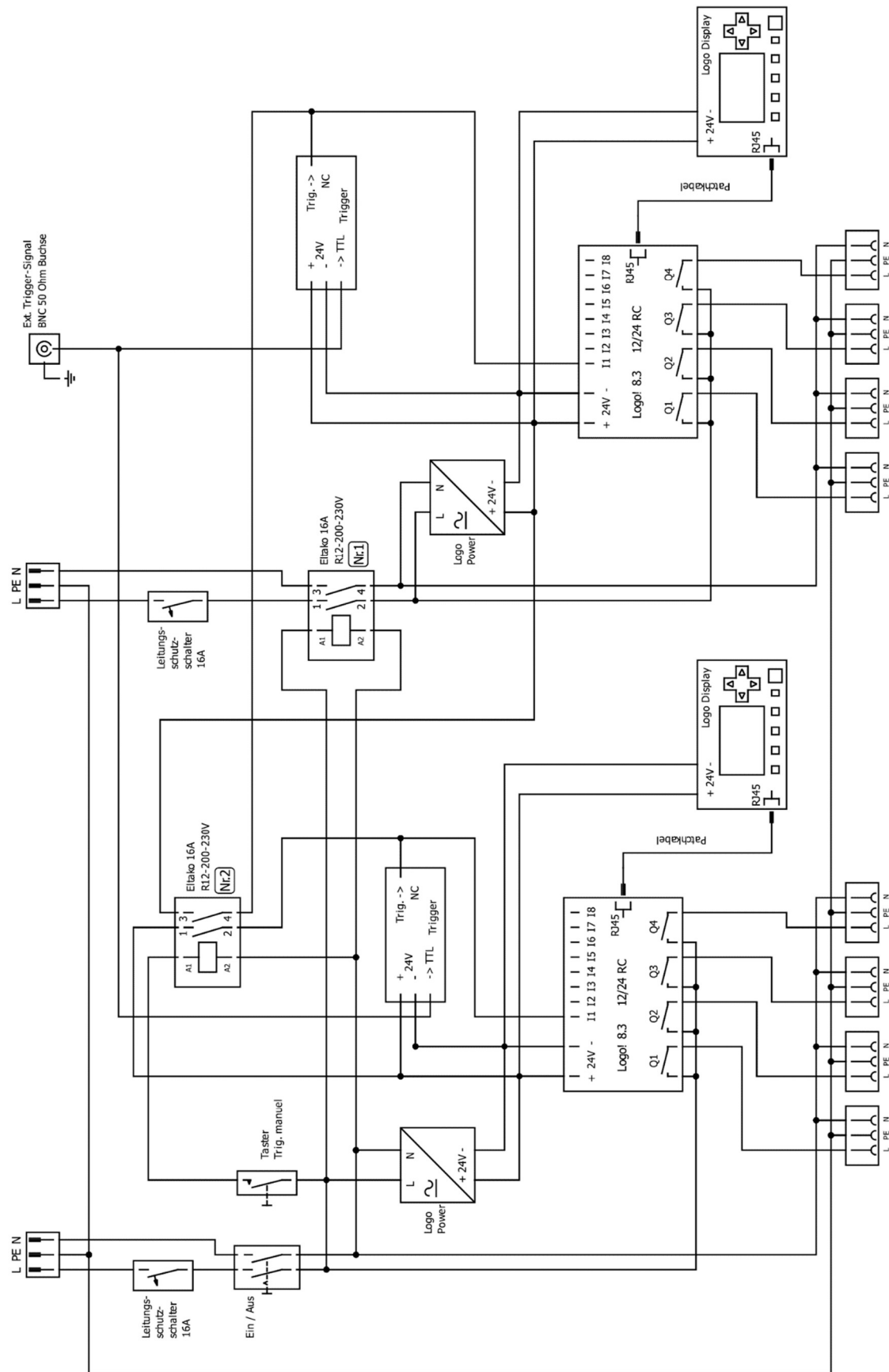


Bild 9.9 Stromlaufplan SPS-Steuerung

Bild 9.10 zeigt die Frontansicht der im 19“-Schaltschrank installierten SPS-Steuerung. Zu erkennen sind die beiden LOGO!-Displays sowie ein roter Taster für die manuelle Triggerung.

Im darunter befindlichen Gerät „Systemschalter Auswahl“ werden die Kanäle der SPS-Steuerung mithilfe von Kippschaltern ausgewählt. Die über jedem Kippschalter befindliche Kontrollleuchte zeigt an, welcher Kanal aktiv ist. Im vorliegenden Fall sind es die vier linken Kanäle, d.h. die daran angeschlossenen Systemschalter werden von der linken LOGO!-1 geschaltet. Da die vier rechten, von der LOGO!-2 angesteuerten Kanäle nicht aktiviert sind, werden die daran angeschlossenen Systemschalter nicht betätigt.

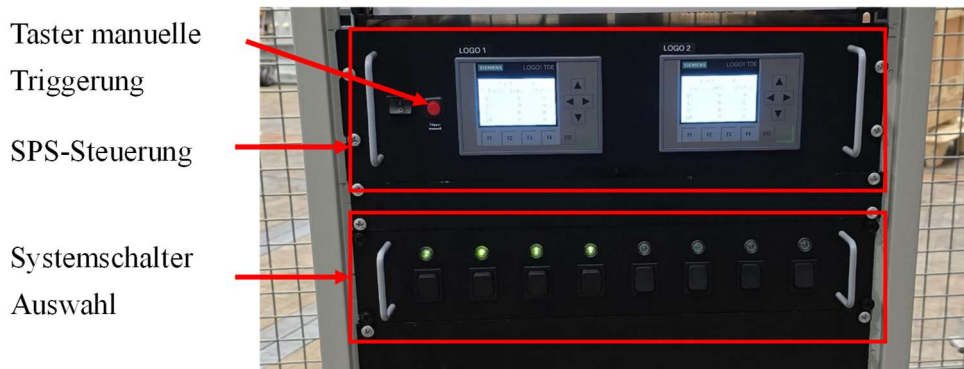


Bild 9.10 Im Schaltschrank installierte SPS-Steuerung mit dem darunter befindlichen Gerät „Systemschalter Auswahl“

9.3 Verkabelung und Schirmung

Die im 19“-Schaltschrank installierten Geräte sind mit den hochspannungstechnischen Geräten über zahlreiche Leitungen verbunden. Zum Schutz gegenüber elektromagnetischen Störungen wurden sie – so weit wie möglich – in geschirmten Kabelkanälen, die im Hallenboden eingelassen sind, verlegt. Um die Leitungen aus dem Kabelkanal wieder emporführen zu können, sind die Kabelkanäle in regelmäßigen Abständen mit Öffnungen versehen. Bild 9.11a zeigt ein Beispiel, wobei die Öffnung mit einem Metallrost abgedeckt ist. Um die Leitungen, die sich nicht in diesen Kabelkanälen verlegen ließen, vor mechanischen Beschädigungen zu schützen, wurden Kabelbrücken auf dem Hallenboden verlegt. Bild 9.11b zeigt eine solche Kabelbrücke (Firma: Walther Werke), die mit bis zu 9 t belastbar ist.



Bild 9.11 Schutz der Kabel durch Führung (a) in einem geschirmten, im Hallenboden eingelassenen Kabelkanal, (b) in einer Kabelbrücke am Hallenboden

Bild 9.12 zeigt den Schalt-Verteiler, in dem die von der Niederspannungs-Seite kommenden Leitungen zusammengeführt sind. Dies betrifft sowohl die sicherheitstechnischen Leitungen als auch die von der SPS-Steuerung kommenden Leitungen. Vom Schalt-Verteiler aus werden die Leitungen zu den entsprechenden Schaltern geführt. Bei den Leitungen von der SPS-Steuerung hat sich im Betrieb gezeigt, dass durch elektrische Einkopplungen Störsignale entstehen können, die zum unkontrollierten Auslösen der Schalter führen. Um dies zu verhindern, wurde zwischen Phase und Neutraleiter jeder Verbindung ein Kondensator (EPCOS - TDK Electronics B32024A3154M000) als Filterelement eingebaut.

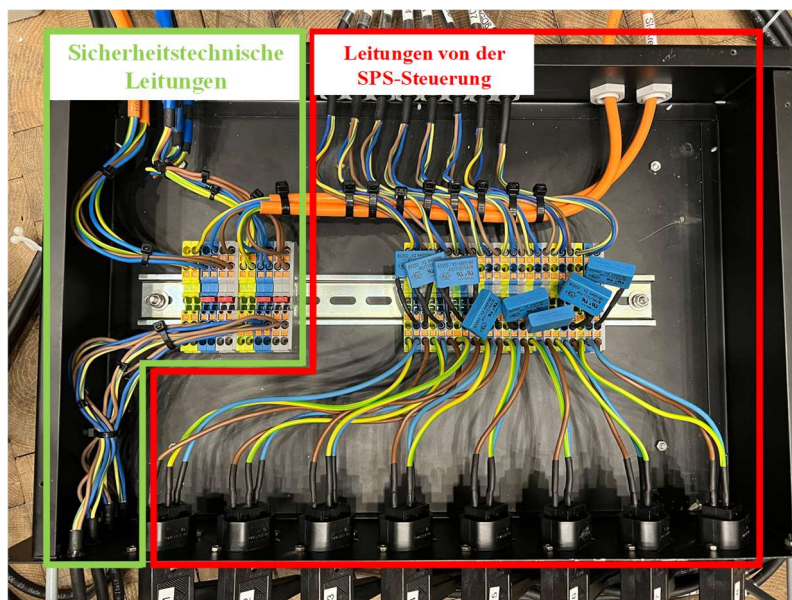


Bild 9.12 Schalt-Verteiler, unterteilt in einen Bereich für die sicherheitstechnischen Leitungen und einen Bereich für die Leitungen von der SPS-Steuerung

10. Messsystem und Prüfaufbau

Stoßströme dauern in der Regel weniger als 2 ms, weisen sehr schnelle Stromanstiege im Mikrosekunden-Bereich auf und haben ein sehr hohes Maximum bis über 200 kA. Langzeitströme dauern hingegen wesentlich länger (bis etwa eine Sekunde), weisen relativ langsame Stromanstiege im Millisekunden-Bereich auf und haben wesentlich niedrigere Stromwerte von typischerweise einigen 100 A. Ein weiterer Unterschied ist, dass Langzeitströme wesentlich höhere Ladungen mit sich führen können (bis einige 100 C), während die Ladung bei Stoßströmen nur sehr selten den Wert von 100 C erreicht [86].

Für Langzeitströme und Stoßströme werden daher konträre Anforderungen an die Messsysteme gestellt. Um diese Anforderungen zu erfüllen, werden zwei unterschiedliche Stromsensoren verwendet: Ein $40\ \mu\Omega$ -Messwiderstand (Firma: HiloTest, Typ: WSM 1500, Bandbreite: DC-200 kHz) wird zur Messung der Langzeitströme und ein Strommonitor (Typ: Pearson, Model: 2093, Bandbreite: 0,15 Hz - 200 kHz) wird zur Messung der Stoßströme verwendet.

Mit dem Messwiderstand können Langzeitströme bis 60 kA bei einer spezifischen Energie (Stromquadrat-Impuls) bis zu $100\ \text{MJ}/\Omega$ gemessen werden. Mit dem Strommonitor lassen sich hingegen wesentlich höhere impulsförmige Ströme bis zu 500 kA erfassen. Hierbei wirkt der Strommonitor wie ein $1\ \text{m}\Omega$ -Stromshunt, d.h. durch einen Strom von beispielsweise 1 kA wird eine Messspannung am Ausgang des Strommonitors von 1 V ($= 1\ \text{kA} \cdot 1\ \text{m}\Omega$) erzeugt.

Die Stromsensoren sind in dem jeweiligen Prüfkreis des Langzeitstrom-Generators bzw. des Stoßstrom-Generators integriert. Von den Stromsensoren werden die Messsignale über Messleitungen zu einer geschirmten Kabine geführt, wo sie mit zwei Kanälen eines Digitaloszilloskops aufgezeichnet werden. Ein angeschlossener Rechner dient zur Aufbereitung, Auswertung und Speicherung der aufgenommenen Messdaten.

Prüfobjekte lassen sich mit dem Stoßstrom, dem Langzeitstrom oder einer Kombination aus beiden prüfen. Dazu sind die Ausgänge des Stoßstrom- und Langzeitstrom-Generators an einem gemeinsamen Prüffeld (siehe Kapitel 8, Bild 8.9) zusammengeführt.

Bild 10.1 zeigt den Ablauf der Messwerterfassung. Die Stromsensoren befinden sich auf der Hochspannungs-Seite und übertragen das Messsignal (gestrichelte Linie) über Messleitungen zu einem vierkanaligen Digitaloszilloskop (Firma: HighVolt, Typ: Mias) auf der Niederspannungs-Seite. Zur Vermeidung störender Einkopplungen befindet sich das Digitaloszilloskop in einer allseitig geschlossenen und geschirmten Messkabine. Der Langzeitstrom wird mit Kanal 1 und der Stoßstrom mit Kanal 2 aufgezeichnet, während die beiden restlichen Kanäle 3 und 4 für ergänzende Messungen zur Verfügung stehen.

Um Mantelströme auf den koaxialen Messleitungen und dadurch verursachte Fehlmessungen zu vermeiden, erfolgt die Strommessung potentialgetrennt. Bei der Stoßstrom-Messung ist die Potentialtrennung durch den Strommonitor intrinsisch gegeben. Für den Langzeitstrom wird zur galvanischen Trennung ein optisches (LWL) Lichtwellenleiter-System vom Typ ISOBE 5600t (Frequenzbereich: DC bis 20 MHz, Messbereich: ± 100 mV bis ± 50 V) verwendet. Der Sender des LWL-Systems ist unmittelbar neben dem Messwiderstand eingebaut und mit diesem über eine kurze koaxiale 50 Ω -Messleitung verbunden.

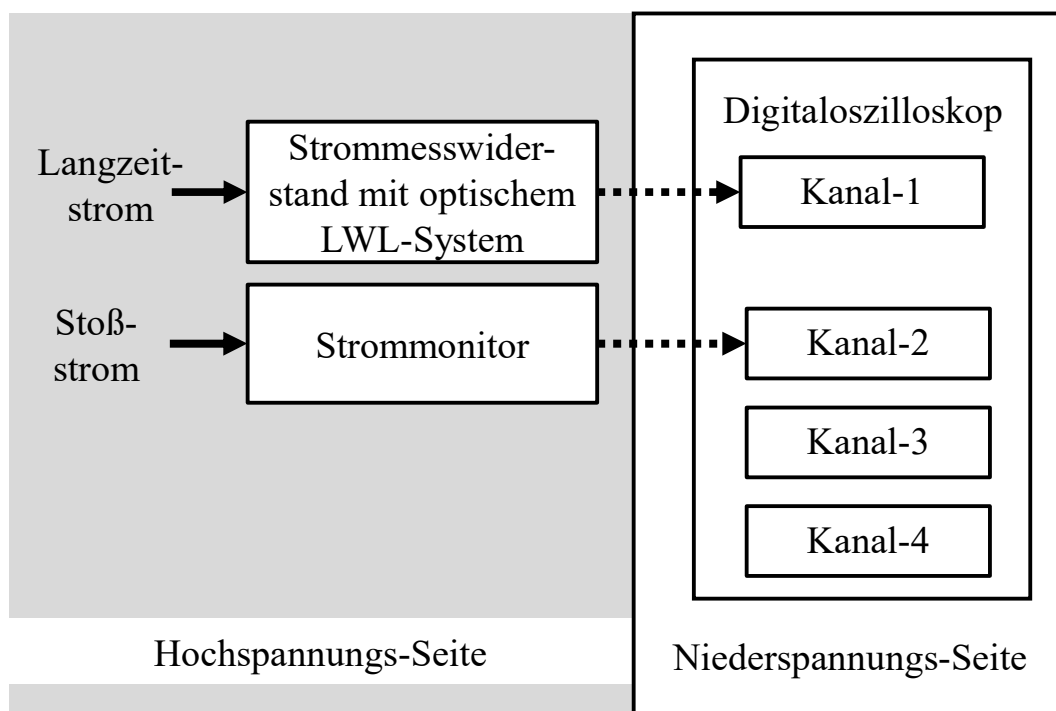


Bild 10.1 Messwerterfassung von Langzeit- und Stoßströmen mithilfe eines vierkanaligen Digitaloszilloskops

Bei Verwendung von Messwiderständen wird der Strom normalerweise am Übergang zum Erdungspunkt gemessen. Dies ist allerdings nicht bei dem $40\ \mu\Omega$ -Messwiderstand des Langzeitstrom-Generators möglich, da dieser aus Gründen der redundanten Sicherheitsvorkehrungen über mehrere Erdungspunkte verfügt. Daher wird der Langzeitstrom nicht am erdseitigen Ausgang, sondern am hochspannungsseitigen Ausgang des Generators gemessen. Aus diesem Grund ist eine potentialgetrennte Messung erforderlich.

Der Langzeitstrom kann durch entsprechende Modifikation der Anschlüsse alternativ an zwei verschiedenen Positionen auf der Hochspannungsseite gemessen werden. Bild 10.2 zeigt das Ersatzschaltbild. Wird der Langzeitstrom durch den Schalter $S_{L-Zünd}$ eingeschaltet, fließt der Strom über den Widerstand des Langzeitstrom-Generators R_L . Ein vor dem Widerstand an der Position 1 angebrachter Messwiderstand erfasst daher den gesamten vom Generator abgegebenen Langzeitstrom.

Der nach dem Widerstand R_L eingebrachte Ausschalter S_{L-P} dient dazu, den Generator kurzzuschließen und auf diese Weise den über das Prüfobjekt fließenden Langzeitstrom abzuschalten. Wird der Messwiderstand nach diesem Schalter an der Position 2 eingebaut, wird nicht der gesamte Langzeitstrom, sondern lediglich der über das Prüfobjekt fließende Anteil gemessen.

Bild 10.3 zeigt den Einbau des Messwiderstandes für diesen Fall (an Position 2), wobei der Messwiderstand zwischen den Anschlusspunkten 3 und 4 eingebracht ist. Wird der Messwiderstand durch Änderung der Anschlüsse zwischen den Anschlusspunkten 1 und 2 eingebaut, entspricht dies der Position 1, d.h. der gesamte aus dem Langzeitstrom-Generator fließende Strom wird erfasst.

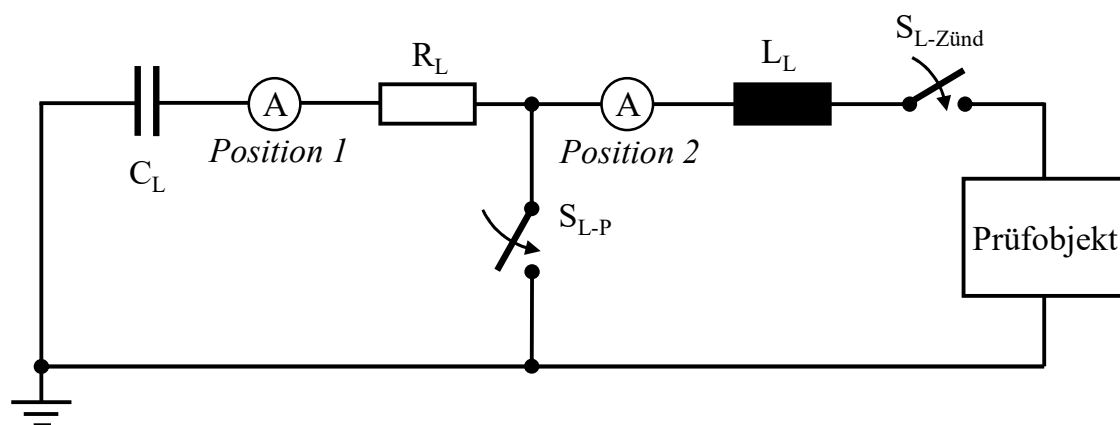


Bild 10.2 Ersatzschaltbild des Langzeitstrom-Generators mit zwei verschiedenen Positionen für den Einbau des Messwiderstands

Der Messwiderstand wurde auf der Widerstandskaskade, oberhalb der Widerstandstürme eingebaut (siehe Bild 10.3). Er ist durch eine kurze koaxiale Messleitung mit dem Sender des LWL-Systems verbunden. Da der Messwiderstand eine obere Grenzfrequenz von lediglich 200 kHz hat, werden keine besonderen Anforderungen an die Messleitung gestellt, weswegen eine einfache koaxiale Messleitung (mit BNC-Stecker) des Typs RG-58 verwendet wird. Um die Messleitung vor Störungen zu schützen, ist sie mit einer zusätzlichen äußeren Schirmung versehen. Aus dem gleichen Grund ist der Sender in einer Einhausung aus Aluminium mit 8 mm dicken Wänden eingebaut. Bild 10.3 zeigt die Einhausung mit dem darin befindlichen Sender bei geöffnetem Deckel. Zu erkennen ist auch die Entladeschiene, die zum Erdungspunkt herausgeführt wurde, um dort die Erdungsstange einzuhängen.

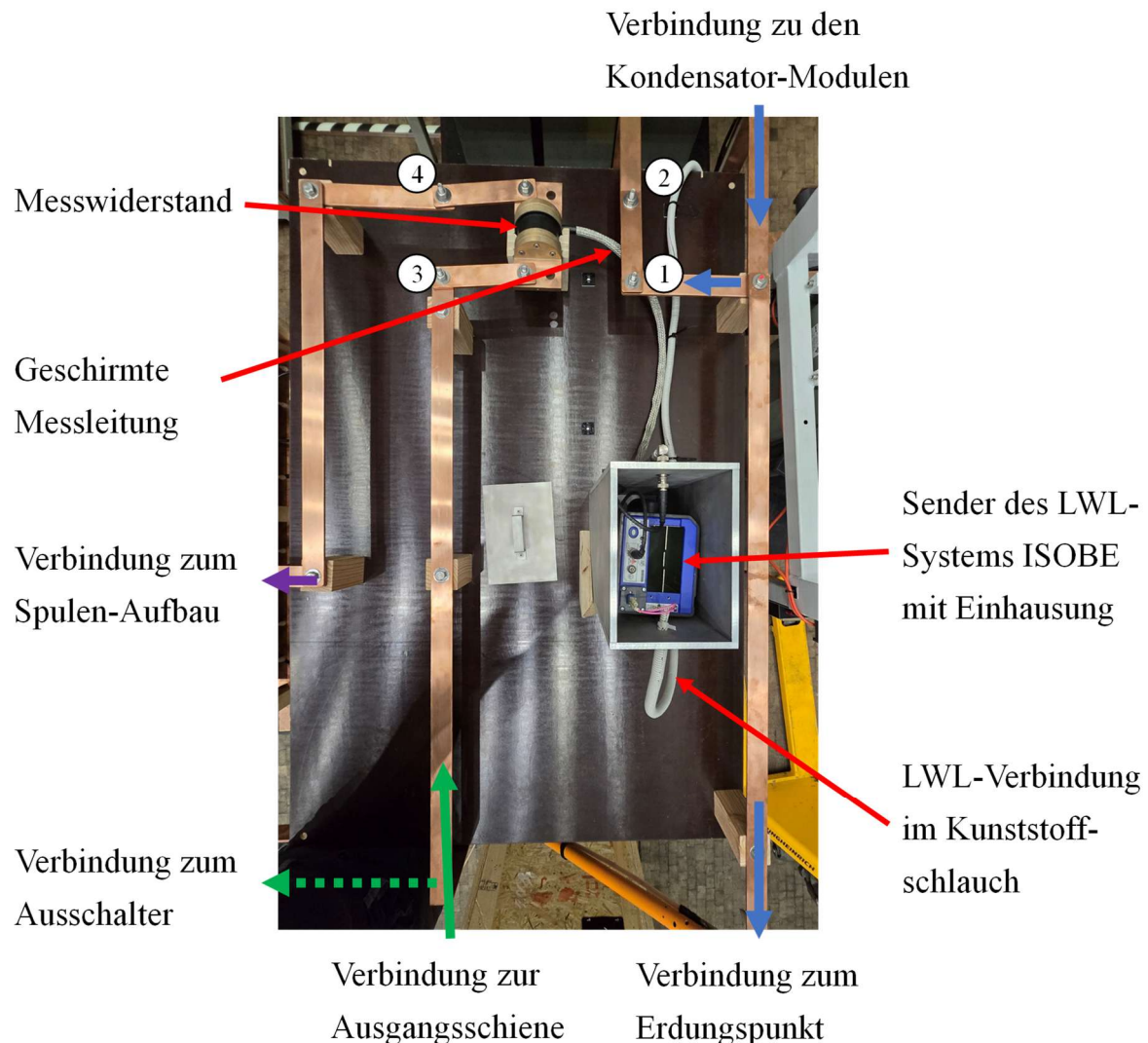


Bild 10.3 Einbau des Messwiderstandes mit Verbindung zum LWL-System vom Typ ISOBE

Das LWL-System ISOBE ist ein akkubetriebenes Sender-/Empfänger-System, welches die galvanische Potentialtrennung gewährleistet. Am Sender wird das elektrische Messsignal zunächst in ein optisches Lichtsignal gewandelt, das dann über einen Lichtwellenleiter zum Empfänger übertragen wird, wo es wieder in ein elektrisches Signal zurückgewandelt wird. Während der Sender neben dem Messwiderstand auf der Hochspannungs-Seite eingebaut ist, befindet sich der Empfänger in der geschirmten Messkabine auf der Niederspannungs-Seite. Zum Schutz vor Beschädigungen ist der Lichtwellenleiter zwischen Sender und Empfänger weitestgehend in Kabelkanälen im Hallenboden verlegt. Wo dies nicht möglich war, wurde der Lichtwellenleiter in einem Kunststoffschlauch als mechanischer Schutz verlegt.

Bild 10.4 zeigt das Innere der geschirmten Messkabine mit den wesentlichen Messeinrichtungen. Diese sind das Mias-System und der Empfänger des optischen LWL-Systems. Das Mias-System ist ein kombiniertes System, das zum einen ein Digitaloszilloskop (mit vier Kanälen) beinhaltet, zum anderen aber über eine Recheneinheit zur Datenerfassung, Datenauswertung und Datenspeicherung verfügt. Durch einen angeschlossenen Monitor können die aufgenommenen Messkurven dargestellt werden. Die maximale Abtastrate des Oszilloskops beträgt 1 GS/s (GS: Giga-Sample) bei einer Speichertiefe von maximal 4 MS (MS: Mega-Sample) pro Kanal, also 4 Millionen Messpunkte pro Kanal.

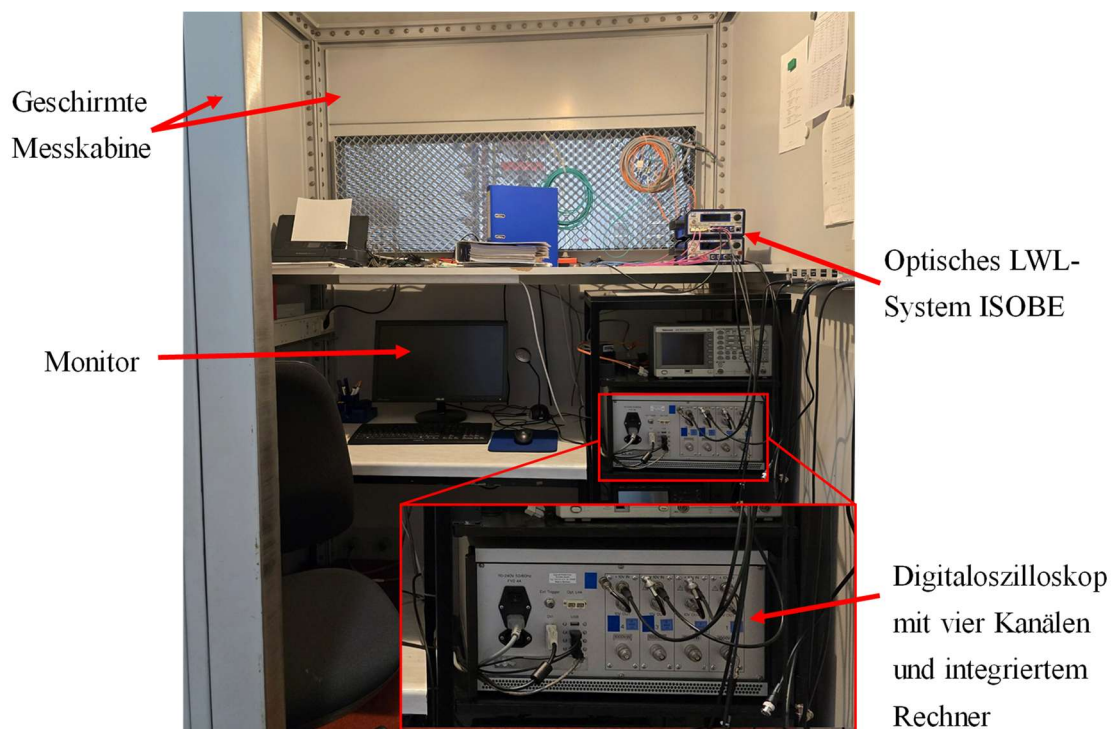


Bild 10.4 Geschirmte Messkabine mit Mias-System und LWL-System

10.2 Verbindung zwischen Langzeitstrom-Generator und Prüffeld

Der Langzeitstrom-Generator ist mit dem Prüffeld über eine Kupferleitung aus Runddraht mit einem Leiterquerschnitt von 50 mm^2 verbunden. Die Kupferleitung wurde entlang der Schirmwand der Hochspannungshalle in einer Höhe von 4 m verlegt. Bild 10.5 zeigt die Kupferleitung am Übergang zum Prüffeld.

Als Isolatoren dienen Wandhalterungen aus 25 cm langen PVC-Stangen, die für eine Isolationsspannung von 140 kV ausgelegt sind. Diese PVC-Isolatoren sind auf einer PVC-Grundplatte befestigt, die wiederum über vier Schraubverbindungen an der Hallenwand befestigt ist.

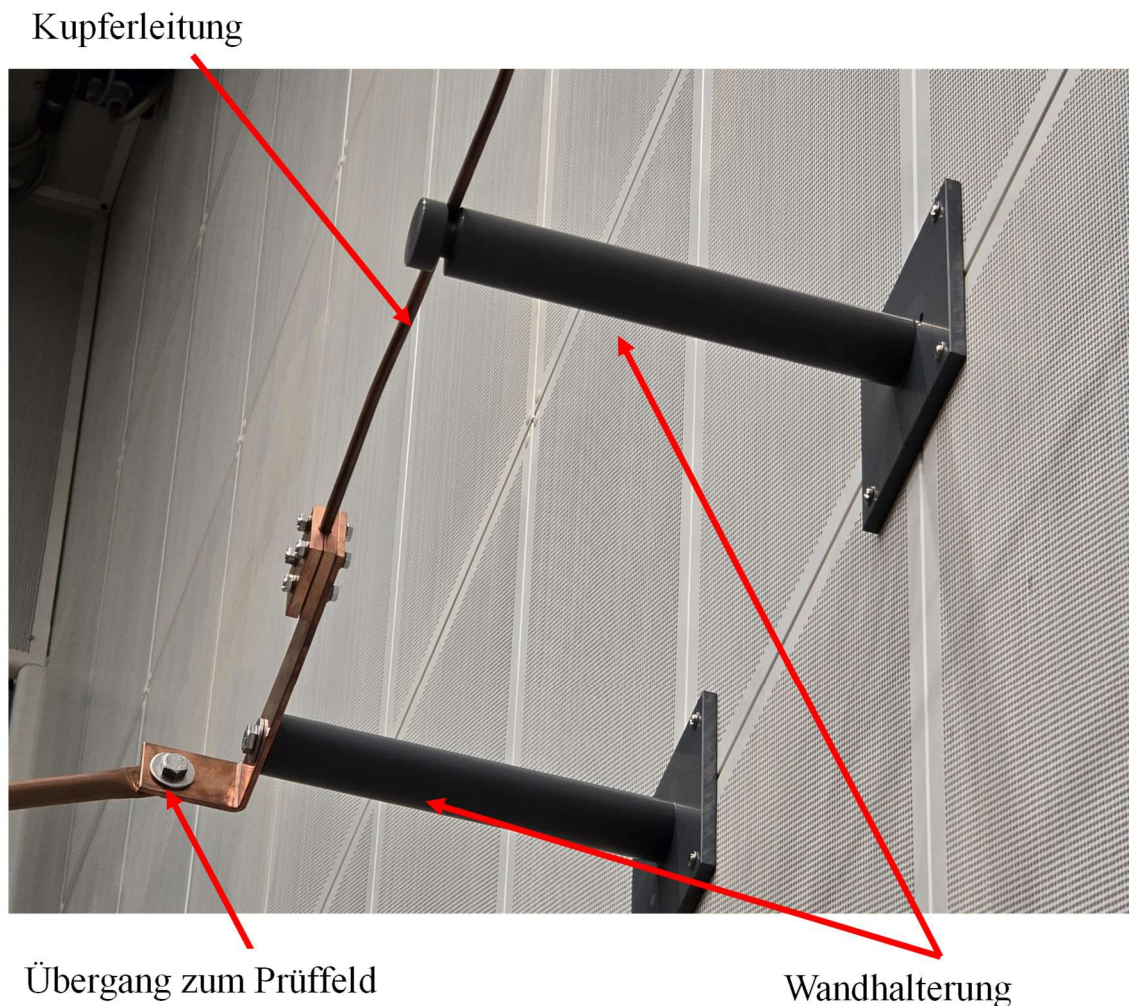


Bild 10.5 Verbindung vom Langzeitstrom-Generator zum Prüffeld mithilfe einer an der Wand der Hochspannungshalle angebrachten Kupferleitung

10.3 Aufbau des Prüffeldes

Bild 10.6 zeigt das Prüffeld. Die Basis bildet eine Prüfplatte aus 2 cm dickem Aluminium, auf der das Prüfobjekt installiert ist. Zur leichteren Kontaktierung des Prüfobjekts ist die Prüfplatte mit M10-Gewindelöchern im Rastermaß von 10 cm x 10 cm ausgestattet. Unterhalb der Platte ist der Strommonitor (Typ: Pearson, Model: 2093) zur Messung der Stoßströme angebracht. Dazu ist ein metallener Verbindungsstab (Durchführung Strommonitor), der die Prüfplatte mit der Erdung über einen geerdeten Metallrahmen verbindet, durch das Mittenloch des Strommonitors geführt (siehe Anhang C, Bild C.3).

Wie in Kapitel 8 bereits dargestellt ist, erfolgt die Einspeisung des Prüfstroms (Stoß- und Langzeitstrom) über einen gemeinsamen Einspeisepunkt etwa 2,5 m oberhalb der Prüfplatte. Diese Höhe erlaubt zwar die Prüfung von entsprechend hohen Objekten, in der Regel sind die Prüfobjekte jedoch wesentlich kleiner. Für die Prüfung dieser kleineren Objekte wird das Prüfvolumen verkleinert, wozu die Elektrodenhalterung in Bild 10.6 dient. Die Elektrodenhalterung ist einerseits mit der Stromeinspeisung (in 2,5 m Höhe) über eine Kupferschiene verbunden. Andererseits ist an der Elektrodenhalterung die (indirekte) Hochspannungs-Elektrode befestigt, über die der Prüfstrom (mithilfe eines Zünddrahts) in das Prüfobjekt eingespeist wird.

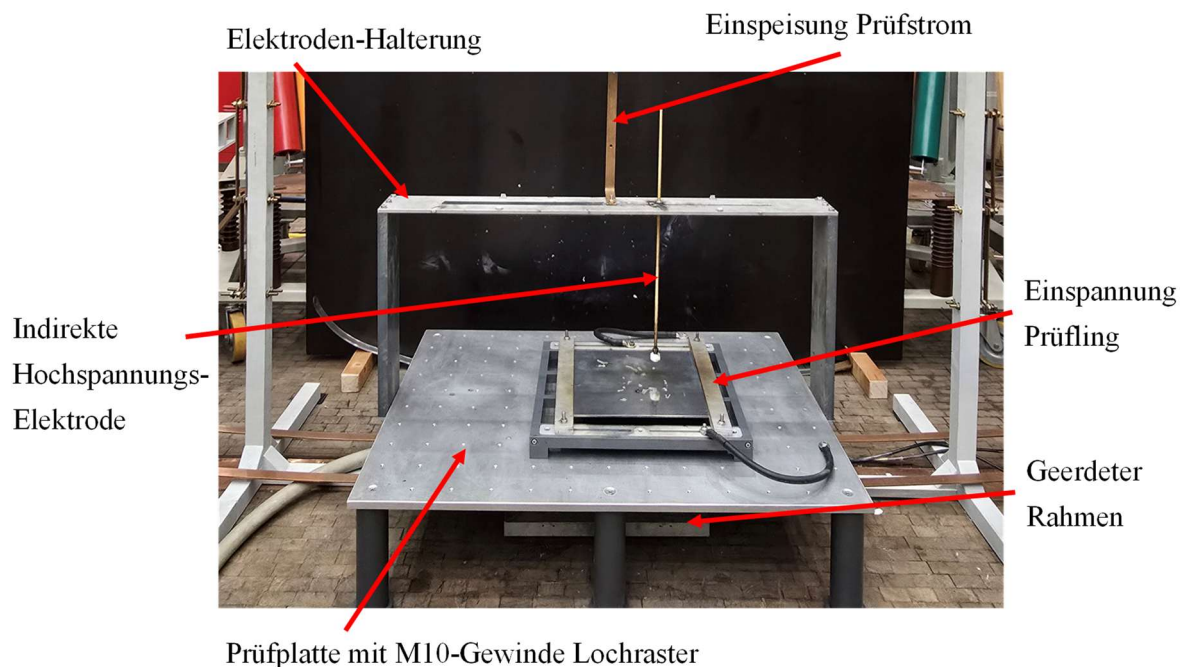


Bild 10.6 Prüffeld mit Prüfplatte und darüber befindlicher Hochspannungs-Elektrode zur Einspeisung des Prüfstroms

In Bild 10.6 besteht das Prüfobjekt aus einer Aluminium-Platte, die in einer Einspannvorrichtung gehalten wird. Da sowohl die Hochspannungs-Elektrode als auch die Einspannvorrichtung verschiebbar sind, kann der Einspeisepunkt des Prüfstroms in weiten Bereichen frei gewählt werden.

Bei den Prüfungen werden teilweise schädliche Dämpfe und Gase freigesetzt. Dies gilt beispielsweise bei Prüfung von Objekten, die Materialien aus CFK oder GFK enthalten. Da bei diesen Materialien zudem schädliche Fasern freigesetzt werden, kann das Prüffeld bei Bedarf durch eine durchsichtige PVC-Abdeckung eingehaust werden. Die durchsichtige PVC-Einhausung ermöglicht Kameraaufnahmen während der Versuche und dient als unmittelbare Sichtkontrolle, um eine etwaige Brandentwicklung frühzeitig erkennen zu können. An die PVC-Einhausung ist eine Absauganlage angeschlossen, mit der die schädlichen Dämpfe und Gase sowie die freigesetzten Fasern herausgefiltert werden (siehe Bild 10.7).



Bild 10.7 Prüffeld mit PVC-Einhausung

11. Technische Daten des Langzeitstrom-Generators

Für den neu erstellten Langzeitstrom-Generator wurden die technischen Daten ermittelt, indem der Aufbau des Generators sowie seine Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten untersucht wurden. Dazu wurden die Werte der elektrischen Elemente (Widerstand, Induktivität, Kapazität) aus experimentellen Versuchen bestimmt. Weiterhin wurden die Leistungsdaten ermittelt wie die maximale Generatorenergie, die Gesamtkapazität und die maximal realisierbaren Ströme und Ladungen.

Abschließend wurde untersucht, inwieweit sich die in den Blitzschutz-Normen geforderten Langzeitströme realisieren lassen. Zu diesem Zweck wurde der Langzeitstrom-Generator mit dem bereits bestehenden Stoßstrom-Generator kombiniert, um das Szenario eines Erstblitzes mit nachfolgendem Langzeitstrom abzubilden.

11.1 Kennwerte des Langzeitstrom-Generators

Bild 11.1 zeigt das Ersatzschaltbild des Langzeitstrom-Generators mit angeschlossenem Stoßstrom-Generator. Die Kondensatorbank C_L wird auf $U_{L/0}$ geladen und gibt nach Schließen des Schalters $S_{L-Zünd}$ den Strom i_L an das Prüfobjekt (P) ab. Zur Stromformung dienen der Generator-Widerstand R_L und die Generator-Induktivität L_L . Der Generator-Widerstand (R_L) wird gebildet aus der Reihenschaltung des Innenwiderstands R_{L-i} , des Widerstandes R_{L-Sp} der in Bild 7.26 dargestellten Spulenordnung und dem externen Widerstand R_{L-ex} der in Bild 7.18 dargestellten Widerstandskaskade:

$$R_L = R_{L-i} + R_{L-Sp} + R_{L-ex} \quad (11.1)$$

Die Generator-Induktivität (L_L) setzt sich zusammen aus der Reihenschaltung der inneren Induktivität L_{L-i} und der Induktivität der zuvor genannten Spulenordnung, L_{L-Sp} :

$$L_L = L_{L-i} + L_{L-Sp} \quad (11.2)$$

Wie aus Bild 7.26 ersichtlich ist, ist die Spulenordnung modular aufgebaut, wobei sich durch Hintereinanderschaltung aller Spulen-Segmente die maximal mögliche Spulen-Induktivität ergibt. Werden weniger Spulen-Segmente verwendet, reduziert sich die Spulen-Induktivität entsprechend. Die rechte Seite von Bild 11.1 zeigt das vereinfachte Ersatzschaltbild des Stoßstrom-Generators, der in Anhang C detailliert beschrieben ist. Bei Betätigung des Stoßstrom-Generators fließt der gemeinsame Strom des Stoß- und Langzeitstrom-Generators i_p über das Prüfobjekt.

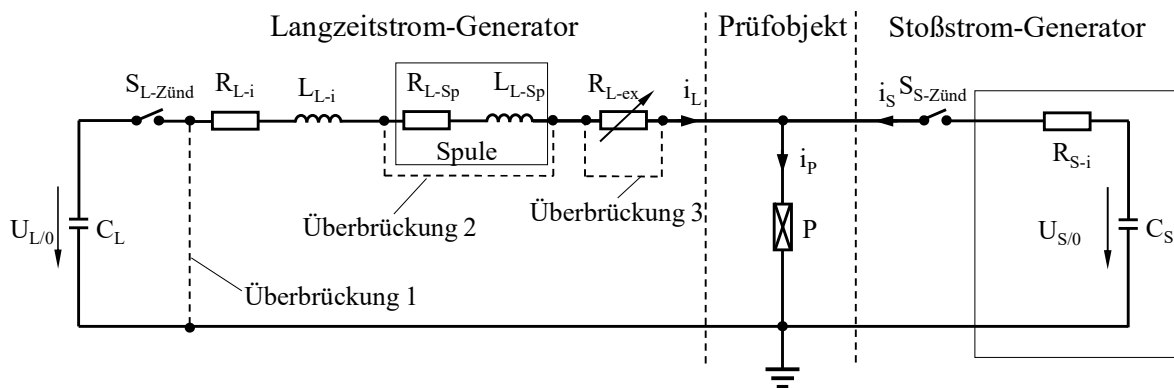


Bild 11.1 Ersatzschaltbild des Langzeitstrom-Generators mit angeschlossenem Stoßstrom-Generator

11.1.1 Gesamtkapazität, Energie und Ladung des Langzeitstrom-Generators

Um die maximal mögliche Ladung des Langzeitstrom-Generators zu ermitteln, wurde die komplette Kondensatorbank mit allen 50 Kondensatoren auf $U_{L/0} = 2,25 \text{ kV}$ geladen und anschließend über einen Widerstand von 1Ω entladen. Hierbei wurde für den Entladestrom eine Ladung von $Q = 491 \text{ C}$ gemessen. Hieraus ergeben sich folgende Kenngrößen für den Langzeitstrom-Generator:

- $U_{L/0} = 2,25 \text{ kV}$ (maximale Ladespannung)
- $Q = 491 \text{ C}$ (maximale Ladung)
- $C_L = \frac{Q}{U_{L/0}} = 0,218 \text{ F}$ (Gesamtkapazität)
- $W = \frac{1}{2} C_L U_{L/0}^2 = 552 \text{ kJ}$ (maximale Generator-Energie)

Gemäß Datenblatt beträgt die Kapazität eines Kondensators $4,4 \text{ mF}$, so dass sich daraus für die komplette Kondensatorbank eine Gesamtkapazität von $50 \times 4,4 \text{ mF} = 0,220 \text{ F}$ errechnet. Die tatsächlich gemessene Gesamtkapazität von $0,218 \text{ F}$ weicht von diesem Wert lediglich um etwa 1% ab.

11.1.2 Induktivität des Langzeitstrom-Generators

Wird für Prüfungen eine (indirekte) Hochspannungs-Elektrode (siehe Bild 4.1) verwendet, führt das dynamische Verhalten des zwischen Elektrode und Prüfbjekt brennenden Lichtbogens zu instabilem Stromfluss, der sprunghafte Änderungen mit sich bringt bis hin zum völligen Erlöschen. Um dies zu verhindern und um den Stromfluss zu vergleichmäßigen, ist eine entsprechend hohe Induktivität wünschenswert. Aus diesem

Grund wird der Langzeitstrom-Generator im Normalbetrieb stets mit der vollen Induktivität der Spulenordnung betrieben. Ein weiterer Grund hierfür ist, dass die Entkopplung des Langzeitstrom-Generators und des Stoßstrom-Generators eine möglichst große Induktivität erfordert.

Die Induktivität der (externen) Spulenordnung, L_{L-sp} , setzt sich aus einzelnen Induktivitäten (siehe Bild 7.26) zusammen, deren Summe eine theoretische Gesamtinduktivität von $520 \mu\text{H}$ ergibt (siehe Kapitel 7.2.2). Allerdings lässt die Anordnung der einzelnen Induktivitäten vermuten, dass sie sich stark gegenseitig beeinflussen und daher die Gesamtinduktivität einen deutlich abweichenden Wert aufweist. Daher wurde die tatsächliche Gesamtinduktivität der externen Spule experimentell ermittelt.

Die Induktivität der Spulenordnung, L_{L-sp} , die innere Induktivität des Generators, L_{L-i} , und die daraus resultierende Generator-Induktivität, L_L , wurden experimentell unter Einsatz des Stoßstrom-Generators ermittelt. Dazu wurde zunächst die Kondensatorbank durch Einbringung der Überbrückung 1 (siehe Bild 11.1) herausgeschaltet ebenso wie die Widerstandskaskade (R_{L-ex}), die durch die Überbrückung 3 kurzgeschlossen wurde. Anschließend wurde die Kapazität des Stoßstrom-Generators, $C_S = 30 \mu\text{F}$, auf $U_{S/0} = 25 \text{ kV}$ geladen und durch Schließen des Schalters $S_{S-Zünd}$ in den Stromkreis des Langzeitstrom-Generators ohne Prüfobjekt entladen.

Durch die Überbrückung der externen Widerstandskaskade (R_{L-ex}), war der Widerstand im Stromkreis äußerst gering. Infolge dessen schwingt der Strom nahezu ungedämpft mit der Periodendauer $T = 662 \mu\text{s}$, wie in Bild 11.2 dargestellt ist. Für diesen quasi periodisch ungedämpft schwingenden Strom ist die externe Induktivität in sehr guter Näherung gegeben durch (siehe Anhang A, Gleichung A.28):

$$L_L = \frac{1}{(2\pi)^2 C_S} \quad (11.3)$$

Mit der Frequenz der Schwingung, $f = 1/T = 1,51 \text{ kHz}$, und mit Gleichung (11.3) ergibt sich die Induktivität des Langzeitstrom-Generators zu $L_L = 370 \mu\text{H}$. Die Induktivität liegt somit innerhalb der maximal zulässigen Grenze von $400 \mu\text{H}$, die nach Kapitel 6.1.1 als Höchstwert zu beachten ist.

Im nächsten Schritt wurde zusätzlich die Spulenordnung durch die Überbrückung 2 (siehe Bild 11.1) kurzgeschlossen, so dass im Stromkreis des Langzeitstrom-Generators nur der Innenwiderstand R_{L-i} und die innere Induktivität L_{L-i} verblieben. Da der

Innenwiderstand sehr klein ist, ergab sich wiederum ein nahezu ungedämpft schwingender Strom mit der Periodendauer von $206 \mu\text{s}$, was einer Frequenz von $4,85 \text{ kHz}$ entspricht. Mit Gleichung (11.3) ergibt sich somit die innere Induktivität des Langzeitstrom-Generators zu $L_{L-i} = 36 \mu\text{H}$.

Aus der Differenz der Induktivität des Langzeitstrom-Generators ($L_L = 370 \mu\text{H}$) und seiner inneren Induktivität ($L_{L-i} = 36 \mu\text{H}$) erhält man die Induktivität der Spulenanordnung zu $L_{L-sp} = 334 \mu\text{H}$.

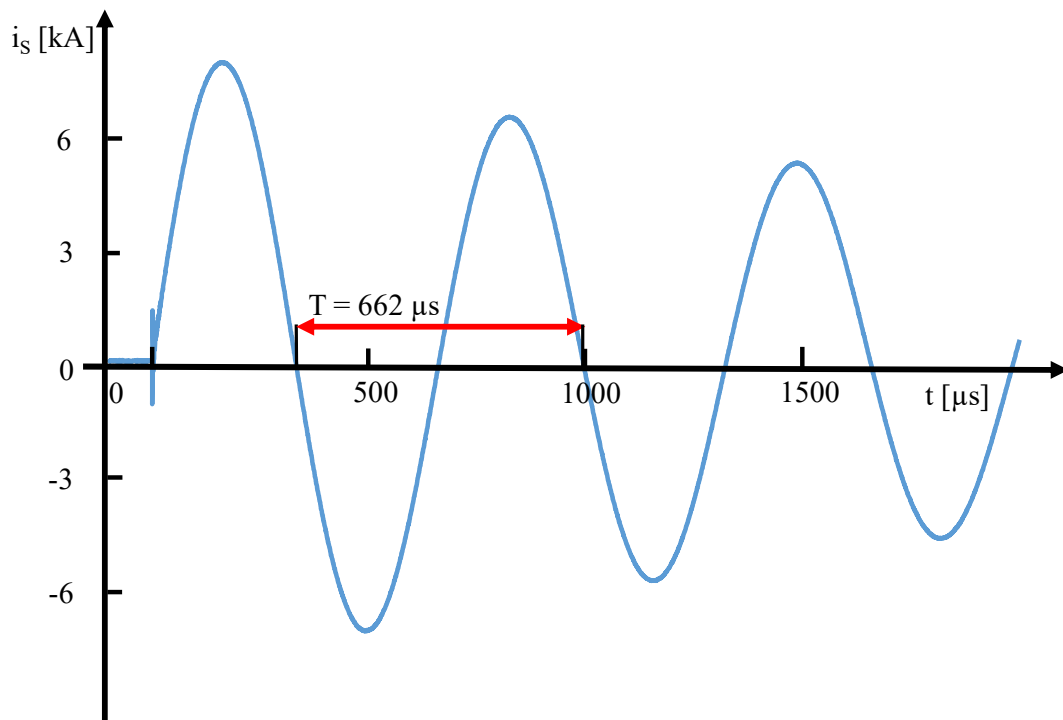


Bild 11.2 Zeitlicher Verlauf des Stroms zur Bestimmung der maximalen Induktivität des Langzeitstrom-Generators

11.1.3 Langzeitstrom-Generator bei Verwendung der kompletten externen Spulenanordnung

Wie bereits erwähnt, wird der Langzeitstrom-Generator im Normalfall mit der kompletten externen Spulenanordnung betrieben. Durch die Wahl des einstellbaren Widerstandes an der externen Widerstandskaskade (R_{L-ex}) und durch Anpassung der Ladespannung $U_{L/0}$ lässt sich der Maximalwert des Langzeitstroms bis zu einer Obergrenze einstellen. Diese Obergrenze ist erreicht, wenn bei der Ladespannung von $U_{L/0} = 2,25 \text{ kV}$ die komplette externe Widerstandskaskade (R_{L-ex}) (durch die Überbrückung 3) herausgeschaltet ist.

Für diesen Fall gibt Tabelle 11.1 eine Übersicht über die aus experimentellen Untersuchungen ermittelten maximalen Ströme ($i_{L-\max}$) in Abhängigkeit von der Anzahl der verwendeten Kondensatoren. Hierbei ist das Prüfobjekt (in Bild 11.1) durch einen Kurzschluss ersetzt. Wird beispielsweise nur ein Kondensator des Sondermoduls verwendet, ist der maximale Strom auf 0,53 kA beschränkt. Werden z.B. 8 Kondensatoren der Stränge 1 und 2 des Kondensator-Moduls 1 verwendet, erhöht sich der maximal erreichbare Strom auf 4,54 kA.

Jeder Kondensator weist zwar die gleiche Kapazität von 4,4 mF auf, weshalb die Gesamtkapazität mit Erhöhung der Anzahl der Kondensatoren linear ansteigt. Dennoch steigt der maximal erreichbare Strom nicht im gleichen Maße an. Dies liegt daran, dass die Vorwiderstände der Kondensatoren nicht gleich sind und somit der Widerstand (R_L) des Langzeitstrom-Generators nicht analog mit der Anzahl der verwendeten Kondensatoren abnimmt. Die Kondensatoren von Strang 1 des Kondensator-Moduls 1 haben beispielsweise einen Vorwiderstand von $2\ \Omega$, während die restlichen Kondensatoren mit einem Vorwiderstand von $4\ \Omega$ ausgestattet sind (siehe Kapitel 6.1.2). Hinzu kommt, dass für Langzeitströme über 10 kA der bis dahin eingesetzte mechanische Schalter aufgrund von Schalterprellen durch einen Funkenstreckenschalter mit höherem Widerstand ersetzt wurde. Bild 11.3 zeigt den zeitlichen Verlauf des maximal erreichbaren Stroms bei Verwendung von 50 Kondensatoren. Dieser Maximalwert beträgt 15,1 kA.

Kondensator Anzahl	$i_{L-\max}$ [kA]	R_L [Ω]	Verwendete Module
1	0,53	4,16	Sondermodul/ein Kondensator
2	1,02	2,148	Sondermodul/zwei Kondensatoren
4	2,99	0,735	Kondensator-Modul 1: 1. Strang
8	4,54	0,485	Kondensator-Modul 1: 1. + 2. Strang
12	5,89	0,373	Kondensator-Modul 1
24	9,29	0,237	Kondensator-Module 1 + 2
36	12,01	0,183	Kondensatormodul 1 + 2 + 3
48	14,58	0,151	Kondensator-Modul 1 + 2 + 3 + 4
50	15,13	0,145	Kondensator-Modul 1 + 2 + 3 + 4 + Sondermodul/zwei Kondensatoren

Tabelle 11.1 Aus Versuchen ermittelte maximal mögliche Ströme in Abhängigkeit von der Anzahl der Kondensatoren und der verwendeten Module (R_L : Widerstand des Langzeitstrom-Generators)

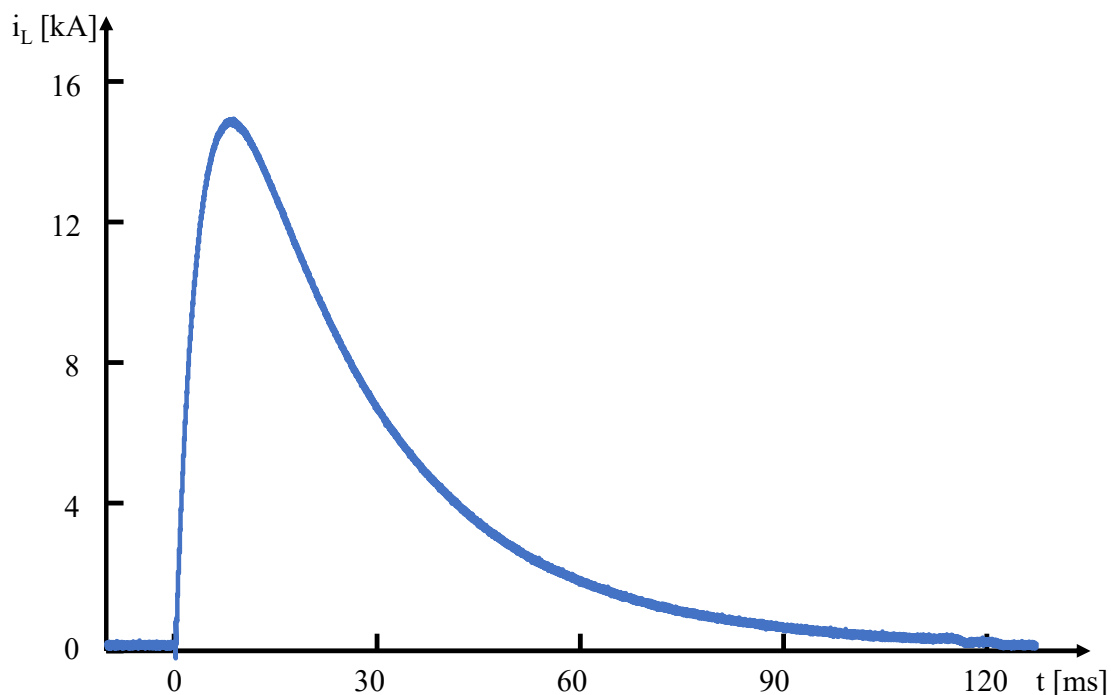


Bild 11.3 Zeitlicher Verlauf des maximal erreichbaren Stroms ($i_{L\text{-max}} = 15,1 \text{ kA}$) bei Verwendung aller 50 Kondensatoren des Langzeitstrom-Generators und der kompletten externen Spulenanordnung ($U_{L/0} = 2,25 \text{ kV}$)

11.1.4 Langzeitstrom-Generator ohne Verwendung der externen Spulenanordnung

Soll der maximale Strom weiter erhöht werden, lässt sich dies erzielen, indem die externe Widerstandskaskade ($R_{L\text{-ex}}$) kurzgeschlossen wird und die Anzahl der Spulen bei der Spulenanordnung reduziert wird. Der höchste Strom wird daher erreicht, wenn die externe Spulenanordnung zur Gänze aus dem Stromkreis herausgeschaltet ist.

Für diesen Fall zeigt Bild 11.4 den zeitlichen Verlauf des maximal erreichbaren Stroms. Dieser Maximalwert des Stroms beträgt $23,6 \text{ kA}$. Hierbei wurden alle 50 Kondensatoren des Langzeitstrom-Generators eingesetzt ($U_{L/0} = 2,25 \text{ kV}$).

Da die komplette Spulenanordnung herausgeschaltet ist, verbleibt im Stromkreis als Induktivität nur die relativ geringe innere Induktivität des Langzeitstrom-Generators. Daher weist der Strom einen näherungsweise exponentiellen Abfall mit der Zeitkonstante $R_{L-i}C_L$ auf. Hierbei ist der innere Widerstand gegeben durch:

$$R_{L-i} = \frac{U_{L/0}}{i_{L\text{-max}}} = 95 \text{ m}\Omega \quad (11.4)$$

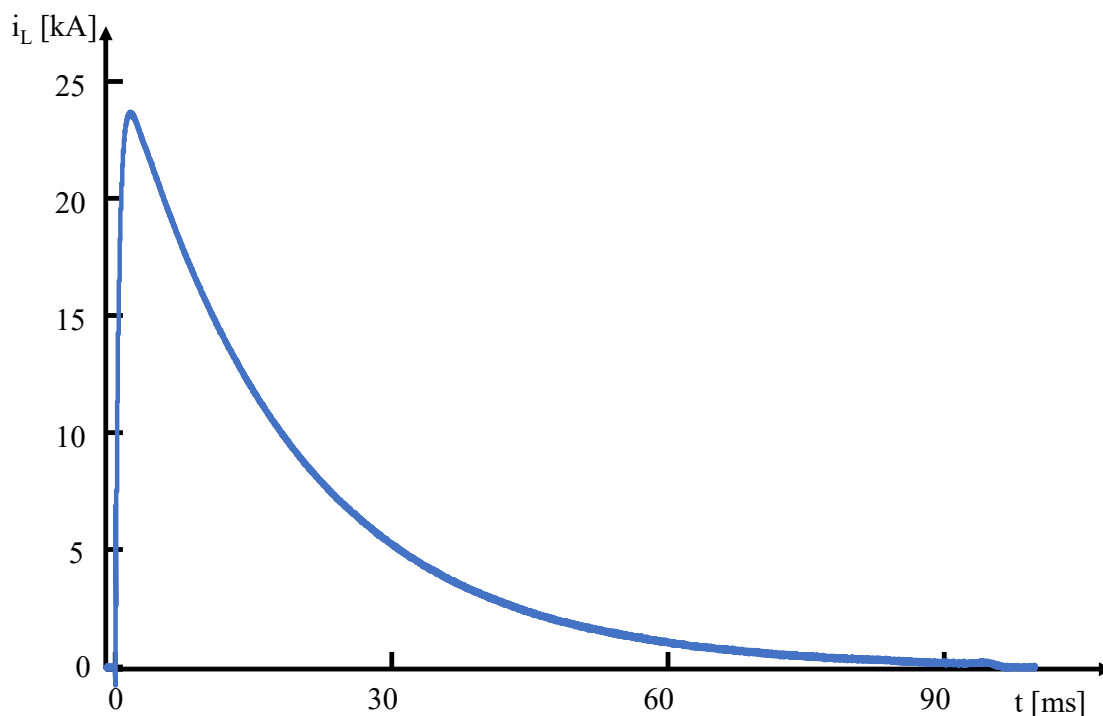


Bild 11.4 Zeitlicher Verlauf des maximal erreichbaren Stroms ($i_{L-\max} = 23,6 \text{ kA}$) bei Verwendung aller 50 Kondensatoren des Langzeitstrom-Generators und ohne externe Spulenanordnung ($U_{L/0} = 2,25 \text{ kV}$)

11.2 Nachbildung von Langzeitströmen nach Blitzschutz-Normen

Die Langzeitströme werden entsprechend der Blitzschutz-Normen VDE 0185-305-1 [31], DIN EN IEC 61400-24 [32] und EUROCAE ED-84 [33] nachgebildet. Bei den Blitzschutz-Normen VDE 0185-305-1 und EUROCAE ED-84 werden die Langzeitströme teilweise mit Stoßströmen kombiniert.

Bei den Versuchen wurde als Prüfobjekt eine indirekte Elektrode mit Zünddraht in einem Abstand von 5 cm (siehe Bild 4.1, Kapitel 4) oberhalb einer Aluminiumplatte verwendet. Von der Kondensatorbank wurden stets alle 50 Kondensatoren eingesetzt und diese auf die maximal zulässige Spannung von $U_{L/0} = 2,25 \text{ kV}$ geladen. Weiterhin wurde stets die komplette externe Spulenanordnung verwendet.

In den genannten Normen ist der Langzeitstrom festgelegt durch seine Ladung (Q_L) und seine Zeitdauer (t_L). Der Stromzeitverlauf ist hingegen nicht explizit vorgegeben. Gleichwohl wird von einem sogenannten „rechteckförmigen“ Strom als wünschenswertem Stromverlauf ausgegangen. Dabei bezeichnet der rechteckförmige Strom einen über die Zeitdauer t_L konstanten Strom. Daher wird neben der Ladung (Q_L) und der Zeitdauer (t_L) auch der mittlere Langzeitstrom ($i_{L-\text{mittel}} = Q_L/t_L$) betrachtet.

Um die Abweichungen von diesem Mittelwert zu charakterisieren, werden die prozentualen Abweichungen zu höheren Werten hin, $A_{i-\max}$, und zu kleineren Werten hin, $A_{i-\min}$, untersucht:

$$A_{i-\max} = \frac{i_{L-\max} - i_{L-\text{mittel}}}{i_{L-\text{mittel}}} \cdot 100 \% \quad (11.5a)$$

$$A_{i-\min} = \frac{i_{L-\min} - i_{L-\text{mittel}}}{i_{L-\text{mittel}}} \cdot 100 \% \quad (11.5b)$$

Hieraus ergibt sich die prozentuale Gesamt-Abweichung vom Mittelwert zu:

$$A_{\text{ges}} = \frac{|A_{i-\max}| + |A_{i-\min}|}{2} \quad (11.5c)$$

$i_{L-\max}$ bezeichnet den maximal auftretenden Strom, während $i_{L-\min}$ den minimal auftretenden Strom kennzeichnet.

11.2.1 Langzeitströme nach VDE 0185-305-1 / EUROCAE ED-84, Komponente C

Die Langzeitströme nach der Norm VDE 0185-305-1 sind festgelegt mit einer Zeitdauer von $t_L = 0,5 \text{ s} \pm 10\%$. Die Ladung richtet sich nach dem jeweiligen Gefährdungspegel LPL I – IV (siehe Anhang B). Hieraus ergibt sich ein mittlerer Strom von 400 A für LPL I, von 300 A für LPL II und von 200 A für LPL III/IV. Um diese Ströme zu erzielen, wurde an der externen Widerstandskaskade der Widerstand eingestellt zu $3,58 \Omega$ für LPL I, zu $6,18 \Omega$ für LPL II und zu $8,25 \Omega$ für LPL III/IV.

Die Komponente C nach EUROCAE ED-84 ist dem Langzeitstrom nach VDE 0185-305-1, LPL I sehr ähnlich, da in beiden Normen eine Ladung von 200 C gefordert wird. Der Unterschied besteht darin, dass der Toleranzbereich für die Zeitdauer (t_L) der Komponente C in den Grenzen von 0,25 s bis 1 s erweitert ist. In den folgenden Beispielen ist die Zeitdauer zu 0,5 s gewählt. In diesem Fall entspricht die Komponente C dem Langzeitstrom des Gefährdungspegels LPL I nach VDE 0185-305-1. Die Komponente C nach EUROCAE ED-84 wird daher im Folgenden nicht gesondert betrachtet.

Tabelle 11.2 enthält die Parameter der Prüfströme (Langzeitströme) entsprechend den Gefährdungspegeln. Für sämtliche Gefährdungspegel liegen sowohl die Ladung als auch die Zeitdauer innerhalb der zulässigen Toleranzen.

LPL	$i_{L\text{-mittel}}$ [A]	$i_{L\text{-max}}$ [A]	$i_{L\text{-min}}$ [A]	A_{ges} [%]	Q_L [C]	t_L [ms]
I	414	566	296	± 33	191	461
II	268	324	203	± 23	136	507
III/IV	208	253	130	± 30	106	509

Tabelle 11.2 Parameter der Prüfströme der Gefährdungspegel LPL I bis III/IV

Bild 11.5 zeigt den zeitlichen Verlauf des Langzeitstroms des Gefährdungspegels LPL I. Wie zu erkennen, ist der Strom von Störimpulsen überlagert (orange Kurve), die infolge des instabilen Stromflusses durch den zwischen Elektrode und Prüfobjekt brennenden Lichtbogen verursacht werden. Um diese Störimpulse möglichst auszublenden, wurden die Ströme generell mit einem Tiefpass 2. Ordnung mit der oberen Grenzfrequenz von 100 Hz numerisch gefiltert (blaue Kurve). Die in Tabelle 11.2 angegebenen Werte für den maximalen, mittleren und minimalen Strom sowie die prozentuale Gesamt-Abweichung basieren auf dieser Filterung.

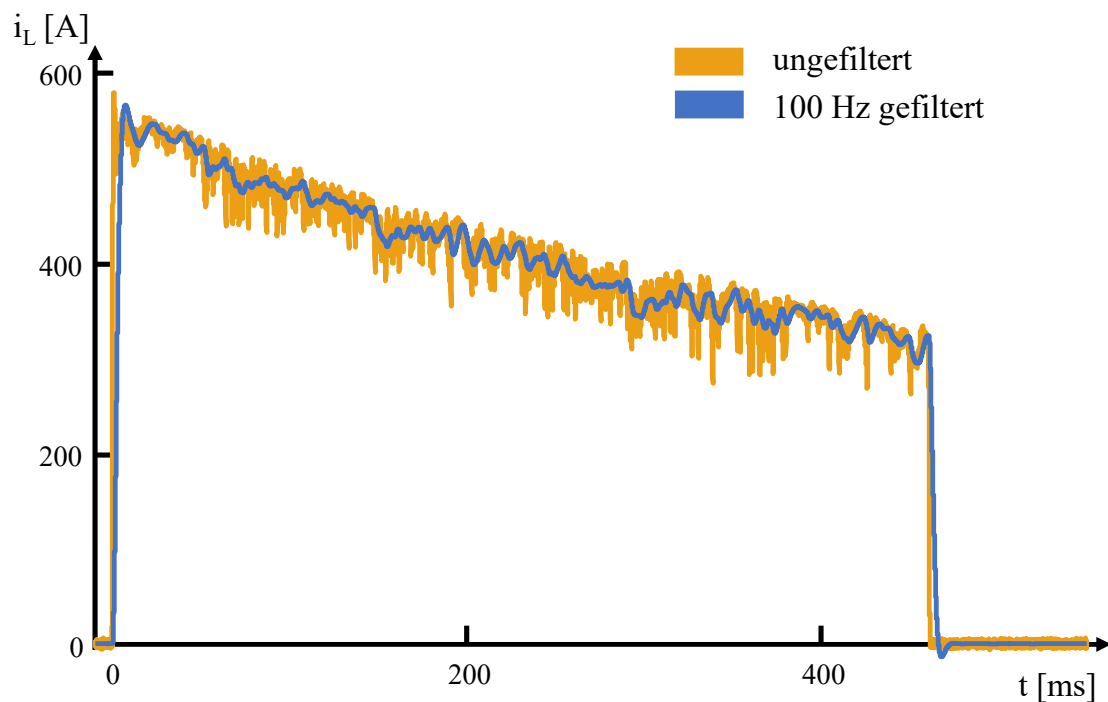


Bild 11.5 Zeitlicher Verlauf des Langzeitstroms des Gefährdungspegels LPL I vor der Filterung (orange Kurve) und nach der Filterung (blaue Kurve) mit einem Tiefpass mit der oberen Grenzfrequenz von 100 Hz

Wie aus Bild 11.5 ersichtlich ist, fällt der Strom von einem Startwert von 566 A auf einen Endwert von etwa 300 A relativ stark ab. Daher ist die prozentuale Gesamt-Abweichung (A_{ges}) vom Mittelwert mit 33 % relativ hoch (siehe Tabelle 11.2). Dagegen ist der Stromabfall bei den in den Bildern 11.6 und 11.7 dargestellten Stromverläufen für die Gefährdungspegel LPL II und LPL III/IV weniger stark ausgeprägt.

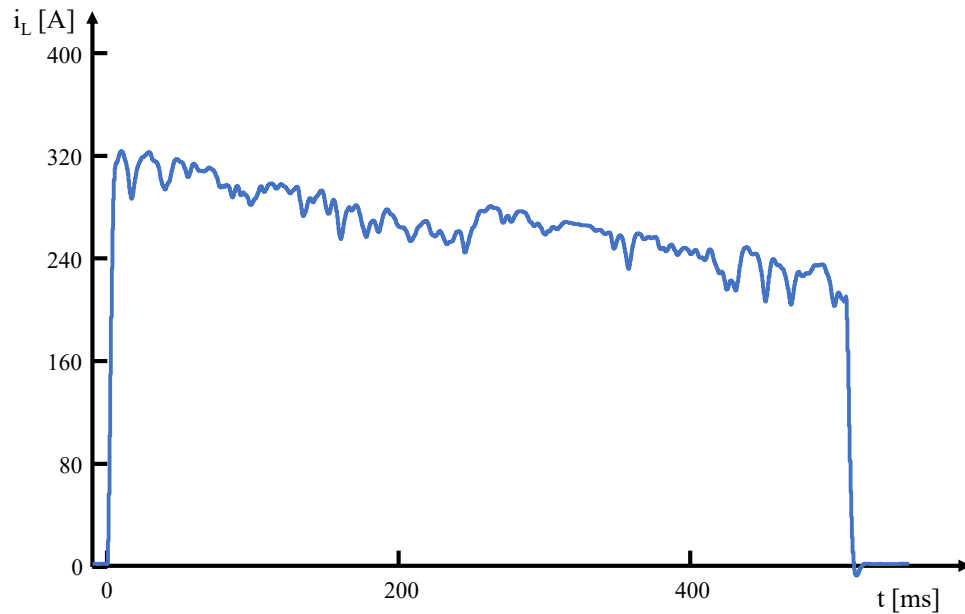


Bild 11.6 Zeitlicher Verlauf des Langzeitstroms des Gefährdungspegels LPL II nach Filterung mit einem 100 Hz-Tiefpass

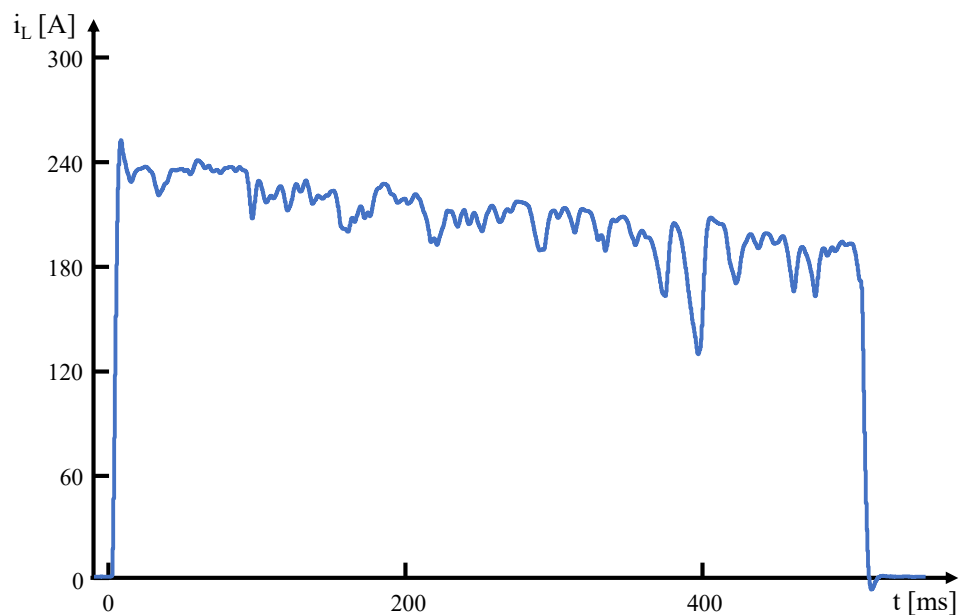


Bild 11.7 Zeitlicher Verlauf des Langzeitstroms des Gefährdungspegels LPL III/IV nach Filterung mit einem 100 Hz-Tiefpass

Durch die Verwendung Strom-formender-Schalter kann der Stromabfall vermindert werden. Bild 11.8 zeigt hierfür ein Beispiel bei Verwendung eines einzigen Schalters. Nach 240 ms wird der Strom-formende-Schalter betätigt, wodurch ein Teil der Widerstände überbrückt wird und der Strom näherungsweise auf seinen Startwert von 493 A angehoben wird. Für den Langzeitstrom des Gefährdungspegels LPL I (Ladung $Q = 203 \text{ C}$) reduziert sich dadurch die prozentuale Gesamt-Abweichung vom Mittelwert auf 20 %.

Durch die Verwendung zusätzlicher Strom-formender-Schalter lässt sich der Strom weiter vergleichmäßigen. Bild 11.9 zeigt hierfür beispielhaft einen Langzeitstrom des Gefährdungspegels LPL I (Ladung $Q = 230 \text{ C}$), wobei vier Strom-formende-Schalter eingesetzt wurden. Die prozentuale Gesamt-Abweichung vom Mittelwert ist weiter auf 18 % reduziert.

Allerdings bringt die Verwendung von mehr als einem Strom-formenden-Schalter nur noch marginale Vorteile, da der Einfluss des instabil brennenden Lichtbogens einer weiteren Vergleichmäßigung des Stroms entgegenwirkt.

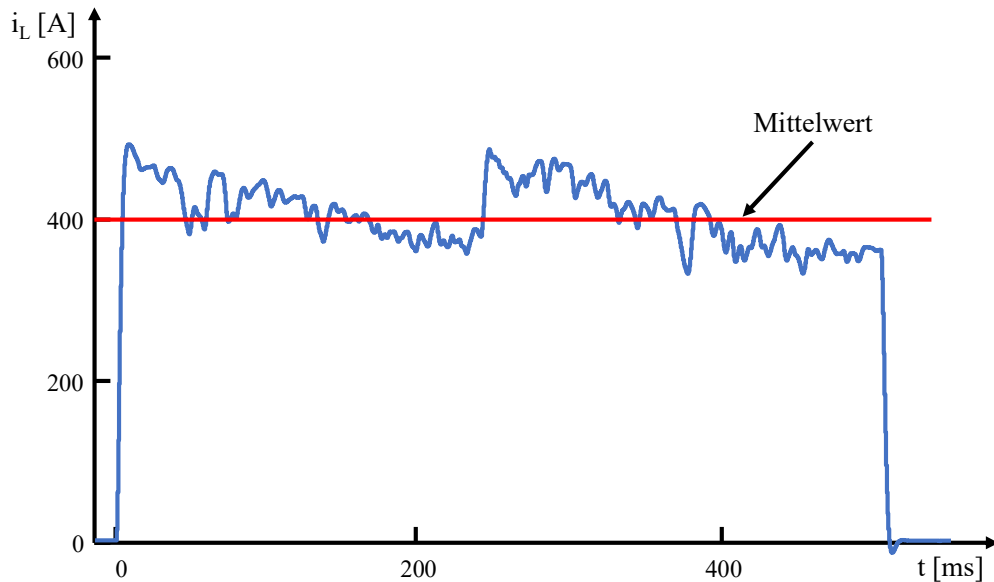


Bild 11.8 Zeitlicher Verlauf des Langzeitstroms nach VDE 0185-305-1, LPL I bzw. der Komponente C nach EUROCAE ED-84 bei Verwendung eines Strom-formenden-Schalters und nach Filterung mit einem 100 Hz-Tiefpass

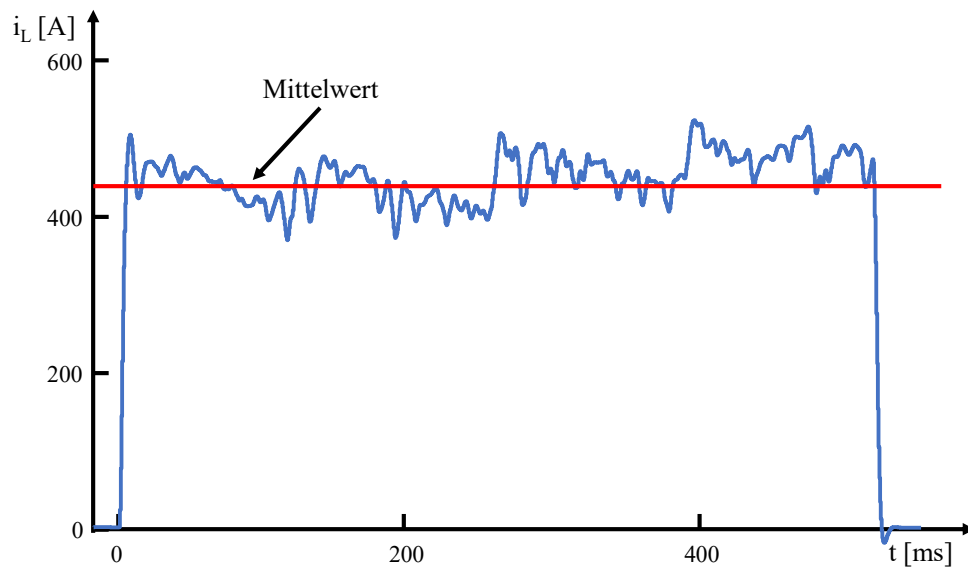


Bild 11.9 Zeitlicher Verlauf des Langzeitstroms nach VDE 0185-305-1, LPL I bzw. der Komponente C nach EUROCAE ED-84 bei Verwendung von vier Strom-formenden-Schaltern und nach Filterung mit einem 100 Hz-Tiefpass

11.2.2 Langzeitstrom nach EN IEC 61400-24 für exponierte Windkraftanlagen

In der Norm EN IEC 61400-24 [32] wird für exponierte Windkraftanlagen ein Langzeitstrom mit einer Ladung von $600 \text{ C} \pm 20 \%$ und einer Zeitdauer von $t_L = 0,5 \text{ s} \pm 10\%$ gefordert. Bild 11.10 zeigt beispielhaft einen Langzeitstrom, der mit einer Ladung von 491 C die Anforderungen dieser Norm erfüllt. Der mittlere Strom beträgt 820 A. Um den Strom zu vergleichmäßigen, wurden zwei Strom-formende-Schalter eingesetzt.

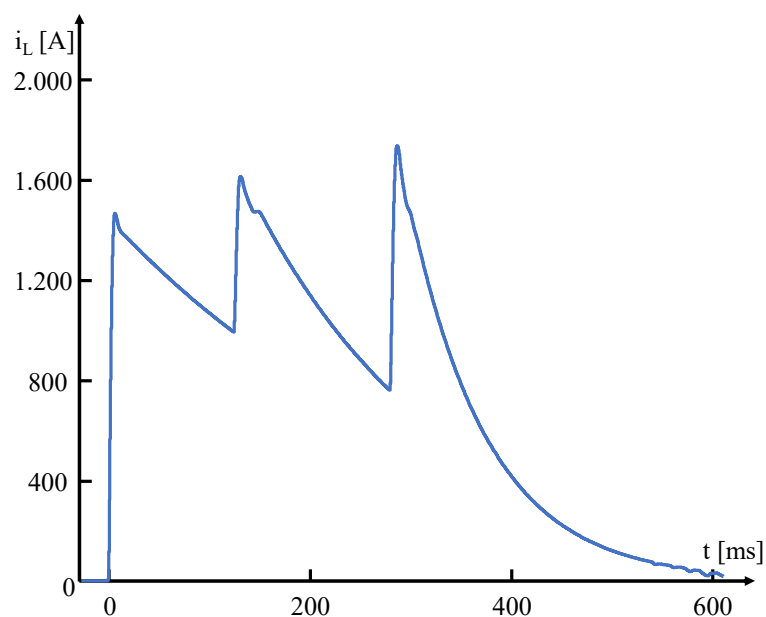


Bild 11.10 Langzeitstrom nach der Norm EN IEC 61400-24 [32]

11.2.3 Kombinierte Stoß- und Langzeitströme

Stoß- und Langzeitströme werden kombiniert, um die Bedrohung durch den Erstblitz mit nachfolgendem Langzeitstrom abzubilden. Nach VDE 0185-305-1 [31] geschieht dies für bauliche Anlagen dadurch, dass das Prüfobjekt - dem gewählten Gefährdungspegel (LPL) entsprechend - mit dem Stoßstrom des positiven Erstblitzes und dem nachfolgenden Langzeitstrom beaufschlagt wird.

In gleicher Weise lässt sich die Stoßstrom-Komponente A mit den Langzeitströmen der Komponente C bzw. B+C kombinieren. Diese Komponenten sind in der Norm EUROCAE ED-84 [33] für fliegende Objekte festgelegt. Da dieses Prüfverfahren in weiten Bereichen mit VDE 0185-305-1 ähnlich ist, wird hier nicht explizit darauf eingegangen (siehe Anhang B).

11.2.3.1 Kombinierte Stoß- und Langzeitströme nach VDE 0185-305-1

Der kombinierte Stoß- und Langzeitstrom nach VDE 0185-305-1 [31] konnte für alle Gefährdungspegel (LPL I bis IV) nachgewiesen werden. Bild 11.11 zeigt beispielhaft den zeitlichen Verlauf des Stoßstroms und des Langzeitstroms gemäß dem Gefährdungspegel LPL III/IV. Den Anforderungen entsprechend, hat der Stoßstrom (Bild 11.11a) die Impulsform 10/350 μs bei einem Maximum von 106 kA. Die unipolare Stromform wurde erzeugt durch Verwendung eines Crowbar-Schalters, der im Strommaximum gezündet wurde (siehe Anhang C). An den Stoßstrom schließt sich unmittelbar der Langzeitstrom an, der allerdings in Bild 11.11a aufgrund des wesentlich kleineren Stroms nicht erkennbar ist und daher in Bild 11.11b gesondert dargestellt wird.

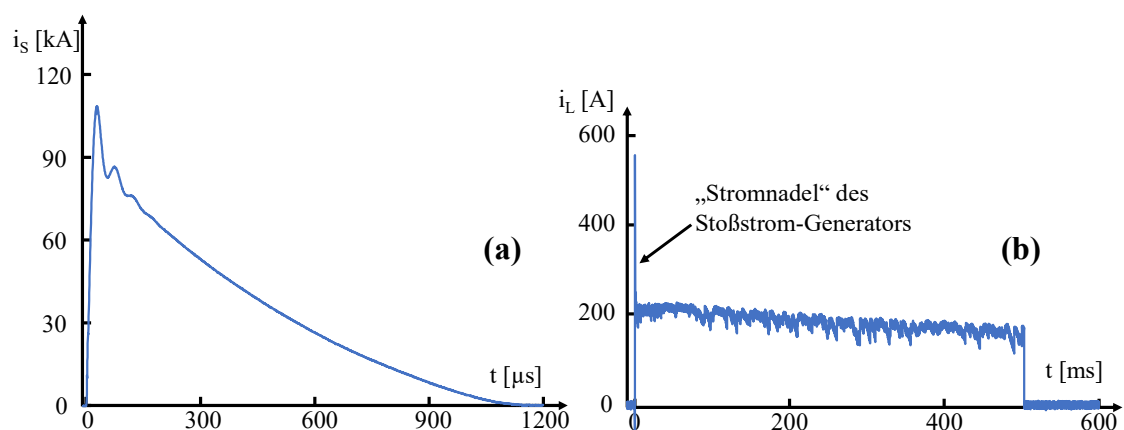


Bild 11.11 (a) Stoßstrom und (b) Langzeitstrom (mit Stoßstrom als „Stromnadel“) nach der Norm VDE 0185-305-1, LPL III/IV

11.2.3.2 Komponenten A und B+C* nach EUROCAE ED-84

Die Komponenten B und C* nach EUROCAE ED-84 [33] sind Langzeitströme, die in der Regel in einem gemeinsamen Stromimpuls B+C* realisiert werden. Zur Nachbildung der kombinierten Komponente B+C* wurde der 1. Kondensator-Strang des Kondensator-Moduls 1 verwendet und auf eine Ladespannung von 2 kV aufgeladen.

Die Komponente B entspricht dem Beginn des Langzeitstroms, mit einem Maximalwert von $2 \text{ kA} \pm 20 \%$ und einer Ladung von $10 \text{ C} \pm 10 \%$. Die Komponente C* entspricht hingegen einem verkürzten Langzeitstrom von einigen hundert Ampere, der entsteht, wenn sich ein Flugzeug im Flug bewegt und dadurch die Einschlagstelle des Blitzes nur kurz an einem Punkt verweilt. Da die Verweildauer von mehreren Parametern abhängt, kann die Ladung im Bereich von einigen 10 C variieren.

Nach [90] kann die Komponente A sowohl mit unipolarem Verlauf als auch mit gedämpft schwingendem Verlauf erzeugt werden, ohne dass dies signifikante Änderungen der Ergebnisse auf das Prüfobjekt hat. Bild 11.12a zeigt beispielhaft die Komponente A, die mit einer gedämpften sinusförmigen Wellenform realisiert wurde.

Das Strommaximum beträgt 193 kA und der Stromquadratimpuls (spezifische Energie) beträgt $2,11 \times 10^6 \text{ A}^2\text{s}$. An die Komponente A schließt sich unmittelbar die kombinierte Komponente B+C* (Ladung $Q = 37,1 \text{ C}$) an, die allerdings in Bild 11.12a aufgrund des wesentlich kleineren Stroms nicht erkennbar ist und daher in Bild 11.12b gesondert dargestellt wird. Wie zu erkennen ist, weist die anfängliche Komponente B ein Strommaximum ($i_{L-\text{max}}$) von 2,13 kA auf und geht dann mit der Reduktion des Stroms in die Komponente C* über.

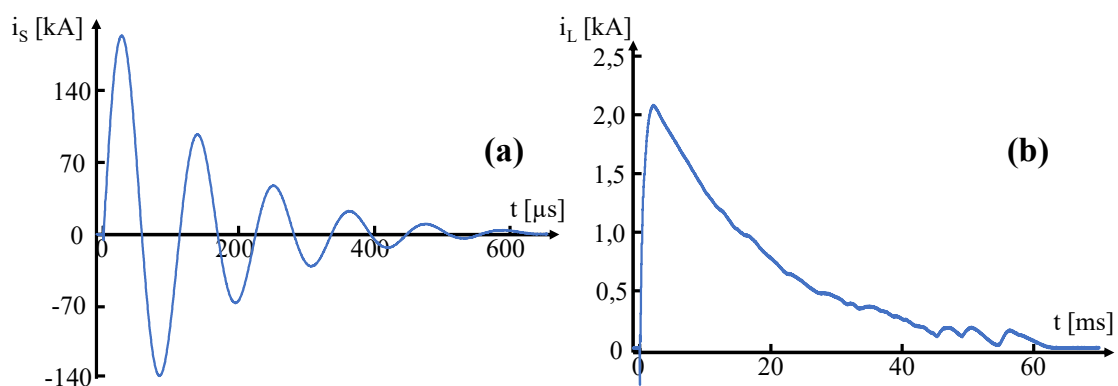


Bild 11.12 (a) Stoßstrom der Komponente A und (b) Langzeitstrom der kombinierten Komponente B+C* nach EUROCAE ED-84

12. Untersuchungen an Metallstrukturen mit Hilfe des neuen Langzeitstrom-Generators

In den vorangegangenen Kapiteln wurden das Konzept, die Konstruktion, der Aufbau und das Leistungsvermögen des neuen Langzeitstrom-Generators vorgestellt. Das vorliegende Kapitel widmet sich nun dem Einsatz des Langzeitstrom-Generators bei Beaufschlagung von Metallstrukturen mit Langzeitströmen.

Mit den Untersuchungen wird kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben, sie sollen vielmehr einen Trend aufzeigen und als Grundlage für künftige tiefergreifende Analysen dienen. Daher beschränken sie sich auf den beispielhaften Fall der Schmelzvorgänge an 2 mm starken Aluminium-Blechen mit und ohne Beschichtung.

Um den Einfluss der Stromstärke auf die Schmelzvorgänge zu bestimmen, wurde der Langzeitstrom bis auf Werte von einigen kA erhöht. Untersuchungen bei derart hohen Strömen sind im Wesentlichen bisher unbekannt. Zweck der Untersuchungen ist es, die durch die Einwirkung des Lichtbogens entstandenen Schäden an der Metallstruktur klassifizieren zu können. Insbesondere soll die Frage beantwortet werden, ob die in der Normung verankerten Beziehungen hinsichtlich des ausgeschmolzenen Volumens [86] [31] auch bei sehr hohen Langzeitströmen nur von der Ladung bestimmt werden.

Das durch die Langzeitströme verursachte Schadensbild weist bei relativ kleinen Ladungen und niedrigen Strömen typischerweise eine räumlich begrenzte Schmelzstelle auf. Bei höheren Ladungsmengen und somit höherem Energieeintrag wird hingegen immer mehr Metall aufgeschmolzen. In diesem Fall geht die Schmelzstelle immer mehr in die Tiefe bis hin zum Durchschmelzen der Blechstruktur mit typischer Lochbildung. Mit zunehmender Stromstärke wird der Lichtbogen allerdings immer instabiler, bis er durch die auf ihn wirkenden Kräfte zu wandern beginnt. Ab einer gewissen Stromstärke führt dies dazu, dass das Verweilen des Lichtbogens an einer Stelle nicht ausreicht, um die notwendige Schmelzenergie für eine Lochbildung zu liefern. In diesem Fall betrifft das Schadensbild nur die oberflächliche Metallstruktur und ähnelt somit sehr stark dem von Stoßströmen her bekannten Schadensbild.

Dies gilt vor allem für unbeschichtete Metalloberflächen, bei der die Bewegung des Lichtbogens nicht durch die Oberflächenbehandlung behindert wird. Ist die Oberfläche hingegen mit einer Farbschicht überzogen, bleibt der Lichtbogen bevorzugt an seiner ursprünglichen Stelle stehen, so dass in diesem Fall der punktuelle Energieeintrag entsprechend höher ist.

12.1 Überblick über bisherige Untersuchungen mit Langzeitströmen

Bild 12.1 zeigt eine vergleichende Gegenüberstellung der Schadensbilder bei Beaufschlagung einer 1 mm dicken Aluminium-Platte einerseits mit einem typischen Stoßstrom und andererseits mit einem typischen Langzeitstrom (vgl. [94]). Dabei zeigt sich zunächst, dass durch die Stoßströme eine annähernd runde relativ große Schadensfläche auf der Metallstruktur entsteht (Bild 12.1a). Da die Schadensfläche nicht in die Tiefe reicht, weist die Rückseite der Platte typischerweise keine Schäden auf.

Im Gegensatz dazu ist die Schadensfläche bei Beaufschlagung mit dem Langzeitstrom wesentlich kleiner aber die Aluminium-Platte ist durchgeschmolzen (Bild 12.1b). Der Grund hierfür ist, dass der Lichtbogen im Gegensatz zum Stoßstrom eher punktuell brennt, was einen höheren Energieeintrag an dieser Stelle zur Folge hat. Dies bestätigen experimentelle Untersuchungen, bei denen die Temperaturen auf der Rückseite von Metallplatten bei Beaufschlagung mit Langzeitströmen um bis zu einer Größenordnung höher waren als bei den Stoßströmen [95] [96] [97].

Schäden durch Langzeitströme treten allerdings nicht nur an Metallblechen auf. In zunehmendem Maße sind auch hoch aufragende Windkraftanlagen betroffen, wenn deren aus Faserverbundwerkstoffen bestehende Flügel von Blitzen getroffen werden [98]. Das gleiche gilt für moderne Flugzeuge, die teilweise ebenfalls aus Faserverbundwerkstoffen bestehen [99] [100]. Dies erfordert besondere Schutzsysteme (siehe z. B. [101] [102] [103]), was allerdings nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist.

Bei den Untersuchungen an Metallstrukturen werden neben indirekten Elektroden [94], [104] auch direkte Elektroden [105] [106] eingesetzt. Bei der direkten Elektrode wird im Gegensatz zur indirekten Elektrode auf die Abdeckung der Spitze durch eine Isolationskappe (typischerweise Teflon) verzichtet. In [107] werden die Vor- und Nachteile dieser Elektroden verglichen. Nachteilig an der Verwendung direkter Elektroden ist, dass sich durch die fehlende Abdeckung der von der Hochspannungselektrode zum Prüfobjekt hin gerichtete Plasmajet nicht vermeiden lässt. Infolgedessen ergibt sich ein unrealistisch großes Schadensbild, das nicht nur durch den brennenden Lichtbogen, sondern auch durch den zusätzlichen Materialabtrag aufgrund des Plasmajets bestimmt ist [108].

Bei den bisherigen Untersuchungen kamen vornehmlich Generatoren mit einer Generatorspannung von einigen 100 V bis etwa 1 kV zum Einsatz. Aus dieser geringen Generatorspannung resultieren verschiedene Nachteile: Zum einen ist es nicht möglich, den in der Normung üblicherweise geforderten Mindestabstand von 5 cm zwischen

Hochspannungs-Elektrode und Prüfobjekt einzuhalten (siehe [33]). Bei diesem relativ großen Abstand ist nämlich die Brennspannung zu groß, um von der Generatorspannung gedeckt zu werden. Hinzu kommt, dass bei Verwendung einer indirekten Elektrode der Weg des Lichtbogens durch die Umlenkung um die Isolator-Kappe weiter erhöht ist (siehe Kapitel 4, Bild 4.1). Infolgedessen „reißt“ der Lichtbogen ab und erlischt frühzeitig. Um dies zu verhindern, wird oftmals der Abstand der Elektrode und somit der Pfad des Lichtbogens reduziert, was allerdings die Frage der wirklichkeitsnahen Nachbildung aufwirft [108].

Zum anderen ist die geringe Generatorspannung auch nachteilig, wenn man eine relativ hohe Stromstärke erreichen will. Der Innenwiderstand des Generators begrenzt nämlich die Höhe des Stroms. Daher beschränkten sich die bisher durchgeführten Untersuchungen im Wesentlichen auf Langzeitströme bis wenige 100 A.

Diese Einschränkungen waren der Anlass für den Bau des neuen Langzeitstrom-Generators. Damit ist es nun möglich, Langzeitströme bis in den 10 kA-Bereich zu erzeugen. Zudem können indirekte (Hochspannungs-) Elektroden mit einem größeren Abstand (von 5 cm) eingesetzt werden, ohne dass ein frühzeitiges Erlöschen des Lichtbogens auftritt. Um dies zu ermöglichen, wurde der neue Langzeitstrom-Generator für eine Generatorspannung bis zu 2,5 kV ausgelegt.

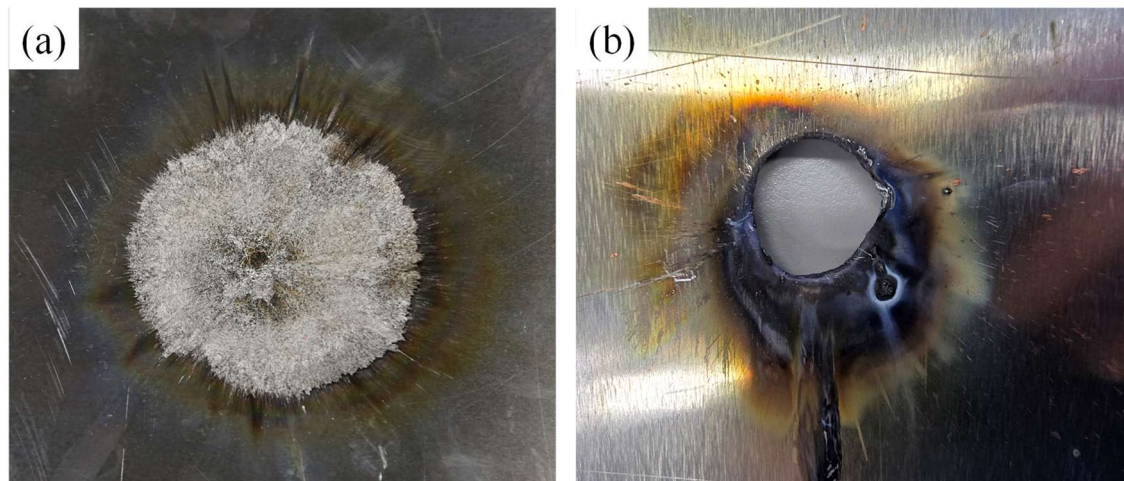


Bild 12.1 Schäden durch (a) einen typischen Stoßstrom-Lichtbogen und (b) einen typischen Langzeitstrom-Lichtbogen an einer 1 mm dicken Aluminium-Platte

12.2 Übersicht über die experimentellen Untersuchungen

Das durch Langzeitstrom-Lichtbögen ausgeschmolzene Volumen von Metallen (V_L) wird nach VDE 0185-305-1 [31] mit folgender Beziehung in Abhängigkeit von der Ladung des Langzeitstroms (Q_L), dem Anoden-/Kathodenspannungsfall ($u_{a/c}$) und der Umgebungstemperatur (ϑ_u) beschrieben:

$$V_L = \frac{u_{a/c} \cdot Q_L}{\gamma} * \frac{1}{C_W \cdot (\vartheta_s - \vartheta_u) + C_s} \quad (12.1)$$

Bei Verwendung von Aluminium sind nach VDE 0185-305-1 [31] folgende Werte für die Materialkonstanten zu verwenden:

- Massendichte: $\gamma = 2700 \text{ kg/m}^3$
- Wärmekapazität: $C_w = 908 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$
- Schmelztemperatur: $\vartheta_s = 658 \text{ }^\circ\text{C}$
- Spezifische Schmelzwärme: $c_s = 397 \cdot 10^3 \text{ J/kg}$

In VDE 0185-305-1 ist für den Anoden-/Kathodenspannungsfall ($u_{a/c}$) kein Wert festgelegt, üblicherweise wird jedoch von einem Spannungsfall von einigen 10 V (typischerweise 20 V) ausgegangen [6] [8]. Allerdings beruhen diese Werte auf Untersuchungen bei relativ kleinen Langzeitströmen bis einige 100 A, meist unter Verwendung einer direkten Elektrode.

Somit stellt sich die Frage, ob das Schmelzvolumen und damit der Anoden-/Kathodenspannungsfall nur von der Ladung des Langzeitstroms abhängt, jedoch nicht von der Höhe des Stroms, wie aus Gleichung (12.1) hervorgeht. Um dies zu untersuchen, wurde eine (konstante) Ladung (Q_L) von $200 \text{ C} \pm 20 \%$ nach VDE 0185-305-1, LPL I zugrunde gelegt, während die Stromstärke variiert wurde. Um von den Umweltbedingungen unabhängig zu sein, wurde bei den Versuchen durchweg eine Umgebungstemperatur von $\vartheta_u \approx 21^\circ\text{C}$ eingehalten.

Als Prüfbjekte wurden Aluminium-Platten mit einer Dicke von 2 mm und einer Größe von 400x400 mm verwendet. Da Beschichtungen der Oberfläche in der Luft- und Raumfahrt zunehmend an Bedeutung gewinnen (siehe [109] [110]), wurden neben unbeschichteten Platten auch mit Farbe beschichtete Platten untersucht. Dazu wurde Flugzeuglack mit einer Dicke von 300 μm auf die Aluminium-Platten aufgetragen.

Bei den Versuchen kam es zum Teil zu erheblicher Rauch-Entwicklung, wodurch sich Ruß auf den Aluminium-Platten ablagerte. Um diesen Ruß zu entfernen, wurden die Platten nach jedem Versuch mit Ethanol gereinigt. Die Reinigung wurde allerdings nur bei den unbeschichteten Platten durchgeführt, damit die Lackschicht bei den beschichteten Platten durch das Ethanol nicht angegriffen wird.

Tabelle 12.1 enthält den Prüfplan. Bei den unbeschichteten Platten wird der Langzeitstrom (i_L) in sechs Stufen (Versuchsreihe-Nr. 1...6) beginnend von 100 A bis auf 4,5 kA erhöht. Bei jeder Stufe (bei jeder Versuchsreihe) wurden 10 einzelne Versuche durchgeführt. Für die unbeschichteten Aluminium-Platten ergibt sich somit ein Umfang von insgesamt 60 Versuchen. Bei den beschichteten Aluminium-Platten wurde der Langzeitstrom (i_L) in drei Stufen (Versuchsreihe 7, 8, 9) beginnend von 200 A bis auf 2,5 kA erhöht. Bei jeder Stufe wurden 5 einzelne Versuche durchgeführt, so dass sich ein Gesamtumfang von 15 Versuchen ergibt. Nach den Versuchen wurde für die jeweiligen Kenngrößen jeder Versuchsreihe der Mittelwert gebildet, um die Einflüsse einzelner Versuche zu eliminieren.

Bild 12.2 zeigt den Prüfaufbau. Eine indirekte Hochspannungs-Elektrode wurde im Abstand von 5 cm oberhalb der Aluminium-Platte positioniert. Die Aluminium-Platte ist in einem Messing-Rahmen eingespannt, welcher mit der Platte an allen vier Kanten kontaktiert ist. Der Messing-Rahmen ist mithilfe von flexiblen Kupferbändern mit der geerdeten Prüfplatte (siehe Anhang C) verbunden. Dies ermöglicht es, die Platte für neue Versuche an die entsprechenden Positionen zu verschieben. Die Stromeinspeisung erfolgt mittels eines Zünddrahts aus Kupfer mit einem Durchmesser von 0,1 mm (siehe Kapitel 4, Bild 4.1).

Versuchsreihe	i_L [A]	Anzahl Versuche	Beschichtung
1	100	10	Nein
2	200	10	Nein
3	500	10	Nein
4	1000	10	Nein
5	2000	10	Nein
6	4500	10	Nein
7	200	5	Ja
8	700	5	Ja
9	2500	5	Ja

Tabelle 12.1 Prüfplan zur Untersuchung der beschichteten und unbeschichteten Aluminium-Platten mit Langzeitströmen (Ladung $Q_L = 200 \text{ C} \pm 20 \%$)

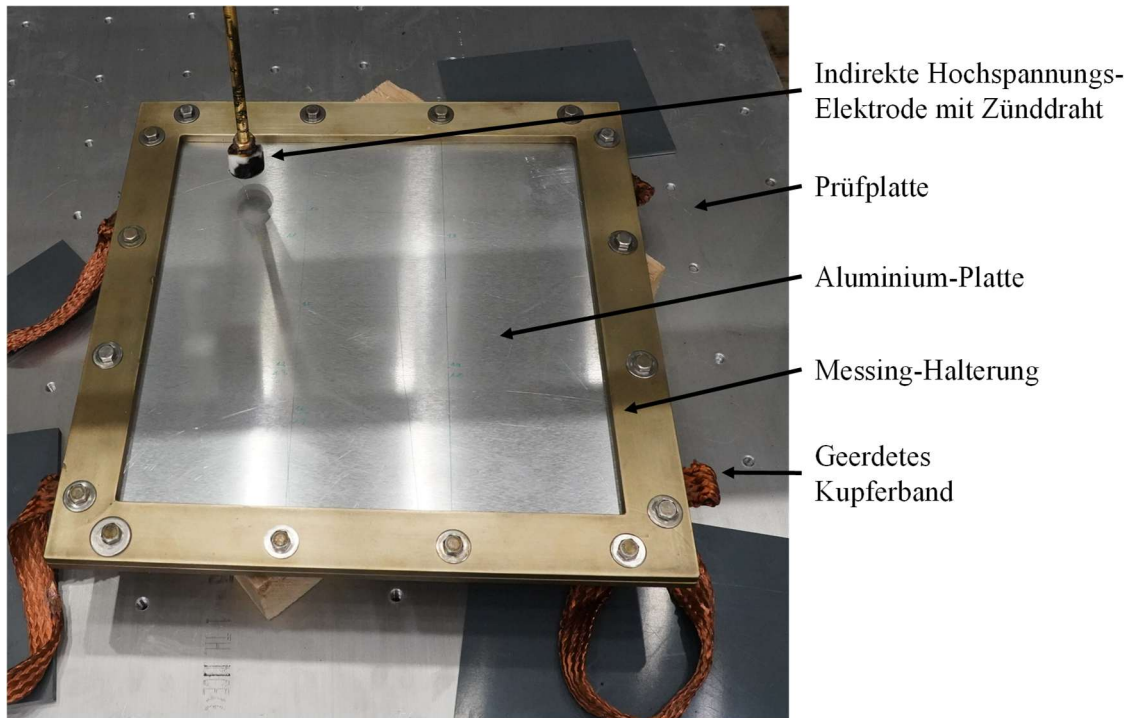


Bild 12.2 Prüfaufbau mit indirekter Hochspannungs-Elektrode und Aluminium-Platte als Prüfobjekt in einem Messing-Rahmen

Der zeitliche Verlauf der Langzeitströme wurde mit dem HighVolt-Mias-Messsystem (siehe Kapitel 10) aufgezeichnet und abgespeichert. Die Auswertung erfolgte anschließend mit dem Programm FlexPro 2019 [111]. Die Ladung wurde durch numerische Integration des Langzeitstroms gewonnen. Für die optischen Aufnahmen der Schadensbilder wurde eine Digitalkamera von Sony vom Typ Alpha III eingesetzt.

Gegenüber dem Prüfplan (Tabelle 12.1) kam es bei den tatsächlich durchgeführten Untersuchungen zu Abweichungen, die in Tabelle 12.2 zusammengestellt sind. Bei den insgesamt 75 Versuchen lag die Ladung des Langzeitstroms (Q_L) in 7 Fällen außerhalb der Toleranzen von $200 \text{ C} \pm 20 \%$. Diese Fälle wurden als Fehlversuche eingestuft und nicht weiter betrachtet. Aus den verbleibenden regulären Versuchen wurden für jede Stufe die Mittelwerte gebildet. Die Mittelwerte basieren auf 57 einzelnen Versuchen an unbeschichteten Platten und 11 einzelnen Versuchen an beschichteten Platten.

Die Auflistung in Tabelle 12.2 enthält die entsprechenden Mittelwerte (arithmetisches Mittel) für die Ladung Q_L , den durchschnittlichen Langzeitstrom ($i_{L\text{-mittel}}$) und den maximalen Langzeitstrom ($i_{L\text{-max}}$).

Versuchsreihe Nr.	Q_L (AM) [C]	i_{L-mittel} (AM) [A]	i_{L-max} (AM) [A]	Anzahl Fehl- Versuche
1	191	96	158	1
2	203	198	320	0
3	200	495	777	0
4	205	1024	1473	0
5	210	1826	2737	2
6	224	4757	6409	0
7	183	184	387	1
8	184	670	1072	1
9	183	2490	2901	2

Tabelle 12.2 Parameter der Langzeitströme aus den Versuchsreihen 1 bis 9 an beschichteten und unbeschichteten Aluminium-Platten

12.3 Ergebnisse der Untersuchungen an unbeschichteten Aluminium-Platten

Nach der Beaufschlagung der unbeschichteten Aluminium-Platten mit Langzeitströmen hat sich gezeigt, dass die Schadensbilder abhängig von der Höhe des Stroms zum Teil sehr unterschiedlich sind. Die Schadensbilder lassen sich in folgende Klassen einteilen:

- Schadensbild Klasse 1: Oberflächliche diffuse Anschmelzungen
- Schadensbild Klasse 2: Aufschmelzungen
- Schadensbild Klasse 3: Lochbildung
- Schadensbild Klasse 4: Oberflächliche lokal umrissene Anschmelzungen

12.3.1 Schadensbild Klasse 1: Oberflächliche diffuse Anschmelzungen

Das Schadensbild der Klasse 1 umfasst Schäden, die nur oberflächlich sind und nicht in die Tiefe gehen. Sie sind gekennzeichnet durch diffuse Anschmelzungen, oftmals mit Verfärbungen, die große Flächen bedecken, ohne dass eine ausgeprägte dominante Schadensstelle erkennbar ist. Da die Schädigungen nur bis zu einer Tiefe von maximal 0,5 mm in das Aluminium reichen, ist auf der Rückseite der 2 mm dicken Aluminium-Platten keinerlei Schaden ersichtlich.

Auch wenn die Schäden nur oberflächlich sind, so zeigen die Schadensbilder doch signifikante Unterschiede in ihrer Ausprägung. Bei der Ausprägung 1, die bis zu einer Stromstärke von etwa 500 A typisch ist, sind auf der Oberfläche der Aluminium-Platten

vornehmlich leichte Verfärbungen zu erkennen. Dies ändert sich, sobald die Stromstärke einen Wert von etwa 1 kA überschreitet. Ab einer Stromstärke von etwa 2 kA zeigt sich eine veränderte Ausprägung 2, die durch deutlich großflächigere Anschmelzungen auf der Oberfläche der Platten gekennzeichnet ist.

Bild 12.3 zeigt hierzu je ein Beispiel für die erste und zweite Ausprägung. Während bei der ersten Ausprägung (Bild 12.3 a) nur einzelne Spuren von Oberflächenschäden erkennbar sind, treten bei der zweiten Ausprägung (Bild 12.3 b) großflächige, fleckige Schäden auf.

Bild 12.4 zeigt in einer vergrößerten Darstellung zwei Beispiele für die Schäden auf der Vorderseite der Aluminium-Platten entsprechend der Ausprägung 2. Die Schäden weisen eine verästelte Struktur auf und erstrecken sich typischerweise parallel in länglicher Richtung. Möglicherweise ist die parallele Ausrichtung durch die Richtung des Magnetfelds erklärbar, was allerdings erst noch durch tiefergehende Untersuchungen bestätigt werden muss.

Die Bilder 12.3 und 12.4 zeigen, dass es sich sowohl bei der Ausprägung 1 als auch bei der Ausprägung 2 um diffuse oberflächliche Schäden handelt, die keine genaue Bestimmung des ausgeschmolzenen Aluminium-Volumens zulassen. Daher wurde für die Schadensbilder der Klasse 1 kein Schmelzvolumen bestimmt.

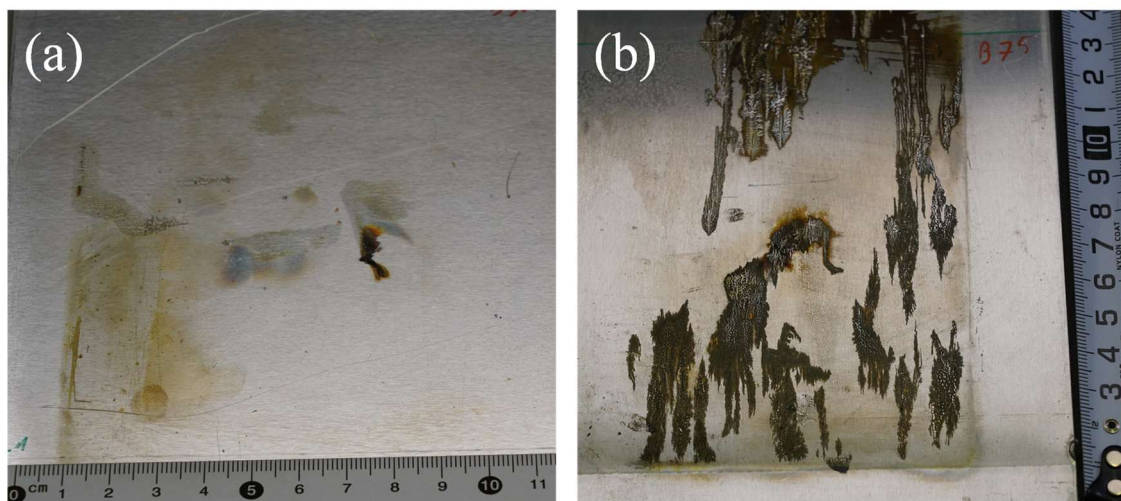


Bild 12.3 Schäden auf der Vorderseite der Aluminium-Platte entsprechend dem Schadensbild der Klasse 1 (oberflächliche diffuse Anschmelzungen) (a) mit der Ausprägung 1 (leichte Verfärbungen) und (b) mit der Ausprägung 2 (großflächige, fleckige Schäden)



Bild 12.4 Beispielhafte Darstellungen der Schäden entsprechend dem Schadensbild der Klasse 1 und der Ausprägung 2

12.3.2 Schadensbild Klasse 2: Aufschmelzungen

Das Schadensbild der Klasse 2 umfasst die tiefergehenden Schäden, bei denen das Aluminium von der Vorderseite der (2 mm dicken) Platte bis auf die Rückseite aufgeschmolzen ist, allerdings ohne ein Loch zu bilden. Die auf Vorderseite und Rückseite der Platte erkennbaren Aufschmelzungen sind annähernd kreisförmig. Bild 12.5 zeigt ein Beispiel. Auf der Vorderseite (Bild 12.5 a) und der Rückseite (Bild 12.5 b) zeigt sich jeweils eine kreisrunde Aufschmelzung, die typischerweise auf der Vorderseite einen größeren Durchmesser aufweist.

Das Schadensbild der Klasse 2 ist dadurch gekennzeichnet, dass der Lichtbogen-Fußpunkt in der Regel an einer Ansatz-Stelle auf der Aluminium-Platte stehen bleibt. In diesem Fall gibt es nur einen lokal begrenzten Bereich mit einer einzigen Aufschmelzung. Teilweise trat dies jedoch nicht ein, und der Lichtbogen bewegte sich, so dass durch die unterschiedlichen Ansatz-Stellen des Lichtbogens mehrere Bereiche mit Aufschmelzungen auf der Aluminium-Platte entstehen konnten.

Bild 12.6 zeigt hierfür ein Beispiel, wobei in Bild 12.6a fünf Bereiche mit Aufschmelzungen (rote Markierungen 1 ... 5) erkennbar sind. Jede einzelne dieser Aufschmelzungen hat einen geringeren Durchmesser gegenüber dem Fall einer einzigen Aufschmelzung (siehe Bild 12.6 b). Trotz der geringeren Durchmesser reichten jedoch die Aufschmelzungen stets bis zur Rückseite der Aluminium-Platte.

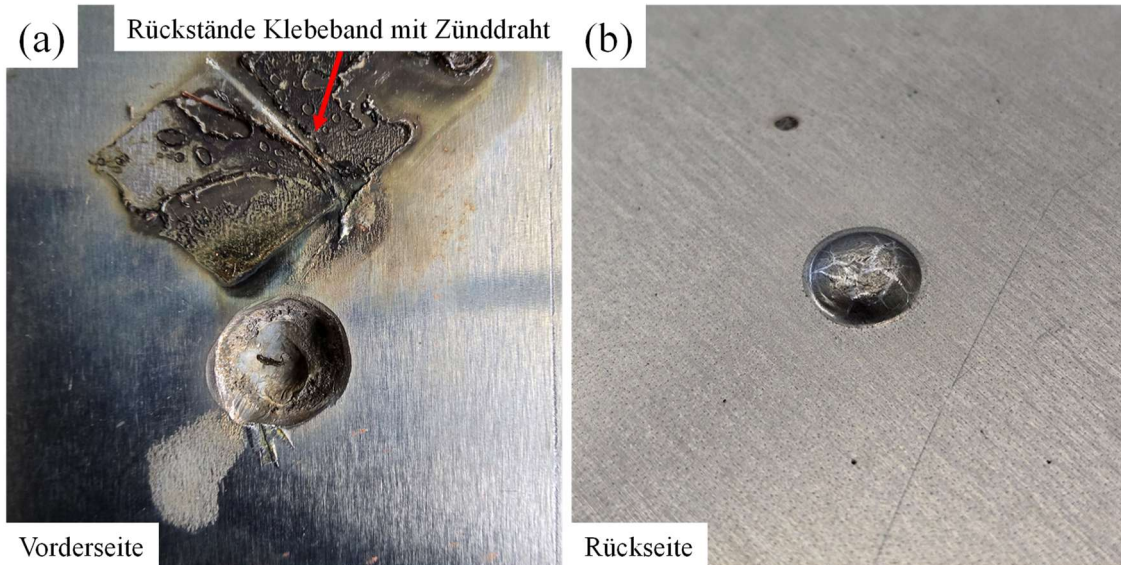


Bild 12.5 Schadensbild der Klasse 2 mit Aufschmelzungen (a) auf der Vorderseite und (b) auf der Rückseite der Aluminium-Platte

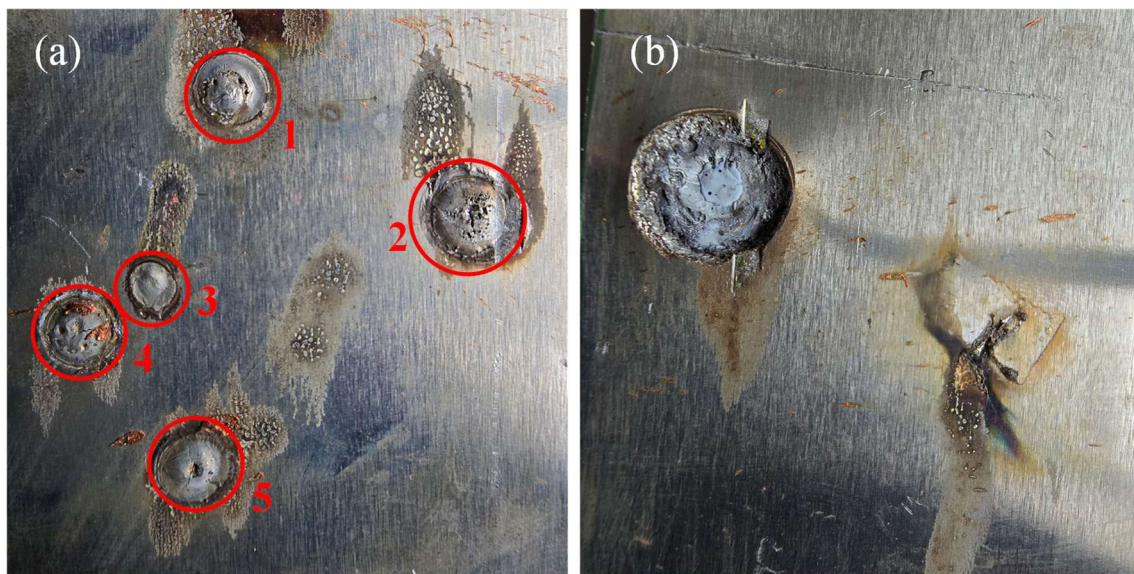


Bild 12.6 Schadensbild der Klasse 2 (a) mit fünf Bereichen mit Aufschmelzungen (rote Markierungen 1 ... 5) und (b) einem einzigen Bereich mit einer Aufschmelzung

Um das Volumen des aufgeschmolzenen Aluminiums (V_L) zu ermitteln, wurden die Radien der Aufschmelzungen auf der Vorder- und Rückseite der Aluminium-Platten bestimmt. Hierbei wurde angenommen, dass sich eine Aufschmelzung jeweils kegelförmig zwischen der Vorder- und Rückseite der Aluminium-Platte ausgebildet hat. Bild 12.7 zeigt eine schematische Darstellung des aufgeschmolzenen Volumens mit den Schmelzradien r_1 und r_2 auf der Vorder- und Rückseite der Aluminium-Platte (h : Dicke

der Platte). Das aufgeschmolzene Volumen (V_L) ergibt sich aus der Beziehung für den Kegelstumpf zu [112]:

$$V_L = \frac{h}{3} \cdot \pi \cdot (r_1^2 + r_1 \cdot r_2 + r_2^2) \quad (12.2)$$

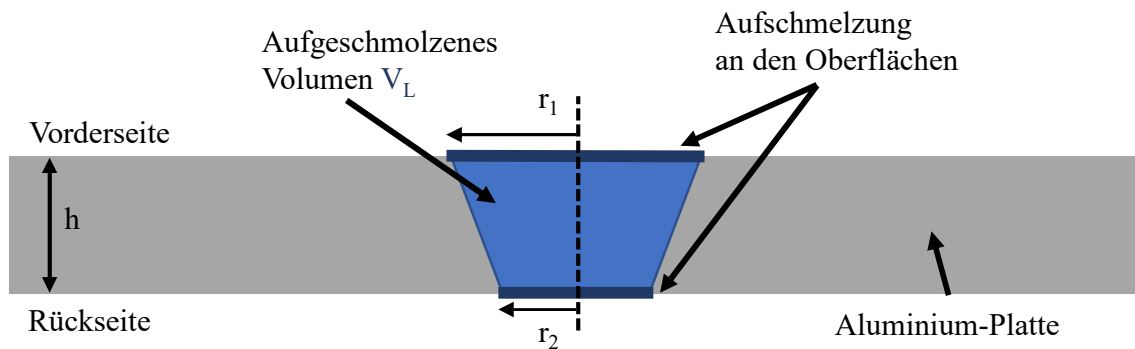


Bild 12.7 Schematische Darstellung des aufgeschmolzenen Aluminiumvolumens V_L

12.3.3 Schadensbild Klasse 3: Lochbildung

Das Schadensbild der Klasse 3 umfasst die Schäden, bei denen sich Löcher in der 2 mm dicken Aluminium-Platte bildeten. Bild 12.8 zeigt zwei Beispiele. Wie aus Bild 12.8a und Bild 12.8c erkennbar ist, sind die Löcher näherungsweise kreisförmig.

Während des Schmelzvorgangs tropft und gleitet das ausgeschmolzene Metall durch die Schwerkraft nach unten, wo es erstarrt. Dadurch entstehen Gebilde, die nach ihrem Erstarren auf der Rückseite der Aluminium-Platte als Ausstülpung sichtbar sind. Wie aus Bild 12.8b ersichtlich ist, kann diese Ausstülpung sehr groß sein und eine kegelförmige Form haben. Häufiger ist jedoch, dass der überwiegende Teil des geschmolzenen Aluminiums abtropft, so dass nur noch ein Restmaterial an den Rändern des Lochs verbleibt. Bild 12.8d zeigt hierzu ein Beispiel.

Bild 12.9 zeigt die schematische Darstellung des ausgeschmolzenen Aluminiums (V_L). Das Volumen der Ausschmelzung ist gegeben durch die Größe des Lochs einschließlich des aufgeschmolzenen Randbereiches, was auf der Vorderseite und Rückseite näherungsweise den gleichen Radius (r_1) aufweist. Mit der Dicke der Platte h ergibt sich das Volumen aus der Beziehung für einen Zylinder zu [112]:

$$V_L = \pi \cdot r_1^2 \cdot h \quad (12.3)$$



Bild 12.8 Zwei Beispiele für das Schadensbild der Klasse 3 mit (a, c) Lochbildung auf der Vorderseite und (b, d) abgetropftem Aluminium auf der Rückseite der Aluminium-Platte

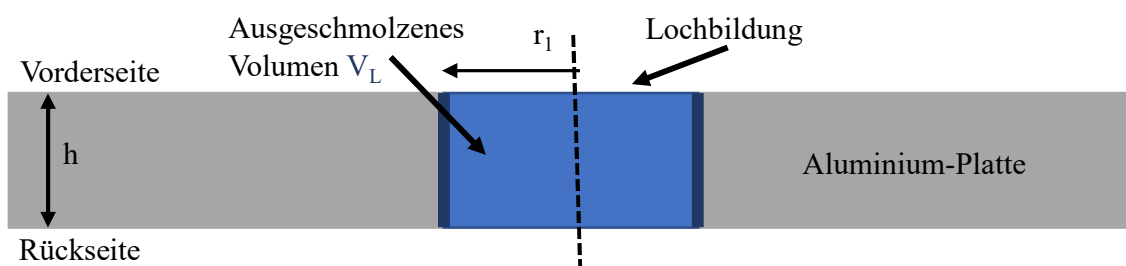


Bild 12.9 Schematische Darstellung des ausgeschmolzenen Volumens bei Lochbildung

12.3.4 Schadensbild Klasse 4: Oberflächliche lokal umrissene Anschmelzungen

Das Schadensbild der Klasse 4 umfasst den Fall, dass auf der Vorderseite der wiederum 2 mm dicken Aluminium-Platte ein räumlich eng umrissener Bereich mit einer deutlichen Anschmelzung erkennbar ist. Der Schaden ist lokal und oberflächlich, so dass auf der Rückseite der Platte keine Aufschmelzung erkennbar ist. Bild 12.10 zeigt hierfür ein Beispiel. Aufgrund der geringen Eindringtiefe des Schadens kann auch beim Schadensbild der Klasse 4 kein eindeutiges Schmelzvolumen bestimmt werden.

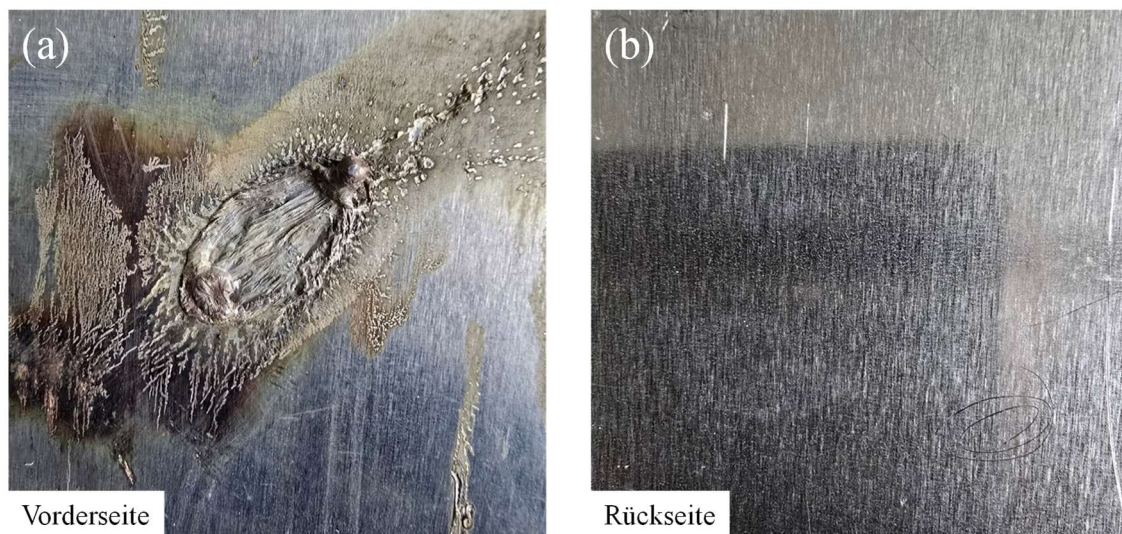


Bild 12.10 Typisches Schadensbild der Klasse 4 mit (a) oberflächlicher lokaler Anschmelzung auf der Vorderseite und (b) unbeschädigter Rückseite

12.3.5 Häufigkeit des Auftretens der Schadensbilder entsprechend der Klassen

Die Anzahl der Schäden entsprechend der Schadensbild-Klasse (1 bis 4) sind in Tabelle 12.3 zusammengestellt. Die Zahlen in den Kästchen entsprechen der Häufigkeit des Auftretens. Insgesamt 29 Platten wurden bei relativ geringen Langzeitströmen bis 500 A geprüft. Nach der Prüfung wiesen 26 Platten (90 %) ein Schadensbild nach Klasse 2 auf, d.h. Aufschmelzungen waren sowohl auf der Vorderseite als auch auf der Rückseite der Aluminium-Platte erkennbar. In den restlichen 3 Fällen (10 %) waren nur leichte Verfärbungen auf der Vorderseite entsprechend dem Schadensbild der Klasse 1 (Ausprägung 1) erkennbar. Lochbildung trat in keinem Fall auf.

Bei höheren Strömen von ~ 1 kA und ~ 2 kA waren nur in 2 (10 %) von 19 Fällen Aufschmelzungen auf der Vorder- und Rückseite der Aluminium-Platte entsprechend dem Schadensbild nach Klasse 2 erkennbar. Dagegen überwog das Schadensbild der Klasse 3 mit Lochbildung in 12 Fällen (63 %). In 5 Fällen (26 %) waren die Schäden nur oberflächlich entsprechend dem Schadensbild der Klasse 4 (4 Fälle) bzw. dem Schadensbild der Klasse 1 (Ausprägung 2).

Bei noch höherem Strom von ~ 5 kA trat weder eine Lochbildung (Schadensbild der Klasse 3) auf, noch waren Aufschmelzungen auf der Rückseite der Aluminium-Platte (Schadensbild nach Klasse 2) erkennbar. In allen zehn Fällen waren die Schäden nur oberflächlich mit einem Schadensbild nach Klasse 1 in 6 Fällen (60 %) und nach Klasse 4 in 4 Fällen (40 %).

Versuchsreihe	SB-Klasse 1		SB-Klasse 2	SB-Klasse 3	SB-Klasse 4
	Ausprägung 1	Ausprägung 2			
1 (~ 100 A)	2		7		
2 (~ 200 A)			10		
3 (~ 500 A)	1		9		
4 (~ 1 kA)			1	5	4
5 (~ 2 kA)		1	1	7	
6 (~ 5 kA)		6			4

Tabelle 12.3 Schäden entsprechend den Schadensbild (SB)-Klassen 1 bis 4 bei den Versuchen mit unbeschichteten Aluminium-Platten. Die Zahlen in den Kästchen entsprechen der Häufigkeit des Auftretens.

12.3.6 Geschmolzenes Volumen

In Tabelle 12.4 sind die Mittelwerte der geschmolzenen Volumina (V_L) aus den Versuchsreihen 1 bis 6 (~ 100 A bis ~ 5 kA) zusammengestellt. Da sich bei den Schadensbildern der Klassen 1 und 4 das geschmolzene Volumen nicht bestimmen lässt, beschränkt sich die Auswertung auf die Schadensbilder der Klasse 2 (kein Loch: $V_{L\text{-Kein-Loch}}$) und der Klasse 3 (Lochbildung: $V_{L\text{-Loch}}$).

Beim Schadensbild der Klasse 2 (kein Loch) steigt das geschmolzene Volumen mit Zunahme des Stroms von anfänglich 117 mm^3 bei Versuchsreihe 1 (~ 100 A) auf 281 mm^3 bei Versuchsreihe 5 (~ 2 kA) an.

Beim Schadensbild der Klasse 3 (Lochbildung) beschränkt sich die Auswertung auf Versuchsreihe 4 (~1 kA) und Versuchsreihe 5 (~2 kA), da weder bei kleineren noch bei größeren Strömen eine Lochbildung zu beobachten war. Bemerkenswert ist, dass bei gleicher geflossener Ladung das geschmolzene Volumen bei 2 kA mit 406 mm³ etwa doppelt so groß war wie bei 1 kA mit 213 mm³.

Für Versuchsreihe 6 (5 kA) konnte kein geschmolzenes Volumen ermittelt werden, da in diesem Fall (bei höchstem Strom) interessanterweise die Schäden nur oberflächlich auf der Vorderseite und somit nicht bestimmbar waren.

Versuchsreihe	1 (~100 A)	2 (~200 A)	3 (~500 A)	4 (~1 kA)	5 (~2 kA)	6 (~5 kA)
V _{L-Kein-Loch} [mm ³]	117	86	173	184	281	-
V _{L-Loch} [mm ³]	-	-	-	213	406	-

Tabelle 12.4 Mittleres geschmolzenes Volumen (V_L) bei den Versuchsreihen 1 bis 6, wobei zwischen den Schadensbildern der Klasse 2 (V_{L-Kein-Loch}) und der Klasse 3 (V_{L-Loch}) unterschieden ist

12.4 Ergebnisse der Untersuchungen an beschichteten Aluminium-Platten

Bei den beschichteten Aluminium-Platten traten zwar sehr häufig Lackschäden auf, oberflächliche Anschmelzungen des Aluminiums auf der Vorderseite wie bei den unbeschichteten Platten waren jedoch nicht erkennbar. Daher reduzieren sich die Schäden auf die Ausschmelzungen entsprechend den Schadensbildern der Klasse 2 (Aufschmelzungen auf Vorder- und Rückseite) und der Klasse 3 (Lochbildung) (siehe Kapitel 12.3.2/12.3.3).

Bild 12.11 zeigt ein typisches Beispiel für das Schadensbild der Klasse 2. Neben der Aufschmelzung auf der Vorderseite (Bild 12.11a) ist die Beschichtung rund um die Aufschmelzung punktförmig abgelöst. Dies ist vermutlich auf die Hitzestrahlung durch den brennenden Lichtbogen zurückzuführen. Die Aufschmelzung auf der Rückseite (Bild 12.11b) ist vergleichbar mit dem Schadensbild an unbeschichteten Aluminium-Platten.

Bild 12.12 zeigt ein typisches Beispiel für das Schadensbild der Klasse 3. Auf der Vorderseite der beschichteten Platte (siehe Bild 12.12a) sind um das Loch wiederum punktuelle Ablösungen der Beschichtung zu erkennen. Auf der Rückseite hinterließ die abfließende Schmelze zwei halb-kugelförmige Anhäufungen von erstarrtem Metall (siehe Bild 12.12b).

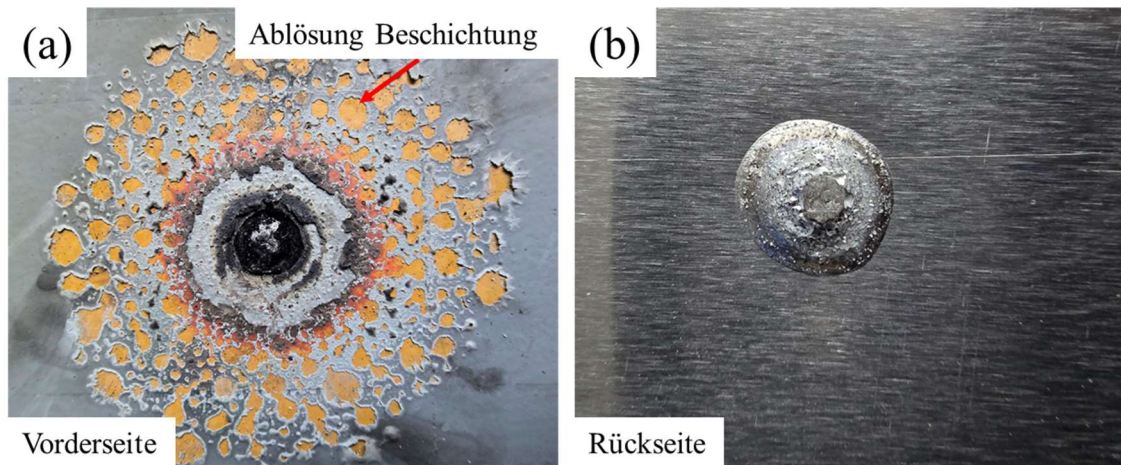


Bild 12.11 Typisches Schadensbild der Klasse 2 (a) auf der beschichteten Vorderseite und (b) der unbeschichteten Rückseite

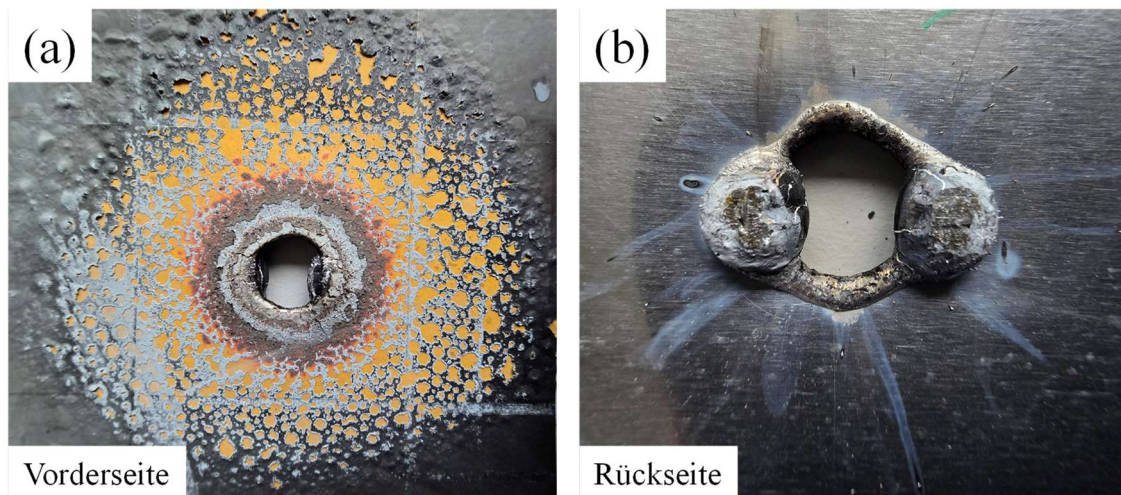


Bild 12.12 Typisches Schadensbild der Klasse 3 (a) auf der beschichteten Vorderseite und (b) der unbeschichteten Rückseite

Die Anzahl der Schäden entsprechend den Schadensbild-Klassen 2 und 3 sind in Tabelle 12.5 zusammengestellt. Die Zahlen in den Kästchen entsprechen der Häufigkeit des Auftretens. Insgesamt vier Platten wurden bei einem relativ geringen Langzeitstrom von etwa 200 A geprüft (Versuchsreihe 7). In allen Fällen gab es keine Lochbildung, das Aluminium war aber bis auf die Rückseite durchgeschmolzen, wobei das geschmolzene Volumen im Mittel 197 mm^3 betrug.

Jeweils drei Platten wurden mit einem höheren Langzeitstrom von $\sim 700 \text{ A}$ (Versuchsreihe 8) bzw. $\sim 2,5 \text{ kA}$ (Versuchsreihe 9) geprüft. In sechs Fällen kam es zur Lochbildung. Das geschmolzene Volumen erhöhte sich von 220 mm^3 auf 308 mm^3 bei Zunahme des

(mittleren) Langzeitstroms von ~ 700 A auf $\sim 2,5$ kA. In einem Fall (bei einem Langzeitstrom von ~ 700 A) war das geschmolzene Volumen mit 12 mm^3 äußerst klein, was auf eine Fehlmessung hindeutet. Daher wird dieser Versuch im Folgenden nicht weiter bewertet (siehe grau unterlegter Bereich in Tabelle 12.5).

Versuchsreihe Nummer	Schadensbild Klasse 2 (keine Lochbildung)		Schadensbild Klasse 3 (Lochbildung)	
	Zahl	$V_L [\text{mm}^3]$	Zahl	$V_L [\text{mm}^3]$
7 (~ 200 A)	4	197		
8 (~ 700 A)	1	12	3	220
9 ($\sim 2,5$ kA)			3	308

Tabelle 12.5 Mittleres geschmolzenes Volumen (V_L) bei den Versuchsreihen 7 bis 9

12.5 Bestimmung des Anoden-/Kathodenspannungsfalls aus den Untersuchungen mit der indirekten Elektrode

Tabelle 12.6 enthält eine Zusammenstellung der Mittelwerte des Langzeitstroms (i_L), der Ladung (Q_L) dieses Langzeitstroms sowie des geschmolzenen Volumens (V_L). Hierbei wird unterschieden zwischen den Versuchen mit den unbeschichteten Platten (Versuchsreihe 1 bis 6) und den Versuchen mit den beschichteten Platten (Versuchsreihe 7 bis 9). Bei den Versuchsreihen 4 und 5 basieren die Werte für das geschmolzene Volumen auf den Versuchen mit Lochbildung, die gegenüber den Versuchen ohne Lochbildung den ‚worst case‘ darstellen.

Aus dem geschmolzenen Volumen (V_L) wurde dann mit Gleichung (12.1) der Anoden-/Kathodenspannungsfall $u_{a/c}$ berechnet. Bei den Langzeitströmen bis 500 A beträgt der Anoden-/Kathodenspannungsfall maximal 2,3 V. Dieser Wert ist um etwa eine Größenordnung geringer als bisher angenommen (siehe z.B. [6] [8]). Ferner ist der Anoden-/Kathodenspannungsfall nicht unabhängig von der Höhe des Langzeitstroms, sondern steigt mit Zunahme des Stromwertes an. Dies gilt gleichermaßen für die beschichteten als auch für die unbeschichteten Platten. Aber selbst bei dem relativ hohen Langzeitstrom von etwa 2 kA übersteigt der Anoden-/Kathodenspannungsfall nur unwesentlich den Wert von 5 V.

In [94] und [108] sind Schäden durch größere Ausschmelzungen und einen entsprechend höheren Anoden-/Kathodenspannungsfall für Langzeitströme beschrieben. Bei den dort durchgeführten Versuchen wurden jedoch unter anderem direkte Hochspannungs-Elektroden verwendet. Ein weiterer Unterschied war der Abstand der Elektrode von den Metallplatten, der häufig kleiner als 5 cm war.

Aus diesem Anlass wurden zusätzlich Versuche mit direkter Elektrode und geringerem Abstand durchgeführt. Das anschließende Kapitel widmet sich diesen Versuchen und dem Vergleich mit den Versuchen mit indirekter Elektrode.

	Unbeschichtete Aluminium-Platte						Beschichtete Aluminium-Platte		
Versuchsreihe	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$i_{L\text{-mittel}}$ [A]	96	198	495	1024	1826	4757	184	670	2490
Q_L [C]	191	203	200	205	210	183	184	183	183
V_L [mm ³]	117	86	173	213	406	-	197	220	308
$u_{a/c}$ [V]	1,6	1,1	2,3	2,7	5,1	-	2,8	3,1	4,4

Tabelle 12.6 Kennwerte aus den Versuchsreihen 1 bis 9 und dem daraus mit Gleichung (12.1) abgeleiteten Anoden-/Kathodenspannungsfall $u_{a/c}$ (Elektrodenabstand: 5 cm)

12.6 Ergebnisse der ergänzenden Untersuchungen mit einer direkten Elektrode

In Ergänzung zu den oben beschriebenen Versuchen mit indirekter Elektrode, wurden zusätzlich drei Versuchsreihen mit direkter Elektrode durchgeführt. Dabei wurden nur unbeschichtete Aluminium-Platten mit einer Dicke von 2 mm geprüft. Bei diesen Versuchsreihen wurde der (mittlere) Strom zu ~200 A, ~1 kA und ~5 kA gewählt. Jede Versuchsreihe umfasste je 2 Versuche bei je einem Elektrodenabstand (zur Platte) von 2,5 cm und 5 cm. Als direkte Elektrode diente ein Wolfram-Kupferstab (Durchmesser: 14 mm) mit halbkugel-förmigem Abschluss.

In Tabelle 12.7 sind die aus jeweils zwei Messungen gebildeten (arithmetischen) Mittelwerte der Ladung (Q_L), des Stroms (i_L) und des geschmolzenen Volumens (V_L) zusammengestellt. Aus dem geschmolzenen Volumen (V_L) wurde mit Gleichung (12.1) der Anoden-/Kathodenspannungsfall $u_{a/c}$ berechnet.

Der Vergleich mit Tabelle 12.6 zeigt, dass das Schmelzvolumen bei Verwendung einer

direkten Hochspannungs-Elektrode zum Teil erheblich größer ist als bei einer indirekten. Wurde beispielsweise für Langzeitströme von ~ 200 A bei Verwendung einer indirekten Elektrode ein Anoden-/Kathodenspannungsfall von 1,1 V festgestellt, ist dieser bei gleichem Strom und gleichem Elektroden-Abstand (von 5 cm) und bei Verwendung der direkten Elektrode mit 5,5 V etwa fünfmal so groß.

Zudem ergab sich, dass sich das Schmelzvolumen mit Reduzierung des Elektroden-Abstands vergrößert und der Anoden-/Kathodenspannungsfall entsprechend ansteigt. Besonders deutlich wird der Unterschied bei der zusätzlichen Versuchsreihe 3. Beim Elektroden-Abstand von 5 cm beträgt das ausgeschmolzene Volumen 366 mm^3 und steigt bei Reduktion des Abstandes auf 2,5 cm auf 905 mm^3 an. In gleichem Maße steigt der Anoden-/Kathodenspannungsfall auf mehr als das Doppelte von 4,3 V auf 10,3 V an.

Zusatzversuchsreihe	1		2		3	
Elektrodenabstand	5 cm	2,5 cm	5 cm	2,5 cm	5 cm	2,5 cm
i_L [A]	209	215	990	1049	4578	4629
Q_L [C]	216	224	206	216	224	229
V_L [mm ³]	450	576	635	693	366	905
$u_{a/c}$ [V]	5,5	6,7	8,1	8,4	4,3	10,3

Tabelle 12.7 Kennwerte aus den Zusatzversuchen mit direkter Elektrode und dem daraus mit Gleichung (12.1) abgeleiteten Anoden-/Kathodenspannungsfall $u_{a/c}$

12.7 Vergleich der Ergebnisse bei direkter und indirekter Elektrode

Bild 12.13 zeigt in einem gemeinsamen Diagramm den Anoden-/Kathodenspannungsfall in Abhängigkeit des Langzeitstroms für die beschichteten und die unbeschichteten Aluminium-Platten. Bei Verwendung der indirekten Elektrode (blaue und orange Punkte) beträgt der Elektroden-Abstand 5 cm, während er bei Verwendung einer direkten Elektrode (graue und gelbe Punkte) zwischen 2,5 cm und 5 cm variiert.

Die orangene und die blaue Kurve sind die Ausgleichsgeraden für die beschichtete und die unbeschichtete Aluminium-Platte bei Verwendung der indirekten Elektrode. Die Ausgleichsgeraden wurden der Vollständigkeit halber zu großen Werten hin extrapoliert (gestrichelte Geraden), wenngleich Langzeitströme über 2,5 kA keine bestimmbareren Ausschmelzungen verursachten. Die gelbe Ausgleichsgerade liegt deutlich über diesen Geraden, was wiederum bedeutet, dass die direkte Elektrode deutlich größere Ausschmelzungen als die indirekte Elektrode verursacht.

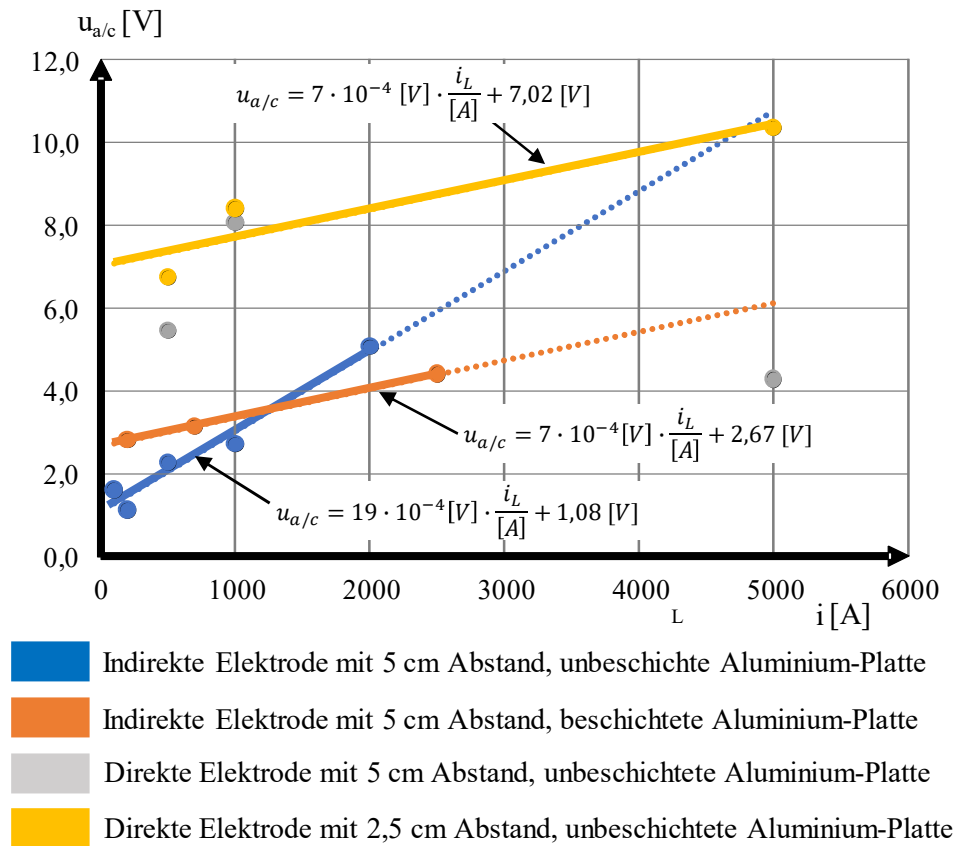


Bild 12.13 Anoden-/Kathodenspannungsfall $u_{a/c}$ (Messpunkte und Ausgleichsgeraden) in Abhängigkeit vom Langzeitstrom i_L bei direkter und indirekter Hochspannungs-Elektrode

12.8 Untersuchung des Lichtbogens mittels Hochgeschwindigkeitskamera

Die Untersuchungen mit Langzeitströmen an unbeschichteten Aluminium-Platten haben gezeigt, dass bei einer Stromstärke bis etwa 2 kA die Ausschmelzungen in die Tiefe gehen können bis hin zum Durchlöchern der Platten. Im Gegensatz hierzu sind die Schäden an den Platten nur oberflächlich, wenn die Stromstärke auf ~5 kA erhöht wird (siehe Kapitel 12.3.5). Dies deutet darauf hin, dass sich das Verhalten des brennenden Lichtbogens ab etwa 2 kA signifikant ändert.

Um dieses Verhalten zu untersuchen, wurde der Entladungsvorgang bei Langzeitströmen von ~2 kA und ~5 kA mit einer Hochgeschwindigkeitskamera (Firma: PCO Typ: dimax HS4) aufgenommen. Die Bildrate betrug hierbei etwa 20.000 Bilder pro Sekunde (genau: 19.703 Bilder pro Sekunde). Weiterhin wurde dazu eine indirekte Elektrode im Abstand von 5 cm über der Platte positioniert und ein Zünddraht aus Kupfer mit einem Durchmesser von 0,1 mm verwendet.

12.8.1 Spektralbereich der Aufnahmen mit der Hochgeschwindigkeitskamera

Bild 12.14a zeigt eine Aufnahme mit der Hochgeschwindigkeitskamera ohne Verwendung eines Spektralfilters. Wie aus dem Bild hervorgeht, ist der Plasmakanal nicht erkennbar, da er von störenden Leuchterscheinungen anderer Lichtquellen überlagert ist. Hierzu zählt vor allem das verdampfte und extrem erhitzte Metall der Hochspannungselektrode und des Zünddrahts.

Andere Untersuchungen haben gezeigt, dass das vom Plasma abgestrahlte Licht einen Spektralbereich aufweist, der eine markante Spektrallinie bei etwa 650 nm aufweist [113]. Dies entspricht der Spektrallinie des O_3 -Ions [114] [115]. Daher wurde die Hochgeschwindigkeitskamera mit einem Spektralfilter ausgestattet, der den Spektralbereich auf $650 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$ beschränkt. Bild 12.14b zeigt eine Aufnahme bei Verwendung des Spektralfilters. Wie zu erkennen ist, sind die störenden Leuchterscheinungen anderer Lichtquellen ausgeblendet und der Plasmakanal des brennenden Lichtbogens ist dadurch sichtbar.

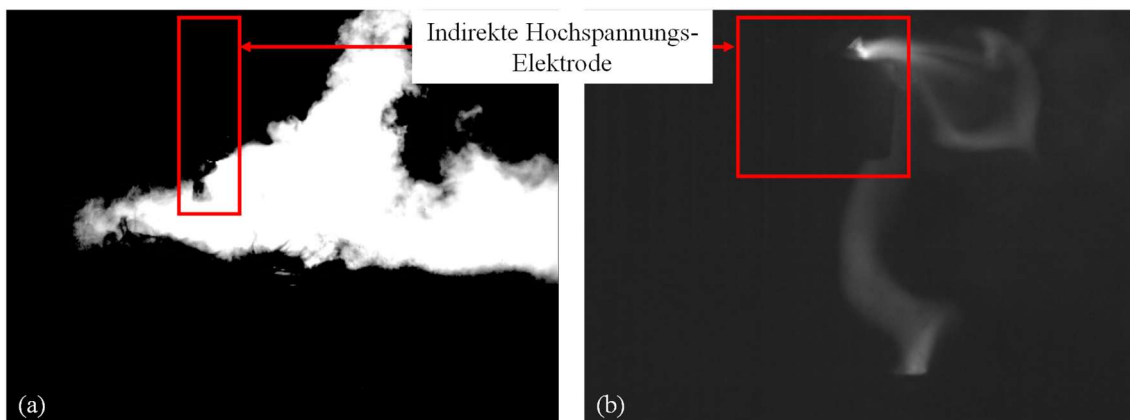


Bild 12.14 Aufnahme des Lichtbogens mit der Hochgeschwindigkeitskamera (a) ohne Verwendung eines Spektralfilters und (b) bei Verwendung eines Spektralfilters

12.8.2 Verhalten des Zünddrahtes

Bild 12.15 zeigt beispielhaft den Schmelzvorgang des Zünddrahts bei Einsetzen des Langzeitstroms. Zu Beginn des Schmelzvorgangs kommt es zu punktueller Plasmabildung, jedoch sind noch einzelne Teile des Zünddrahts erkennbar (Bild 12.15a). Wie aus Bild 12.15b hervorgeht, hat sich 153 μs später ein frei brennender Lichtbogen herausgebildet. Dieses Verhalten hat sich unterschiedslos sowohl beim Langzeitstrom von 2 kA als auch beim Langzeitstrom von 5 kA gezeigt.

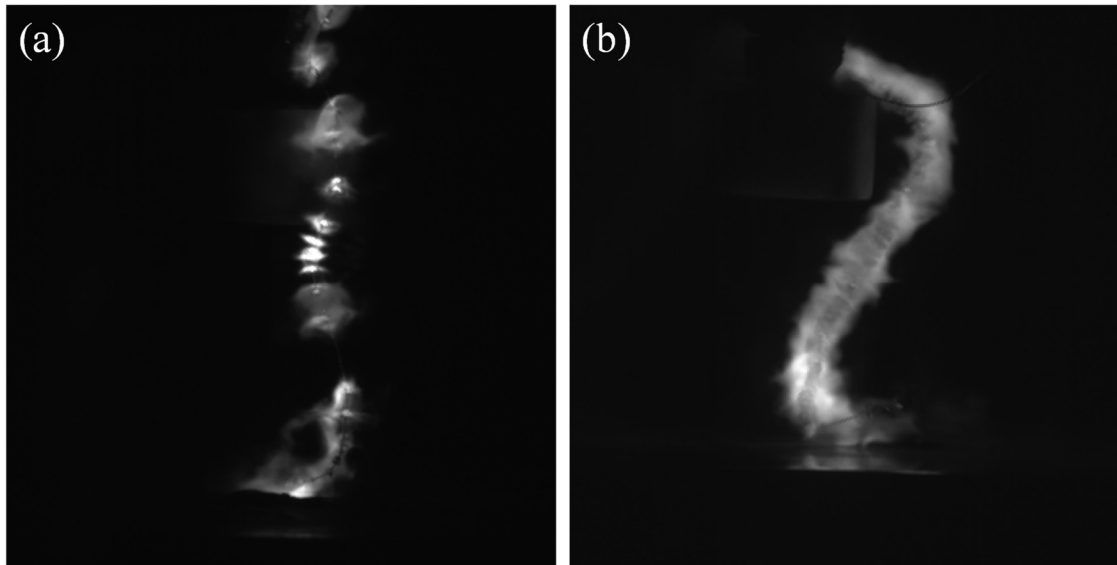


Bild 12.15 Schmelzvorgang des Zünddrahts (a) zu Beginn und (b) 153 μs später

12.8.3 Plasmakanal bei einem Langzeitstrom von 2 kA

Bild 12.16 zeigt das typische Verhalten des zwischen indirekter Hochspannungs-Elektrode und Aluminium-Platte brennenden Lichtbogens bei einem Langzeitstrom von ~ 2 kA. Der Lichtbogen weist nur einen Fußpunkt auf, welcher stationär war und in der Folgezeit nicht bzw. nicht wesentlich wanderte. Der daraus resultierende punktuelle Energieeintrag erklärt, warum die Schmelzvorgänge bis in die Tiefe reichen.

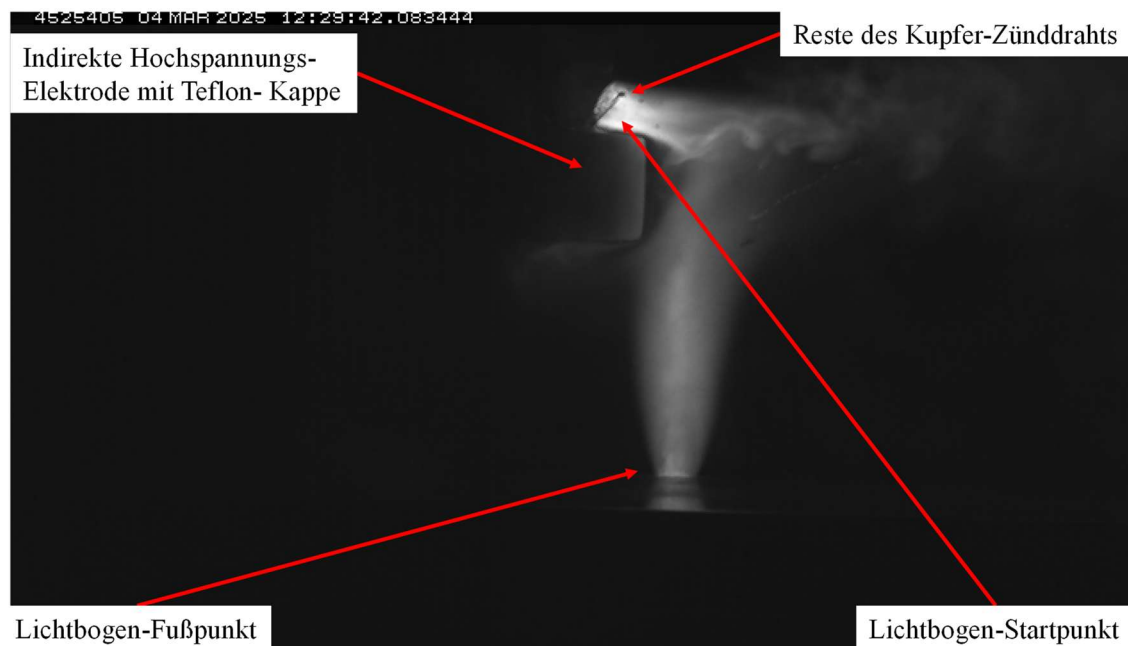


Bild 12.16 Lichtbogen zwischen indirekter Hochspannungs-Elektrode und Aluminium-Platte bei einem Langzeitstrom von ~ 2 kA

12.8.4 Plasmakanal bei einem Langzeitstrom von 5 kA

Bild 12.17 zeigt eine Serie von Aufnahmen mit der Hochgeschwindigkeitskamera bei einem Langzeitstrom von ~ 5 kA. Auf den einzelnen Bildern ist zu erkennen, dass sich der Lichtbogen in mehrere Lichtbögen verzweigt. Folglich hatte der Lichtbogen keinen einzelnen stationären Fußpunkt, sondern mehrere Fußpunkte, die zudem auf der Metalloberfläche wanderten. Die Verweildauer der einzelnen Fußpunkte an einer Stelle variierte stark zwischen einigen hundert Mikrosekunden bis hin zu über hundert Millisekunden. Aufgrund dieser kurzen Verweildauer und der Stromaufteilung auf mehrere Entladungskanäle ist ein tiefer gehender Schmelzvorgang nicht möglich. Dies erklärt, warum durch den Langzeitstrom nur eine oberflächliche Anschmelzung verursacht wird.

Vermutlich wird die Aufspaltung des Plasmakanals und dessen Bewegung durch Kräfte verursacht, die auf das hohe Magnetfeld zurückzuführen sind. Darauf deutet auch die Bewegung der Hochspannungs-Elektrode hin, die sich während des Versuchs um bis zu einige zehn Grad zur Seite hin neigte. Diese Neigung der Elektrode wurde beim geringeren Langzeitstrom von 2 kA nur ansatzweise festgestellt.

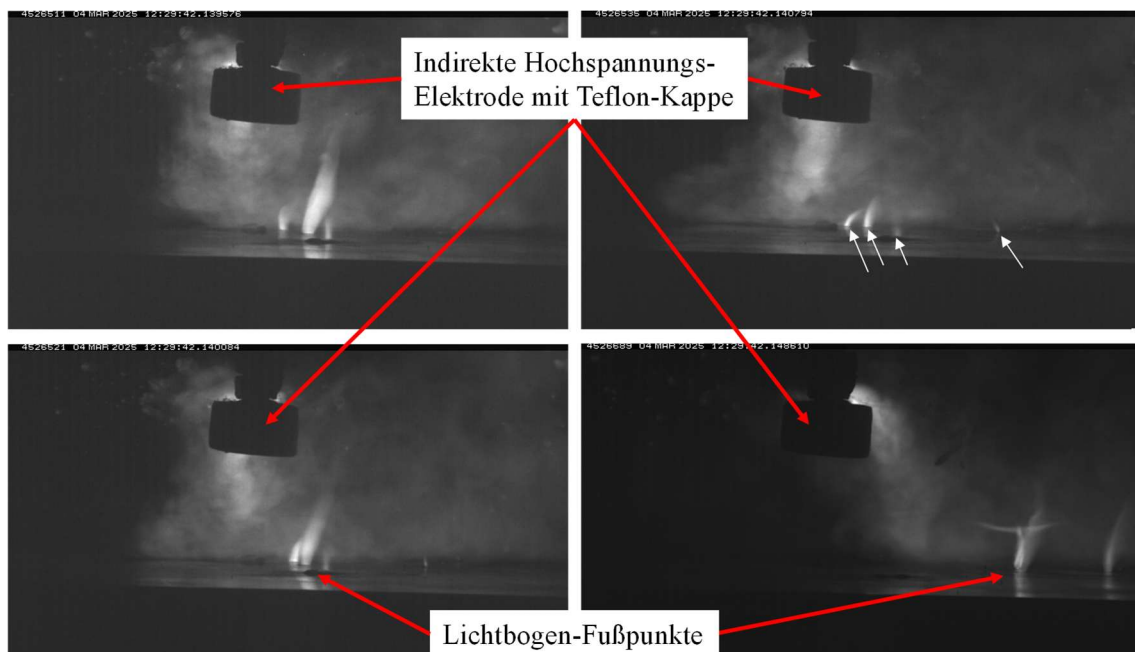


Bild 12.17 Typisches Verhalten des Lichtbogens bei einem Langzeitstrom von ~ 5 kA

12.9 Fazit der Untersuchungen

Das durch Langzeitströme ausgeschmolzene Volumen von Metallen (V_L) wird nach VDE 0185-305-1 [31] mit der Formel nach Gleichung (12.1) ermittelt. Die Gültigkeit dieser Formel wurde bei konstanter Ladung von 200 C und variablem Strom von etwa 100 A bis 5 kA an 2 mm dicken unbeschichteten Aluminium-Platten überprüft.

Im Rahmen der Untersuchungen wurde Folgendes festgestellt:

- Der Anoden-/Kathodenspannungsfall $u_{a/c}$ hängt nicht nur von der Ladung, sondern auch von der Höhe des Langzeitstroms ab. Daher stellt die Formel nach Gleichung (12.1) nur eine erste grobe Abschätzung dar.
- Der Anoden-/Kathodenspannungsfall $u_{a/c}$ beträgt typischerweise einige V und ist somit deutlich geringer als in der Literatur angegeben.
- Die Verwendung einer direkten Elektrode verursacht deutlich höhere Ausschmelzungen als bei Verwendung einer indirekten Elektrode.
- Nennenswerte tiefergehende Ausschmelzungen wurden für Langzeitströme bis etwa ~2 kA gemessen. Bei höheren Langzeitströmen von ~5 kA traten nur oberflächliche Anschmelzungen auf, die allerdings nicht quantifiziert werden können. Dies liegt auch daran, dass sich der Lichtbogen bei diesen höheren Strömen typischerweise in einzelne parallele Teillichtbögen aufspaltet, die zudem nur kurz an einer Stelle verweilen. Daher ist die Formel nach Gleichung (12.1) hierfür nicht anwendbar.

Im Falle beschichteter Aluminium-Platten wurde festgestellt, dass der Plasmakanal in der Regel an der ursprünglichen Stelle stehen bleibt. Das Ausmaß der Ausschmelzungen ist hier mit dem bei unbeschichteten Platten in etwa vergleichbar, wenngleich es für Ströme bis etwa 1 kA etwas größer ist.

13. Abschließende Bemerkungen und Ausblick

Wie in den vorangegangenen Kapiteln gezeigt wurde, lässt sich mit dem neuen Langzeitstrom-Generator ein breites Spektrum von Langzeitströmen erzeugen. Mit einer maximal erzeugbaren Ladung von 491 C und einem Strommaximum von 23,6 kA lassen sich sowohl die genormten Langzeitströme (VDE 0185-305-1, EUROCAE ED-84 und DIN EN IEC 61400-24, siehe Kapitel 11) als auch die ladungsstarken positiven Langzeitströme (siehe Kapitel 2 und 3) nachbilden.

Der neue Langzeitstrom-Generator besteht aus insgesamt 50 Kondensatoren die modular aufgebaut sind (siehe Kapitel 7). Der modulare Aufbau ermöglicht es, den Langzeitstrom-Generator entsprechend der geforderten Ladung und dem geforderten Strom individuell anzupassen. Durch den modularen Aufbau ließen sich auch weitere Kondensator-Module integrieren, um die Ladung und den Strom bei Bedarf weiter erhöhen zu können.

Unter Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten wäre es beispielsweise sinnvoll, zwei weitere Kondensator-Module mit insgesamt 24 Kondensatoren (mit je 4,4 mF) hinzuzufügen. Hierdurch könnte der Langzeitstrom-Generator auf eine Gesamt-Kapazität von etwa 0,33 F und damit auf eine maximale Energie von etwa 1 MJ erweitert werden. Durch diese Erweiterung könnten die Anforderungen nach DIN EN IEC 61400-24 zur Gänze erfüllt werden. Die dort geforderte Ladung von 600 C kann zwar bisher schon realisiert werden, allerdings nur unter Ausnutzung der unteren Toleranzgrenze.

Für eine feinere Einstellung des Langzeitstrom-Generators ist es wünschenswert, das Sondermodul (siehe Kapitel 7) um einen zusätzlichen Kondensator zu erweitern. Nach dieser Maßnahme könnte die Kapazität des Langzeitstrom-Generators lückenlos in 4,4 mF-Schritten verändert werden.

Die Komponente B (nach EUROCAE ED-84, siehe Anhang B) simuliert den einleitenden Stromimpuls des Langzeitstroms. In der vorliegenden Ausbaustufe kann die Komponente B nur in einem gewissen Rahmen in Kombination mit der Komponenten C bzw. C* realisiert werden. Dieser Nachteil könnte vermieden werden, wenn dem Langzeitstrom-Generator ein weiteres Modul hinzugefügt würde, das für die gesonderte Erzeugung der Komponente B ausgelegt ist. Durch die gesonderte Erzeugung der Komponente B könnten beide Komponenten zeitlich unabhängig voneinander ausgelöst werden. Damit wären beispielsweise Untersuchungen der Langzeitströme mit einleitendem Impuls in weitem Umfang möglich.

In Kapitel 12 wurde anhand untersuchter Aluminium-Platten ein Beispiel für die Anwendung des Langzeitstrom-Generators gegeben. Hierbei wurde festgestellt, dass die Schäden durch Langzeitströme nicht nur von deren Ladung, sondern auch von der Höhe des Stroms abhängen. Daneben sind offensichtlich auch noch weitere Parameter wie die Beschichtung der Platten von Bedeutung. Um die Einflüsse der einzelnen Parameter zu bestimmen, wären weitergehende Untersuchungen erforderlich, die allerdings den Umfang der vorliegenden Arbeit bei weitem übertreffen würden. Dies eröffnet jedoch vielfältige Möglichkeiten für künftige Forschungsvorhaben.

Wie die bereits in Kapitel 12 durchgeführten Untersuchungen zeigen, ist es ratsam, die künftigen Forschungsvorhaben durch fotografische Aufnahmen mit Hochgeschwindigkeits- und Wärmebildkameras zu komplettieren. Damit könnte die zeitliche und räumliche Ausbildung des Lichtbogens sowie das thermische Verhalten des Prüfobjektes näher bestimmt werden. Dies wäre die Grundlage zur Erforschung der Ursache für die Ausbildung der unterschiedlichen Schadensbilder.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der neue Langzeitstrom-Generator mit seinen umfangreichen Möglichkeiten der Variation und Adaption eine Vielzahl von Anstößen für künftige Forschungsprojekte bietet.

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand im Zeitraum von 2022 bis 2025 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter Offizier am Lehrstuhl für Elektrische Energienetze und Hochspannungstechnik an der Fakultät für Elektrische Energiesysteme und Informationstechnik der Universität der Bundeswehr München. Sie entstand in Zusammenarbeit und mit Unterstützung der Firma Airbus Defence and Space. Anlass war das nationenübergreifende Projekt zur Entwicklung zukünftiger Flugsysteme unter dem Namen „Future Combat Air System“.

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter Offizier unterstützt haben.

Zuerst gebührt mein Dank Prof. Dr.-Ing. habil. Fridolin Heidler, der meine Dissertation betreut und maßgeblich zum Gelingen beigetragen hat. Für seine hilfreichen Anregungen, wertvollen Ratschläge, seine hervorragende fachliche und wissenschaftliche Expertise und seine großzügige Förderung möchte ich mich bedanken.

Auch möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Christian Paul und Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Rock für die Übernahme der Mitberichterstattung sowie dem Vorsitzenden des Promotions-Prüfungsausschusses, Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Weyh bedanken.

Weiterhin bin ich Herrn Dr. rer. nat. Christian Karch sehr dankbar, der die Zusammenarbeit mit Airbus ermöglichte und mit vielen anregenden Diskussionen und Ratschlägen zum Fortgang dieser Dissertation beigetragen hat.

Außerdem möchte mich beim Leiter Studierendenbereich Herrn Dipl.-Päd. (univ.) Oberst Matthias Henkelmann für seine Fürsprache und das in mich gesetzte Vertrauen bedanken – sowie bei Herrn Dipl.-Ing. Fregattenkapitän Marcello Clemenz für seine Unterstützung während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter Offizier.

Bei allen Mitarbeitern und studentischen Hilfskräften des Instituts möchte ich mich für die gute Zusammenarbeit bedanken. Mein besonderer Dank gilt meinen geschätzten Kollegen Herrn Peter Hofknecht und Herrn Ralf Neumann für die Unterstützung bei der Umsetzung diverser Projekte. Dem Werkstattpersonal und insbesondere Herrn Marinus März danke ich für die Ausführung mechanischer Arbeiten.

Abschließend ein Dankeswort an meine Familie und meinen Freund, die mich während der gesamten Zeit an der Universität motiviert und auch bei rauer See begleitet haben.

Anhang A: Zeitverlauf und Wirkungsparameter von Impulsströmen, erzeugt mit kapazitiven Impulsstrom-Generatoren

Der hier behandelte Impulsstrom-Generator besteht aus einer Kapazität C und einem nachgeschalteten formenden Netzwerk, welches sich aus einem Widerstand R und einer Induktivität L zusammensetzt. Hierbei wird unterschieden zwischen Impulsstrom-Generatoren mit einfachem RLC-Kreis und solchen mit zusätzlichem Crowbar-Kreis. Je nach Wahl von R , L und C lässt sich ein Stoßstrom oder Langzeitstrom mit schwingendem oder unipolarem Verlauf realisieren.

A.1 Impulsstrom-Generator mit einfachem RLC-Kreis

Bild A.1 zeigt das Ersatzschaltbild eines Impulsstrom-Generators mit einfachem RLC-Kreis. Die Kapazität (C) wird auf die Ladespannung $U_{C/0}$ aufgeladen. Der Schalter S wird zum Zeitpunkt $t = 0$ geschlossen. Der RLC-Kreis besteht aus einem Widerstand (R), über welchem die Spannung u_R abfällt, einer Induktivität (L), über welcher die Spannung u_L abfällt, und der Kapazität (C) mit der zeitlich veränderlichen Spannung u_C . In dem RLC-Kreis fließt der Strom i .

Die Kapazität (C) kann aus einem einzelnen Kondensator bestehen, üblich ist allerdings bei größeren Impulsstrom-Generatoren, dass anstelle des Einzelkondensators eine Kondensatorbank verwendet wird, wobei die einzelnen Kondensatoren in Parallelschaltung betrieben werden. Die Induktivität (L) setzt sich zusammen aus der inneren Induktivität des Generators und der Induktivität des externen Prüfkreises einschließlich der Induktivität des Prüfobjektes. In analoger Weise wird der Widerstand (R) gebildet aus dem inneren Widerstand des Generators und dem externen Widerstand des Prüfkreises einschließlich des Widerstandes des Prüfobjektes.

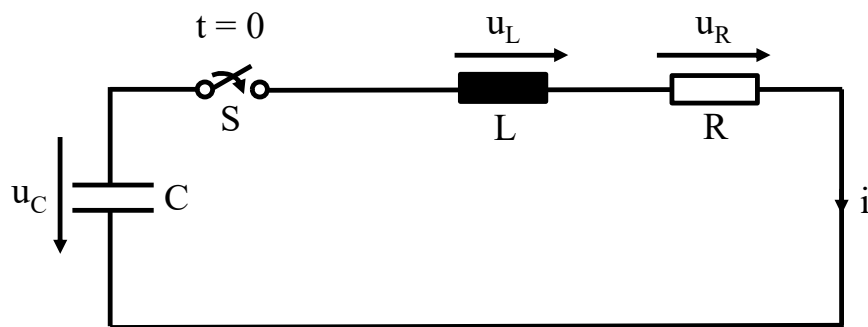


Bild A.1 Ersatzschaltbild eines Impulsstrom-Generators mit einfachem RLC-Kreis

Für die Kapazität, den Widerstand und die Induktivität gilt:

$$i = -C \cdot \frac{du_C}{dt} \quad (\text{A.1})$$

$$u_R = R \cdot i \quad (\text{A.2})$$

$$u_L = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (\text{A.3})$$

Aus dem Kirchhoffschen Maschensatz [116] folgt:

$$u_C = u_R + u_L \quad (\text{A.4})$$

Durch Ableiten ergibt sich:

$$\frac{du_C}{dt} = \frac{du_R}{dt} + \frac{du_L}{dt} \quad (\text{A.5})$$

Werden die Gleichungen (A.1), (A.2) und (A.3) in (A.5) eingesetzt, folgt:

$$-\frac{i}{C} = R \frac{di}{dt} + L \frac{di^2}{dt^2} \quad (\text{A.6})$$

Hieraus ergibt sich folgende homogene Differentialgleichung (DGL) zweiter Ordnung:

$$\frac{di^2}{dt^2} + \frac{R}{L} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{i}{L \cdot C} = 0 \quad (\text{A.7})$$

Für die Lösung der DGL wird folgender Strom zugrunde gelegt:

$$i = e^{\lambda t} \quad (\text{A.8})$$

Einsetzen von Gleichung (A.8) in Gleichung (A.7) führt auf folgende charakteristische Gleichung:

$$\lambda^2 + \frac{R}{L} \lambda + \frac{1}{LC} = 0 \quad (\text{A.9})$$

Hieraus folgt nach [117]:

$$\lambda_{1/2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \quad (\text{A.10})$$

Es gelten folgende Anfangsbedingungen nach [118]:

$$i(t = 0) = 0 \quad (\text{A.11})$$

und
$$\frac{di}{dt}(t = 0) = \frac{U_{L/0}}{L} \quad (\text{A.12})$$

Hierbei bezeichnet $U_{L/0}$ die Spannung an der Induktivität zum Zeitpunkt $t = 0$.

Abhängig davon, ob die Determinante $\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}$ positiv oder negativ ist oder zu null wird, ergeben sich 3 Fälle für den zeitlichen Stromverlauf, nämlich der Strom im aperiodisch gedämpften Fall, der Strom im aperiodischen Grenzfall und der Strom im periodisch gedämpften Fall. Hinzu kommt der (theoretische) Sonderfall des Stroms im periodisch ungedämpften Fall, für den verlustlosen Kreis ($R \rightarrow 0$).

A.1.1 Strom im aperiodisch gedämpften Fall

Für den aperiodisch gedämpften Fall gilt (siehe beispielsweise [118]):

$$\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC} > 0 \Rightarrow R > 2\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (\text{A.13})$$

Der zeitliche Verlauf des Stroms ist durch folgende Gleichung nach [117] [118] gegeben:

$$i(t) = \frac{U_{C/0}}{\sqrt{R^2 - \frac{4L}{C}}} \cdot (e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2}) \quad , \quad (\text{A.14})$$

mit den Dämpfungs-Zeitkonstanten

$$\tau_1 = \frac{1}{\frac{R}{2L} - \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}} \quad (\text{A.15})$$

und

$$\tau_2 = \frac{1}{\frac{R}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}} \quad (\text{A.16})$$

Aus $\frac{di}{dt} = 0$ folgt die Zeit des Strommaximums zu:

$$t_{\max} = \frac{\tau_1 \cdot \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \cdot \ln\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right) \quad (\text{A.17})$$

In Tabelle A.1 sind die wichtigsten Stromparameter nach [6] zusammengestellt. Dies sind das Strommaximum ($i_{\max}$), die maximale Stromsteilheit $\left(\left(\frac{di}{dt}\right)_{\max}\right)$, die Ladung ($Q = \int_0^{\infty} i \, dt$) und die spezifische Energie $(W/R) = \int i^2 \, dt$.

Strommaximum	$i_{\max} = \frac{U_{C/0}}{\sqrt{R^2 - \frac{4L}{C}}} \cdot (e^{-t_{\max}/\tau_1} - e^{-t_{\max}/\tau_2})$
Maximale Stromsteilheit	$\left(\frac{di}{dt}\right)_{\max} = \frac{U_{C/0}}{L}$
Ladung	$Q = \frac{U_{C/0}}{\sqrt{R^2 - \frac{4L}{C}}} \cdot (\tau_1 - \tau_2) = U_{C/0} \cdot C$
Spezifische Energie	$W/R = \frac{U_{C/0}^2}{2 \cdot \left(R^2 - \frac{4L}{C}\right)} \cdot \frac{(\tau_1 - \tau_2)^2}{\tau_1 + \tau_2}$

Tabelle A.1 Stromparameter für den aperiodisch gedämpften Fall nach [6]

A.1.2 Strom beim aperiodischen Grenzfall

Für den aperiodischen Grenzfall gilt nach [117] [118]:

$$\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC} = 0 \Rightarrow R = 2\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (\text{A.18})$$

Der zeitliche Verlauf des Stroms ist durch folgende Gleichung gegeben (siehe [117] [118]):

$$i(t) = \frac{U_{L/0}}{L} \cdot t \cdot e^{-t/\tau} \quad (\text{A.19})$$

mit der Dämpfungs-Zeitkonstante

$$\tau = \frac{2L}{R} \quad (\text{A.20})$$

und der Zeit des Strommaximums

$$t_{\max} = \tau \quad (\text{A.21})$$

In Tabelle A.2 sind die wichtigsten Stromparameter analog zu Tabelle A.1 nach [6] zusammengestellt.

Strommaximum	$i_{\max} = \frac{2}{e^1} \cdot \frac{U_{C/0}}{R} = 0,736 \cdot \frac{U_{C/0}}{R}$
Maximale Stromsteilheit	$\left(\frac{di}{dt}\right)_{\max} = \frac{U_{C/0}}{L}$
Ladung	$Q = U_{C/0} \cdot C$
Spezifische Energie	$W/R = \frac{U_{C/0}^2 \cdot C}{4} \cdot \sqrt{\frac{C}{L}}$

Tabelle A.2 Stromparameter für den aperiodischen Grenzfall nach [6]

A.1.3 Strom im periodisch gedämpften Fall

Für den Strom im periodisch gedämpften Fall gilt nach [117] [118]:

$$\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC} < 0 \Rightarrow R < 2\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (\text{A.22})$$

Der zeitliche Verlauf des Stroms ist durch folgende Gleichung gegeben [117] [118]:

$$i(t) = \frac{U_{C/0}}{\omega L} \cdot \sin(\omega t) \cdot e^{-t/\tau} \quad (\text{A.23})$$

mit der Dämpfungs-Zeitkonstanten

$$\tau = \frac{2L}{R} \quad (\text{A.24})$$

und der Kreisfrequenz

$$\omega = 2\pi f = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{1}{\tau^2}} \quad (\text{A.25})$$

In Tabelle A.3 sind die wichtigsten Stromparameter analog zu den Tabellen A.1 und A.2 nach [6] zusammengestellt. Die Richtung des Stromflusses ist für die zerstörerische Wirkung in der Regel nicht bedeutsam. Daher wird hier der Betrag des Stroms betrachtet und es gilt:

$$Q = \int_0^\infty |i| dt \quad (\text{A.26})$$

Strommaximum	$i_{\max} = U_{C/0} \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot e^{-\frac{\arctan(\omega\tau)}{\omega\tau}}$
Maximale Stromsteilheit	$\left(\frac{di}{dt}\right)_{\max} = \frac{U_{C/0}}{L}$
Ladung	$Q = \frac{U_{C/0}}{L \cdot (\omega^2 + \frac{1}{\tau^2})} \cdot \left(\frac{2}{1 - e^{-\pi/\omega\tau}} - 1 \right)$
Spezifische Energie	$W/R = \frac{U_{C/0}^2}{4 \omega^2 L^2} \cdot \frac{\tau}{1 + (1/\omega\tau)^2}$

Tabelle A.3 Stromparameter für den periodisch gedämpften Fall nach [6]

A.1.4 Beispiele für die zeitlichen Stromverläufe

Bild A.2 zeigt je einen beispielhaften Stromverlauf für die oben betrachteten Fälle. Wie zu erkennen ist, nimmt das Strommaximum mit Erhöhung des Widerstandes (R) ab und der Strom geht vom periodisch gedämpften Fall in den aperiodischen Fall über.

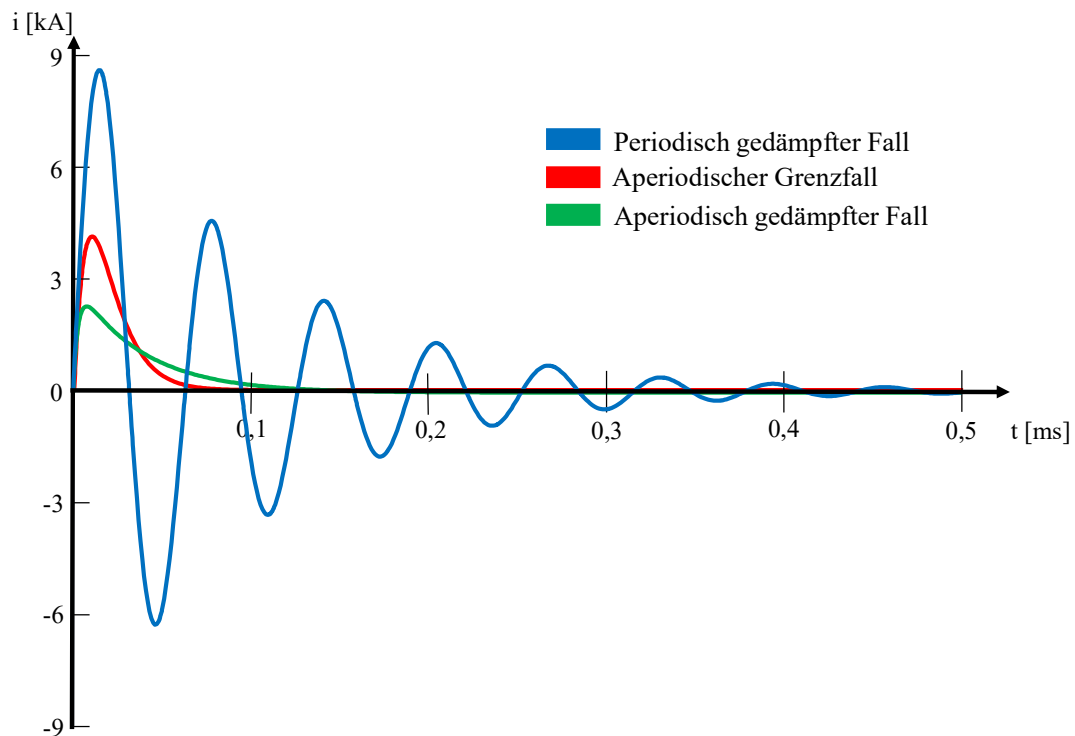


Bild A.2 Stromverläufe bei $C = 10 \mu\text{F}$, $L = 10 \mu\text{H}$ und $U_{C/0} = 10 \text{ kV}$ für
a) den periodisch gedämpften Fall ($R = 0,2 \Omega$)
b) den aperiodischen Grenzfall ($R = 2 \Omega$)
c) den aperiodisch gedämpften Fall ($R = 4 \Omega$)

A.1.5 Strom im periodisch ungedämpften Fall

Der periodisch ungedämpfte Fall setzt voraus, dass der Widerstand R zu null wird. Da dies bei realen Stromkreisen nicht erreicht werden kann, ist dies ein Sonderfall, der aus Gründen der Vollständigkeit hier betrachtet wird. Der Strom folgt unmittelbar aus Gleichung (A.23), indem der Widerstand zu $R \rightarrow 0$ gewählt wird. In diesem Fall gilt $\tau \rightarrow \infty$ und $\omega = 2\pi f = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ (siehe Gleichung (A.25)). Der Strom ist nach [84] gegeben durch:

$$i(t) = \frac{U_{C/0}}{\omega L} \cdot \sin(\omega t) = \frac{U_{C/0}}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \cdot \sin(\omega t) \quad (\text{A.27})$$

Mit $T = 1/f$ folgt die Periodendauer (T) der sinusförmigen Schwingung zu:

$$T = 2\pi\sqrt{LC} \quad (\text{A.28})$$

Bild A.3 zeigt das Ersatzschaltbild des Impulsstrom-Generators mit Crowbar-Schalter (CS). Der Generator beruht auf einem einfachen RLC-Kreis mit zusätzlichem Crowbar-Kreis. Hierbei bezeichnen R_i und L_i den Innenwiderstand und die innere Induktivität des Impulsstrom-Generators. R_{ex} und L_{ex} stehen für den äußeren Widerstand und die äußere Induktivität des RLC - Prüfkreises einschließlich des Prüfobjektes. R_{CS} und L_{CS} berücksichtigen den Widerstand und die Induktivität des Crowbar-Schalters.

Nachdem die Kapazität C auf die Ladespannung $U_{C/0}$ aufgeladen wurde, wird der Schalter S zum Zeitpunkt $t = 0$ geschlossen. Der Crowbar-Schalter (CS) bleibt hingegen zunächst geöffnet. Für den RLC-Kreis gilt der Widerstand $R_{RLC-Kreis} = R_i + R_{ex}$ und die Induktivität $L_{RLC-Kreis} = L_i + L_{ex}$. Da der Widerstand $R_{RLC-Kreis}$ sehr klein ist, ergibt sich zunächst ein Strom im periodisch gedämpften Fall mit geringer Dämpfung (siehe Bild A.2).

Wird der Crowbar-Schalter mit Erreichen des Strommaximums (zum Zeitpunkt t_{max}) geschlossen, kommutiert der Strom aus dem anfänglichen RLC-Kreis in den Crowbar-Kreis. Die anfänglich in der Kapazität C gespeicherte Energie ist jetzt in der Induktivität des Crowbar-Kreises gespeichert. Die Kapazität (C) ist nun kurzgeschlossen und im Crowbar-Kreis verbleiben der Widerstand $R_{Crowbar-Kreis} = R_{ex} + R_{CS}$ und die Induktivität $L_{Crowbar-Kreis} = L_{ex} + L_{CS}$. In dem so entstandenen RL-Kreis nimmt der Strom exponentiell mit der Zeitkonstanten $L_{Crowbar-Kreis}/R_{Crowbar-Kreis}$ ab, wodurch der bis zum Zeitpunkt des Maximums aufschwingende Strom in einen unipolaren Strom übergeführt wird. So kann ein unipolarer Strom mit relativ hohem Strommaximum und hoher Ladung erzeugt werden [119]. Für das Erreichen einer hohen Ladung ist es erforderlich, dass die Zeitkonstante $L_{Crowbar-Kreis}/R_{Crowbar-Kreis}$ hinreichend groß ist, was in der Praxis dadurch erreicht wird, dass der Widerstand ($R_{Crowbar-Kreis}$) entsprechend klein gewählt wird.

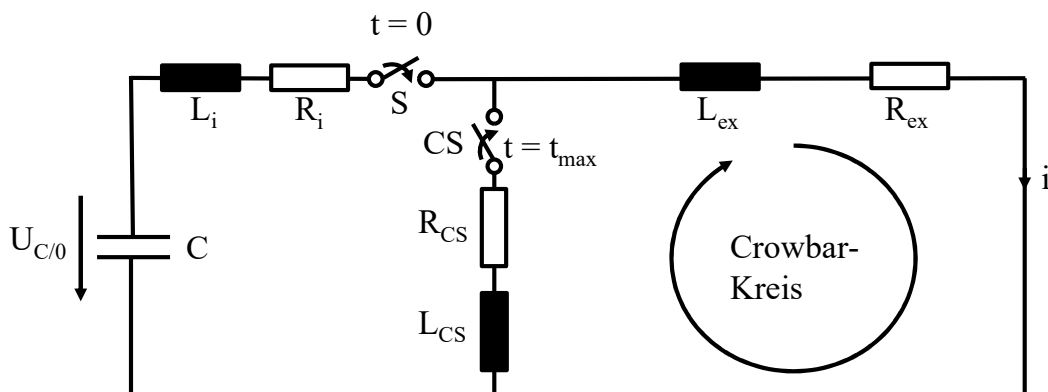


Bild A.3 Ersatzschaltbild des Impulsstrom-Generators mit Crowbar-Kreis

Bild A.4 zeigt ein Beispiel für den zeitlichen Stromverlauf mit und ohne Einsatz des Crowbar-Schalters. Ohne Einsatz des Crowbar-Schalters ergibt sich ein periodisch gedämpft schwingender Stromverlauf, während der Einsatz des Crowbar-Schalters bei Erreichen des Strommaximums einen unipolaren Stromverlauf erzeugt.

Da der Strom bis zum Erreichen des Maximums ($t \leq t_{\max}$) einen periodisch gedämpften Verlauf aufweist, gelten in diesem Zeitbereich die Formeln nach Kapitel A.1.3. Insbesondere gelten für die maximale Stromsteilheit und das Strommaximum die Beziehungen nach Tabelle A.3.

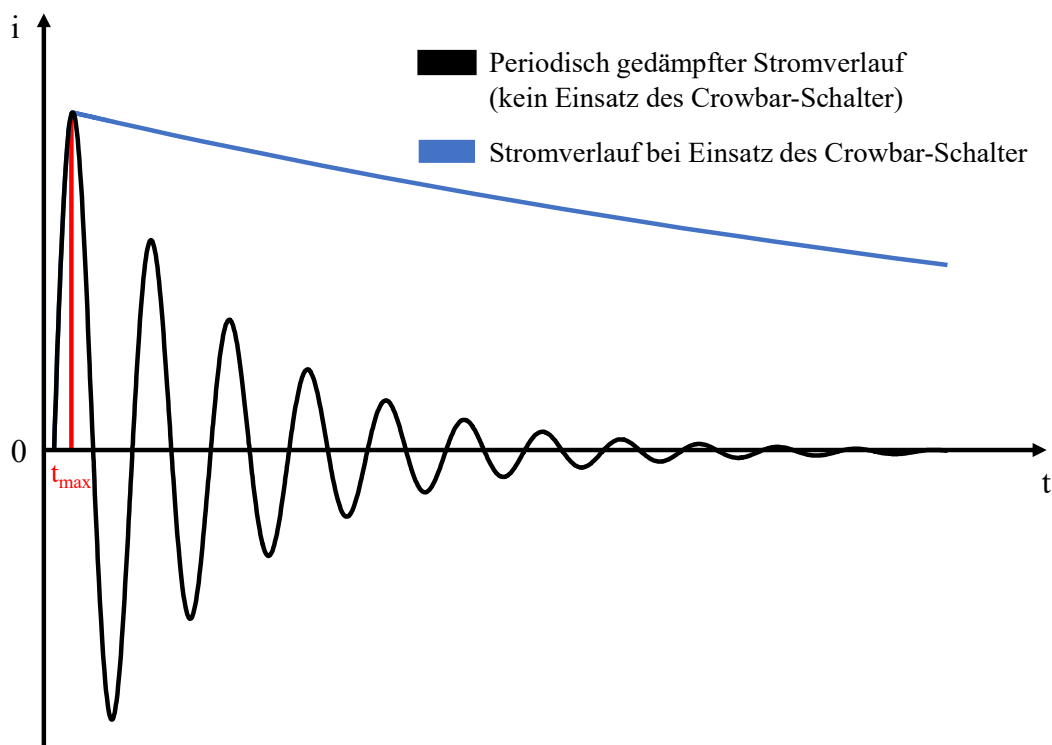


Bild A.4 Zeitlicher Verlauf des Stroms bei Einsatz des Crowbar-Schalters (blaue Linie) und ohne Einsatz des Crowbar-Schalters (schwarze Linie)

Für den Strom nach Erreichen des Maximums ($t > t_{\max}$) ist die Zeitkonstante des Crowbar-Kreises zu berücksichtigen. Sie ist gegeben durch:

$$\tau = \frac{L_{\text{Crowbar-Krei}}}{R_{\text{Crowbar-Kre}}} \quad (\text{A.29})$$

Der zeitliche Verlauf des Stroms ist für $t > t_{\max}$ gegeben durch (siehe [6]):

$$i(t) = i_{\max} \cdot e^{-\frac{(t-t_{\max})}{\tau}} \quad (\text{A.30})$$

Tabelle A.4 enthält Näherungsformeln für die Ladung und die spezifische Energie nach [6]. Die Näherungsformeln setzen voraus, dass der Widerstand im Stromkreis hinreichend klein ist.

Ladung	$Q \approx U_{C/0} \cdot C + \frac{U_{C/0}}{\omega \cdot L_{\text{RLC-Kreis}}} \cdot \tau$
Spezifische Energie	$W/R \approx \left(\frac{U_{C/0}}{\omega L_{\text{RLC-Kreis}}} \right)^2 \cdot \left(\frac{\pi}{4\omega} + \frac{\tau}{2} \right)$

Tabelle A.4 Ladung und spezifische Energie des Impuls-Generators mit Crowbar-Kreis nach [6]

Anhang B: Blitzströme in der Normung

In Blitzschutz-Normen werden die Komponenten der Blitzströme durch Stoßströme und Langzeitströme nachgebildet. Nach der Norm VDE 0185-305-1 [31] sind Stoßströme definiert als Stromimpulse mit einer Zeitdauer von höchstens 2 ms, während die Langzeitströme eine längere Zeitdauer als 2 ms aufweisen und bis über 1 s dauern können [120].

Da sich die Blitzströme für erdgebundene und fliegende Systeme grundlegend unterscheiden, gelten für bauliche Anlagen und Flugzeuge gesonderte Normen. Einen Sonderfall bilden die wassergebundenen Systeme wie Schiffe, die sich allerdings in der Regel an den Normen für bauliche Anlagen oder fliegende Systeme orientieren. Sonderfälle sind auch Windkraftanlagen und militärische Systeme, die einen erweiterten oder abgewandelten Blitzschutz erfordern. Zu den Sonderfällen zählen des Weiteren Bahnanlagen, Kraftfahrzeuge, Offshore-Anlagen und erdverlegte Hochdruck-Rohrleitungen. Im Folgenden wird auf diese Sonderfälle nicht oder nur am Rand eingegangen.

B.1 Blitzströme gemäß VDE 0185-305-1 für bauliche Anlagen

Die deutsche Normenreihe VDE 0185-305, die als Übersetzung der europäischen Normenreihe auch die Bezeichnung DIN EN 62305 hat, enthält die Anforderungen an den Blitzschutz baulicher Anlagen. Diese Normenreihe entspricht im Wesentlichen der internationalen Normenreihe IEC 62305. Da somit diese Normen weitgehend gleichlautend sind, wird im Folgenden stellvertretend nur noch auf die deutsche Normenreihe VDE 0185-305 verwiesen (siehe beispielsweise [6]).

Im Teil 1 (Norm VDE 0185-305-1 [31]) dieser Normenreihe sind die Blitzströme einschließlich ihrer Parameter festgelegt. Hierbei wird zwischen vier Gefährdungspegeln (**L**ightning **P**rotection **L**evel) unterschieden, die als LPL I - IV bezeichnet werden. Mit den unterschiedlichen Gefährdungspegeln wird der individuellen Schutzwürdigkeit einer baulichen Anlage Rechnung getragen. Beispielsweise werden explosivstoffgefährdete Anlagen gemäß dem höchstwertigen Gefährdungspegel LPL I geschützt, während weniger schützenswerte Wohngebäude nach Gefährdungspegel LPL III geschützt werden. Dementsprechend ist für jeden Gefährdungspegel ein gesonderter Satz von Stoßströmen und Langzeitströmen festgelegt.

Jeder dieser Sätze umfasst folgende Stromkomponenten:

- Stoßstrom des positiven Erstblitzes
- Stoßstrom des negativen Erstblitzes
- Stoßstrom des (negativen) Folgeblitzes
- Langzeitstrom

Der Stoßstrom des negativen Erstblitzes wird im Folgenden nicht betrachtet, da er nur für wenige Sonderanwendungen bedeutsam ist.

B.1.1 Stoßströme nach VDE 0185-305-1

Bild B.1 verdeutlicht die Definition des Stoßstroms i_S nach VDE 0185-305-1. Der Stoßstrom ist definiert über die Stirnzeit T_1 , die Rückenhalbwertszeit T_2 sowie das Strommaximum i_{S-max} . Im dargestellten schematischen zeitlichen Verlauf entspricht das Strommaximum dem 100 %-Wert. Die Stirnzeit (T_1) ist definiert mit Hilfe einer Geraden durch den 10 %- und den 90 %-Wert. Die Stirnzeit entspricht der Zeitdifferenz, die durch den Schnittpunkt dieser Geraden mit der Zeitachse (0 %-Linie) und der 100 %-Linie gebildet wird. Die Rückenhalbwertszeit (T_2) ist die zeitliche Differenz zwischen dem Beginn der Stirnzeit (T_1) und dem Zeitpunkt, zu dem der Strom auf den halben (50 %-) Wert abgefallen ist.

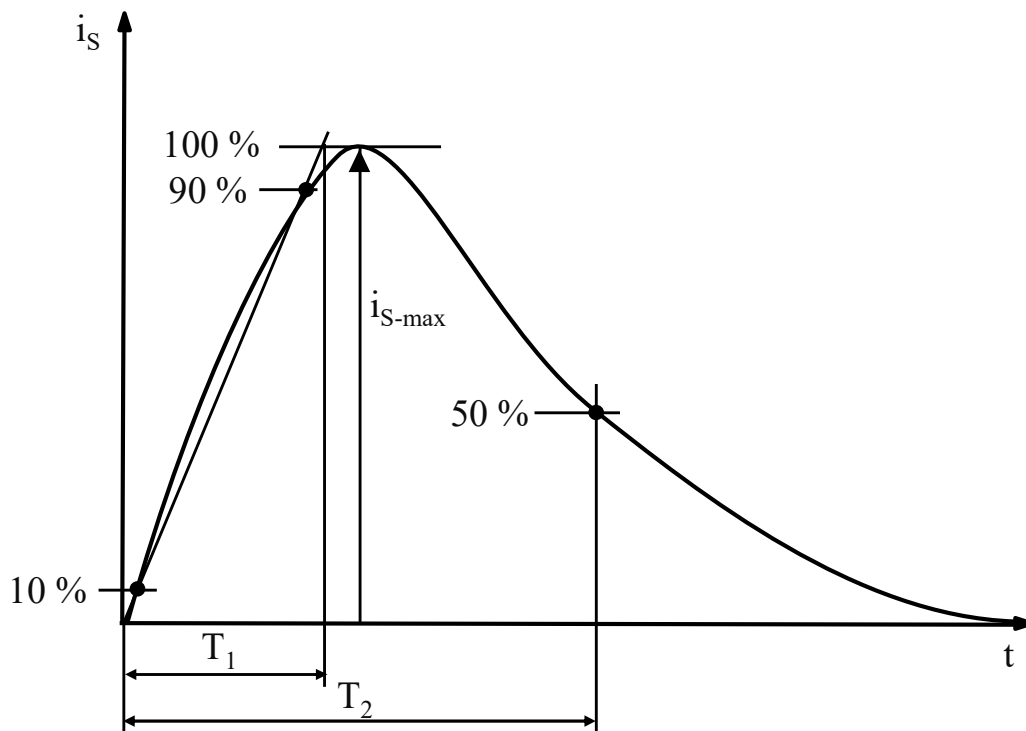


Bild B.1 Definition des Stoßstroms nach VDE 0185-305-1

Mit dem Stoßstrom des positiven Erstblitzes und des Folgeblitzes werden nach VDE 0185-305-1 folgende Bedrohungen durch Blitzströme abgedeckt:

- Strommaximum $i_{\max}$
- Ladung (der Impulsströme) Q
- Spezifische Energie $W/R = \int i^2 dt$
- Maximale Stromsteilheit $\left(\frac{di}{dt}\right)_{\max}$

Mit den in Tabelle B.1 aufgeführten Stoßstromparametern wird diesen Bedrohungen Rechnung getragen. Die Stoßstromparameter richten sich hierbei nach dem jeweiligen Gefährdungspegel LPL I – IV. Der Stoßstrom des positiven Erstblitzes mit der Impulsform 10/350 μs deckt die Blitzbedrohungen durch das Strommaximum, die Ladung und die spezifische Energie ab, während der Folgeblitz die Bedrohung durch die Maximale Stromsteilheit abbildet. Für Prüfzwecke sind die Stoßstromparameter innerhalb der in Tabelle B.1 aufgeführten Toleranzen zu erfüllen.

Positiver Erstblitz				LPL		
Stromparameter	Symbol	Einheit	Toleranz	I	II	III/IV
Strommaximum	$i_{\max}$	kA	$\pm 10\%$	200	150	100
Ladung Stoßstrom	Q	C	+20%/-10%	100	75	50
Spezifische Energie	W/R	MJ/ Ω	+45%/-10%	10	5,6	2,5
Impulsform	T_1/ T_2	$\mu s/\mu s$		10/350		
Folgeblitz				LPL		
Stromparameter	Symbol	Einheit		I	II	III/IV
Strommaximum	$i_{\max}$	kA	$\pm 10\%$	50	37,5	25
Mittlere Stromsteilheit	di/dt	kA/ μs		200	150	100
Impulsform	T_1/ T_2	$\mu s/\mu s$		0,25/100		

Tabelle B.1 Stoßstromparameter für Prüfzwecke nach VDE 0185-305-1 für die vier Gefährdungspegel LPL I - IV

B.1.2 Langzeitströme nach VDE 0185-305-1

Bild B.2 zeigt schematisch die Definition des Langzeitstroms i_L . Der Langzeitstrom ist definiert über die Ladung Q_L und die Zeitdauer des Stromflusses T_L , wobei T_L die Zeitdauer bezeichnet, während der der Strom mindestens 10 % des Maximums beträgt.

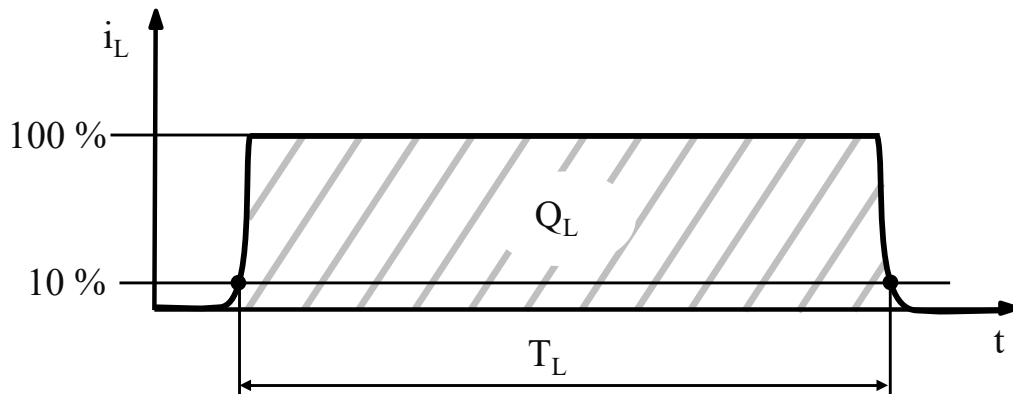


Bild B.2 Schematischer Verlauf des Langzeitstroms nach VDE 0185-305-1

Tabelle B.2 enthält die Parameter des Langzeitstroms nach VDE 0185-305-1 einschließlich der für die Prüfungen zulässigen Toleranzen. Die Zeitdauer des Langzeitstroms beträgt unabhängig vom Gefährdungspegel 0,5 s. Für den Strom ist kein bestimmter zeitlicher Verlauf festgelegt. Üblich ist jedoch ein sogenannter „rechteckiger“ Verlauf mit konstantem Strom während der Zeitdauer T_L wie in Bild B.2 dargestellt. Neben der genormten Zeitdauer T_L wird in der Praxis häufig vereinfachend die Zeitdauer t_L verwendet, welche die Gesamtdauer des Langzeitstroms von seinem Beginn bis zu seinem Ende umfasst.

Langzeitstrom				LPL		
Stromparameter	Symbol	Einheit	Toleranz	I	II	III/IV
Ladung	Q_L	C	$\pm 20\%$	200	150	100
Zeitdauer	T_L	s	$\pm 10\%$	0,5		

Tabelle B.2 Parameter des Langzeitstroms nach VDE 0185-305-1 für die vier Gefährdungspegel LPL I - IV

B.2 Zusätzliche Anforderungen an Windkraftanlagen nach DIN EN IEC 61400-24

Moderne Windkraftanlagen erreichen Höhen von über 100 m und werden daher häufig von Aufwärtsblitzen getroffen, welche sogenannte einleitende Langzeitströme mit extrem hoher Ladung aufweisen können [121]. Dies gilt insbesondere für besonders exponierte Windkraftanlagen in Gebieten mit hohem Aufkommen an Winterblitzen. Für diesen Fall wurde in DIN EN IEC 61400-24 [32] zusätzlich zu den Forderungen nach VDE 0185-305-1, LPL I die Ladung des Langzeitstroms um den Faktor 3 erhöht. Dieser auch als „Winterblitzstrom“ bezeichnete Langzeitstrom dauert nach wie vor 0,5 s, hat aber einschließlich der für Prüfungen zulässigen Toleranzen eine Ladung (Q_L) von $600 \text{ C} \pm 20\%$.

B.3 Blitzschutz-Normen für militärische Anwendungen

Für militärische bauliche Anlagen ist im Allgemeinen die zivile Normenreihe VDE 0185-305 maßgebend. Für neu zu beschaffende Systeme und Geräte ist die Vorschriftenlage hingegen nicht eindeutig. Da ein Teil der militärischen Ausrüstung von NATO-Partnern stammt, sind die dortigen Vorschriften zunächst zu berücksichtigen. Gleichwohl ist die für Beschaffungen maßgebende Verteidigungs-Geräte (VG)-Norm VG 95371-10 [122] zu beachten. In dieser Norm ist die Bedrohung durch die Blitzströme festgelegt. Im Wesentlichen beruht diese Norm auf der zivilen Norm VDE 0185-305-1. Allerdings sind in der VG-Norm nur zwei sogenannte Bedrohungsklassen vorgegeben. Dabei entspricht die Bedrohungsklasse „normal“ dem Gefährdungspegel LPL III und die Bedrohungsklasse „hoch“ dem Gefährdungspegel LPL I der zivilen Norm VDE 0185-305-1.

B.4 Blitzströme nach EUROCAE ED-84 für fliegende Systeme

Die für fliegende Systeme maßgebenden Stoßströme und Langzeitströme sind in der internationalen Normung harmonisiert, so dass die europäische Norm EUROCAE ED-84 [33] sowie die amerikanischen Vorschriften RTCA/DO-160-F [87] und SAE ARP 5416 [123] im wesentlichen gleichlautende Anforderungen enthalten. Dies gilt auch für die NATO-Norm AECTP-250 [124] und die amerikanischen Normen MIL-STD-464D [125] und MIL-STD-1757 [126], die für militärisches fliegendes Gerät Anwendung finden. Daher wird im Folgenden stellvertretend nur noch auf die europäische Norm EUROCAE ED-84 verwiesen.

Der Blitzstrom setzt sich nach EUROCAE ED-84 aus vier Teilströmen zusammen. Er besteht aus den Stoßstromkomponenten A und D und den Langzeitstrom-Komponenten B und C. Dieser als Vierkomponenten-Strom bekannte Prüfstrom ist schematisch in Bild B.3 dargestellt. Die Stoßstromkomponenten A und D decken die Bedrohung durch die Stoßströme der Erst- und Folgeblitze ab, während die Langzeitstrom-Komponenten B und C die Bedrohung durch die Langzeitströme abdecken.

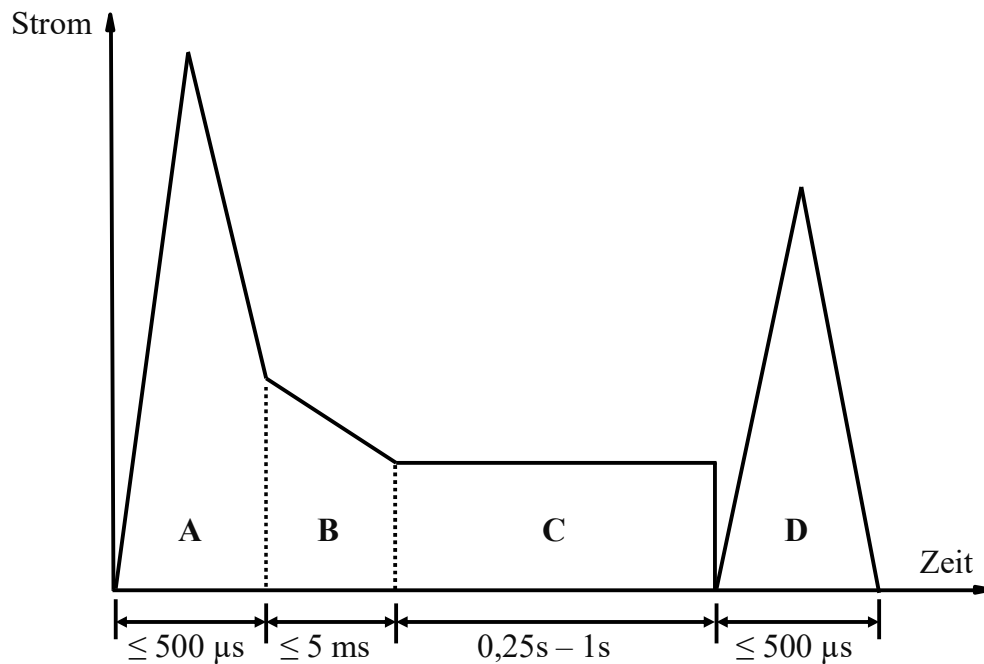


Bild B.3 Schematischer Verlauf des Vierkomponenten-Stroms bestehend aus den Stromkomponenten A, B, C und D

In Tabelle B.3 sind die Parameter der Stromkomponenten mit den für Prüfungen zulässigen Toleranzen angegeben. Da an weniger exponierten Stellen geringere Ströme und Ladungen zu erwarten sind, werden dort Stromkomponenten mit reduzierten Stromwerten oder reduzierter Stromdauer nach EUROCAE ED-91 [34] gefordert. Beispielsweise hat die modifizierte Stromkomponenten A_h ein Maximum von 150 kA, die modifizierte Langzeitstrom-Komponente C^* eine Ladung bis etwa 20 C.

Je nach Anforderung kann eine Einzelprüfung mit der Komponente A erfolgen, häufig wird jedoch eine kombinierte Prüfung mit der Komponente A und den nachfolgenden Komponenten B und C gefordert. Wird nur eine Prüfung mit Langzeitströmen gefordert, geschieht dies durch die Komponente C oder die kombinierte Komponente $B+C^*$ oder die kombinierte Komponente $B+C$. Bei der praktischen Realisierung der kombinierten Komponente $B+C$ wird in der Regel vereinfachend die Komponente C um die Ladung der Komponente B erweitert. Die Komponente D wird hingegen in der Regel gesondert abgeprüft.

Stromkomponente A				
Stromparameter	Symbol	Einheit	Toleranz	Wert
Maximum Stoßstrom	$i_{\max}$	kA	$\pm 10\%$	200
Spezifische Energie	W/R	MJ/ Ω	$\pm 20\%$	2
Zeitdauer	t	μs		≤ 500
Stromkomponente B				
Stromparameter	Symbol	Einheit	Toleranz	Wert
Ladung	Q	C	$\pm 10\%$	10
Mittleres Strommaximum	$i_{\max\text{-mittel}}$	kA	$\pm 20\%$	2
Zeitdauer	t	ms		≤ 5
Stromkomponente C				
Stromparameter	Symbol	Einheit	Toleranz	Wert
Strom min/max	$i_{\min/\max}$	A		200 - 800
Ladung	Q	C	$\pm 20\%$	200
Zeitdauer	t	s		0,25 - 1
Stromkomponente D				
Stromparameter	Symbol	Einheit	Toleranz	Wert
Maximum Stoßstrom	$i_{\max}$	kA	$\pm 10\%$	100
Spezifische Energie	W/R	MJ/ Ω	$\pm 20\%$	0,25
Zeitdauer	t	μs		≤ 500

Tabelle B.3 Parameter der Stromkomponenten A, B, C und D nach EUROCAE ED-84 [33]

Anhang C: Stoßstrom-Generator

Um den in Anhang B beschriebenen Vierkomponenten-Strom zu realisieren, ist es erforderlich, dass bei den experimentellen Untersuchungen dem erstem Stoßstrom (Komponente A) unmittelbar der Langzeitstrom (Komponente B+C) nachfolgt. Dies bedeutet für die Prüfeinrichtung, dass die Stromkomponenten A, B und C in einem gemeinsamen Stromimpuls erzeugt werden müssen. Diese für die Luftfahrt einzuhaltende Anforderung wird für bauliche Anlagen ebenfalls, allerdings in abgewandelter Form, gefordert.

Um diese Anforderungen an die Prüfeinrichtung zu erfüllen, wird der Langzeitstrom-Generator mit einem bereits an der Universität der Bundeswehr München eingesetzten Stoßstrom-Generator kombiniert. Die Kombination beider Generatoren erfordert spezielle Anpassungen, damit der Stoßstrom aus dem Stoßstrom-Generator zu keinen unzulässigen Beeinflussungen wie Schäden und Funktionsstörungen am Langzeitstrom-Generator führt. Umgekehrt muss sichergestellt sein, dass der Langzeitstrom keine Schäden am Stoßstrom-Generator verursacht. Daher ist eine Entkopplung beider Generatoren erforderlich, auf die in Kapitel 6 und 7 detailliert eingegangen wird.

Zunächst gibt jedoch dieses Kapitel einen Überblick über den an der Universität der Bundeswehr München betriebenen Stoßstrom-Generator. Der Stoßstrom-Generator basiert auf einem RLC-Kreis, dessen Eigenschaften in Anhang A beschrieben sind. Stoßstrom-Generatoren werden typischerweise für Ströme bis etwa 100 kA (maximal: ~150 kA) ausgelegt. Werden höhere Ströme benötigt, werden üblicherweise zwei Einzel-Generatoren zu einem Stoßstrom-Generator kombiniert. Mit dem an der Universität der Bundeswehr München betriebenen Stoßstrom-Generator lassen sich auf diese Weise Stoßströme bis etwa 300 kA realisieren.

C.1 Stoßstrom-Generator der Universität der Bundeswehr München

Bild C.1 zeigt das Ersatzschaltbild des an der Universität der Bundeswehr München betriebenen Stoßstrom-Generators. Der Stoßstrom-Generator besteht aus zwei baugleichen Einzel-Generatoren die jeweils über eine Kondensatorbank (C_S), bestehend aus mehreren Kondensatoren, einen inneren Generator-Widerstand (R_{S-i}) und eine innere Generator-Induktivität (L_{S-i}) verfügen. An den Generator ist das Prüfobjekt mit dem Widerstand R_P und der Induktivität L_P über den externen Kreis-Widerstand (R_{S-ex}) und die externe Kreis-Induktivität (L_{S-ex}) angeschlossen. Die Kondensatorbank jedes Einzel-Generators hat eine Kapazität von 30 μF . Bei einer maximalen Ladespannung ($U_{S/0}$) von

100 kV ergibt sich die Generatorenergie zu 150 kJ. Bei Zusammenschaltung beider Einzel-Generatoren steht somit eine maximale (Gesamt-) Energie von 300 kJ sowie eine Ladung von 6 C zur Verfügung.

Da die Widerstände vergleichsweise sehr klein sind, wird der Stoßstrom-Generator im periodisch schwach gedämpften Fall betrieben, d.h. der Strom weist einen schwingenden, langsam abklingenden Verlauf auf. Die Einzel-Generatoren sind jeweils mit einem Crowbar-Schalter (S_{S-CS}) ausgestattet, so dass sich auch ein unipolarer Strom ermöglichen lässt. Dazu ist es erforderlich, dass die beiden Crowbar-Schalter bei Erreichen des Strommaximums geschlossen werden. Näheres hierzu findet sich in Anhang A.2.

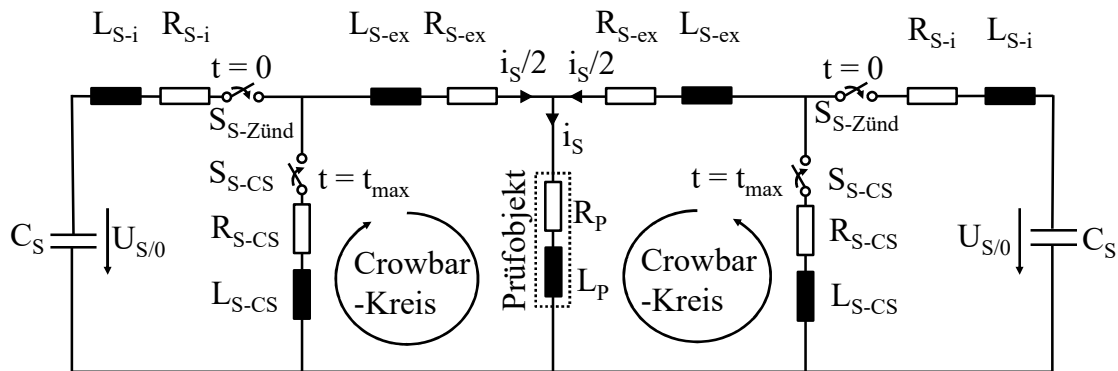


Bild C.1 Ersatzschaltbild des an der Universität der Bundeswehr München betriebenen Stoßstrom-Generators

Werden die Einzel-Generatoren kombiniert betrieben, muss die Ansteuerung beider Generatoren synchron erfolgen. Insbesondere müssen die Schalter $S_{S-Zünd}$ (siehe Bild C.1) zur gleichen Zeit ($t = 0$) schließen. Ebenso müssen die beiden Crowbar-Schalter zeitsynchron bei Erreichen des Strom-Maximums (zur Zeit $t = t_{max}$) schließen. Zu diesem Zweck übernimmt der eine als „Master“ betriebene Generator die Steuerung des anderen als „Slave“ betriebenen Generators.

Bild C.2 zeigt eine photographische Aufnahme des Stoßstrom-Generators mit dem Prüfbjekt, das sich im Prüffeld zwischen den beiden Einzel-Generatoren befindet. Die Kondensatoren jedes Einzel-Generators sind im Halbkreis angeordnet, sodass sich ein gemeinsamer Einspeisepunkt in deren Mitte ergibt. Der Strom fließt von diesem Einspeisepunkt über das Prüfbjekt und über geerdete Rückleiter zum jeweiligen Einzel-Generator zurück. Bei idealer zeitsynchroner Auslösung beider Generatoren addieren sich die Ströme am Prüfbjekt zum doppelten Wert.

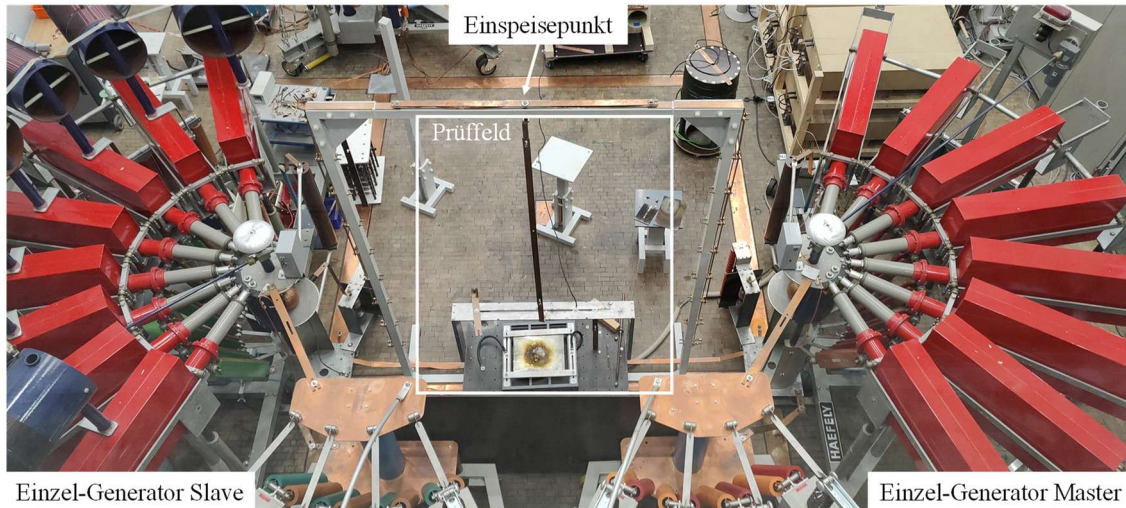


Bild C.2 Draufsicht auf den Stoßstrom-Generator mit den Einzel-Generatoren „Master“ und „Slave“ sowie dem gemeinsamen Einspeisepunkt

C.2 Messsystem für den Stoßstrom

Der Stoßstrom-Generator ist ausgelegt für einen Strom bis 300 kA mit einer Stirnzeit von etwa 10 μ s. Zur Strommessung dient ein Strommonitor (Typ: Pearson Model 2093), der Ströme bis 500 kA bei einer Bandbreite von 0,15 Hz – 200 kHz messen kann. Durch die Verwendung des Strommonitors und die damit verbundene galvanische Trennung erfolgt die Messung potentialfrei, wodurch nennenswerte Ströme auf der Messleitung vermieden werden [127].

Bild C.3 zeigt den Strommonitor, der unter der Prüfplatte (für den Prüfaufbau) installiert ist. Der Strom wird über eine Kupferschiene, die durch das Loch des Strommonitors geführt ist, von der Prüfplatte über den geerdeten Rückleiter zum Generator geleitet. Als Rückleiter dient eine Aluminium-Platte, die mit der Erdseite des Stoßstrom-Generators über Kupferschienen verbunden ist. Vom Strommonitor wird die Messleitung zu einer geschirmten Messkabine geführt. Innerhalb derselben wird der Strom mit einem Kanal des Digitaloszilloskops „High Volt Mias“ gemessen. Als Messleitung dient ein koaxiales 50 Ω -Kabel, das zur Vermeidung von Störeinkopplungen zusätzlich in einem geschirmten Schlauch verlegt ist.



Bild C.3 Strommonitor vom Typ Pearson Model 2093 unterhalb der Prüfplatte

C.3 Crowbar-Schalter des Stoßstrom-Generators

Der Crowbar-Schalter besteht aus einer Drei-Elektroden-Funkenstrecke [128], welche mit einem Hochspannungsimpuls gezündet wird. Hierfür werden drei Stufen des im Hochspannungslabor verfügbaren Marx-Generators verwendet. Jede Stufe wird auf 60 kV aufgeladen, so dass die Summenladespannung bei Anlegen des Zündimpulses 180 kV beträgt [90].

Bild C.4 zeigt einen der beiden Crowbar-Schalter. Der Crowbar-Schalter besteht aus einer Rahmenkonstruktion (1) mit Hauptfunkenstrecke (2) und einer dazwischen angeordneten Triggerelektrode (3). Sowohl die Elektroden der Hauptfunkenstrecke als auch die Triggerelektrode bestehen aus einer hitzebeständigen Legierung (Wolfram-Kupfer), um den Abbrand möglichst gering zu halten. Die Hauptfunkenstrecke wird gezündet, indem von der Triggerelektrode ausgehend ein leitender Plasma-Kanal zu den beiden Elektroden der Hauptfunkenstrecke aufgebaut wird. Dazu ist es erforderlich, dass der Trigger-Impuls eine möglichst hohe Spannungssteilheit aufweist (siehe [119] [129]). Hierfür dient eine Aufsteil-Funkenstrecke (4) in Kombination mit einer Aufsteil-Kapazität (5). Die Aufsteil-Funkenstrecke hat den positiven Nebeneffekt, dass dadurch eine galvanische Entkopplung zum Marx-Generator gegeben ist. Um keine unerwünschte Triggerung durch Floaten des Potentials auszulösen, wird die Triggerelektrode durch eine hochohmige Widerstandskette (6) auf definiertem Potential gehalten.

Bild C.5 zeigt den Stoßstrom-Generator mit zwei Crowbar-Schaltern und dem Prüffeld mit Prüfobjekt. Die Crowbar-Schalter sind so nah wie möglich an die beiden Einzel-Generatoren angebaut, um die Länge der Zuleitung und somit die Leitungsinduktivität möglichst gering zu halten.

- 1: Rahmenkonstruktion
- 2: Hauptfunkenstrecke
- 3: Triggerelektrode
- 4: Aufsteil-Funkenstrecke
- 5: Aufsteil-Kapazität
- 6: Widerstandskette

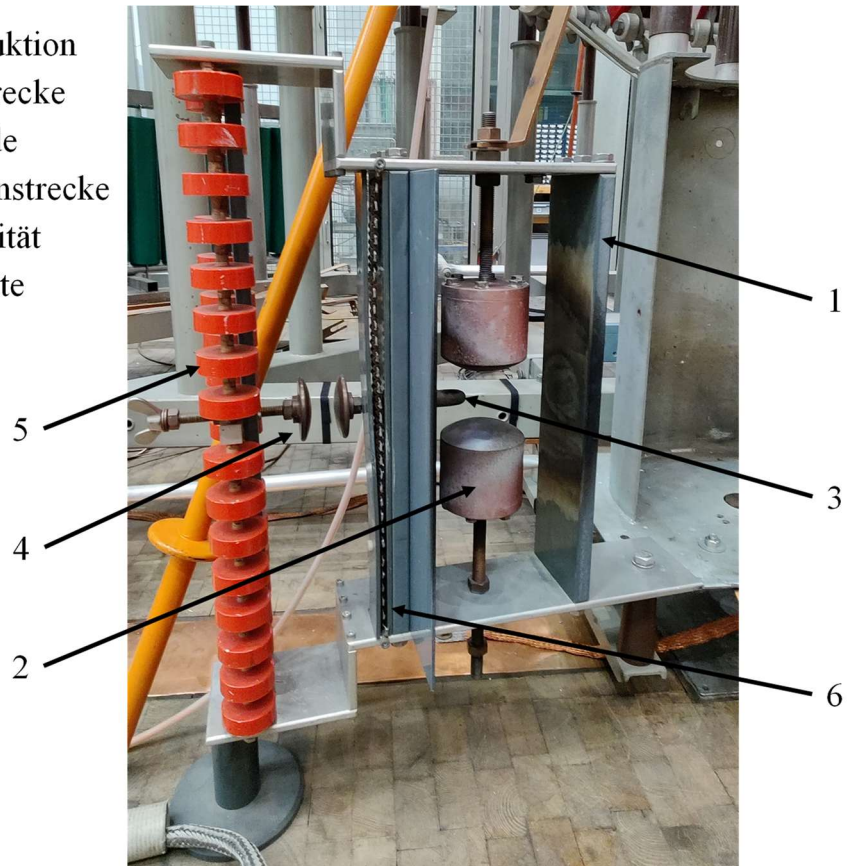


Bild C.4 Aufbau des Crowbar-Schalters

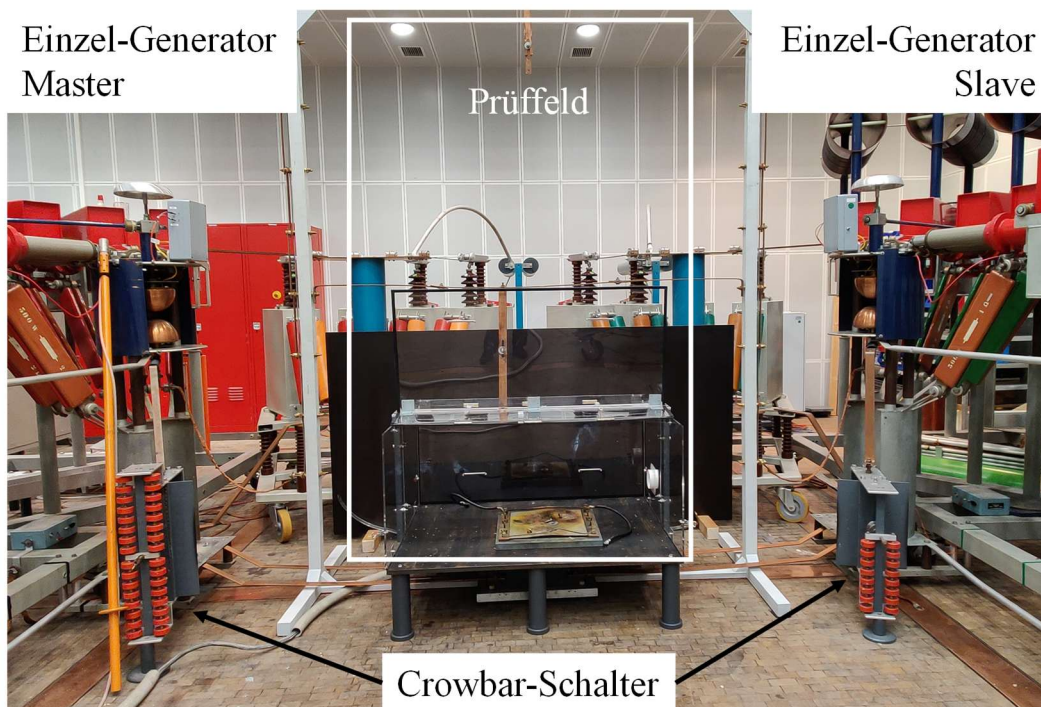


Bild C.5 Einzel-Generatoren „Master“ und „Slave“ mit je einem Crowbar-Schalter sowie dem dazwischen liegenden Prüffeld

Der Stoßstrom-Generator ist so ausgelegt, dass er die in Anhang B genannten Stoßströme nachbilden kann. Dies wird erreicht, indem der Generator-Widerstand und die Generator-Induktivität entsprechend angepasst werden. Der Einsatz des Crowbar-Schalters bietet zudem die Option, dass der schwingende Strom in einen unipolaren Strom übergeführt wird.

C.4.1 Stoßstrom mit der Impulsform 10/350 μs für bauliche Anlagen

Bild C.6 zeigt beispielhaft einen Stoßstrom i_s mit der Impulsform 10/350 μs , wie er als unipolarer Strom nach [31] für bauliche Anlagen gefordert ist. Mit dem Maximum von 218 kA, der spezifischen Energie von 9 MJ/ Ω und der Ladung von 86 C entspricht der Stoßstrom den Parametern eines Erstblitzes des höchsten Gefährdungspegels LPL I (siehe Anhang B, Tabelle B.1).

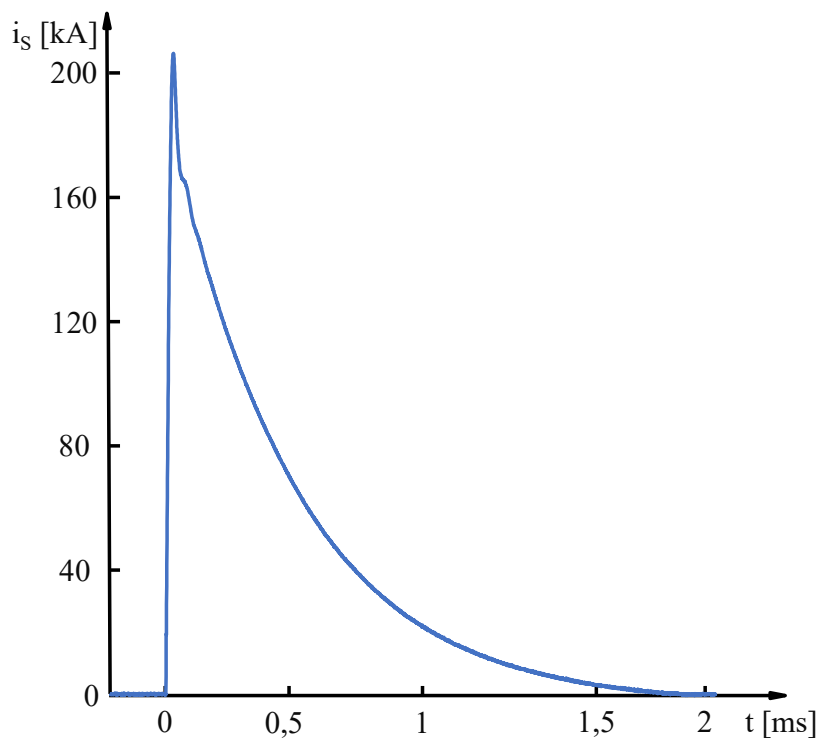


Bild C.6 Beispielhafter Stoßstrom des positiven Erstblitzes nach [31]

C.4.2 Stoßströme für experimentelle Untersuchungen an Flugzeugen

Die Stoßstrom-Komponenten A und D können wahlweise mit unipolarem oder periodisch gedämpftem Verlauf realisiert werden. Auch Mischformen sind zulässig.

Bild C.7 und Bild C.8 zeigen beispielhaft die Stoßstrom-Komponente A, zum einen mit periodisch gedämpftem (Bild C.7) und zum anderen mit unipolarem (Bild C.8) Verlauf. Der periodisch gedämpfte Stoßstrom hat ein Maximum von 206 kA und eine spezifische Energie von 2,06 MJ/Ω, während der unipolare Stoßstrom ein Maximum von 200 kA und eine spezifische Energie von 2,39 MJ/Ω aufweist. Beide Stoßströme liegen somit innerhalb der Toleranz für die Komponente A nach RTCA-DO-160F/EUROCAE ED-84 [87] [33] (siehe Anhang B, Tabelle B.3).

Bild C.9 zeigt beispielhaft die Stoßstrom-Komponente D, die eine Mischform ist, bestehend aus periodisch gedämpftem Anteil und unipolarem Anteil. Mit einem Maximum von 93 kA und einer spezifischen Energie von 0,267 MJ/Ω werden die Toleranzen nach RTCA-DO-160F/EUROCAE ED-84 [87] [33] auch hier eingehalten (siehe Anhang B, Tabelle B.3).

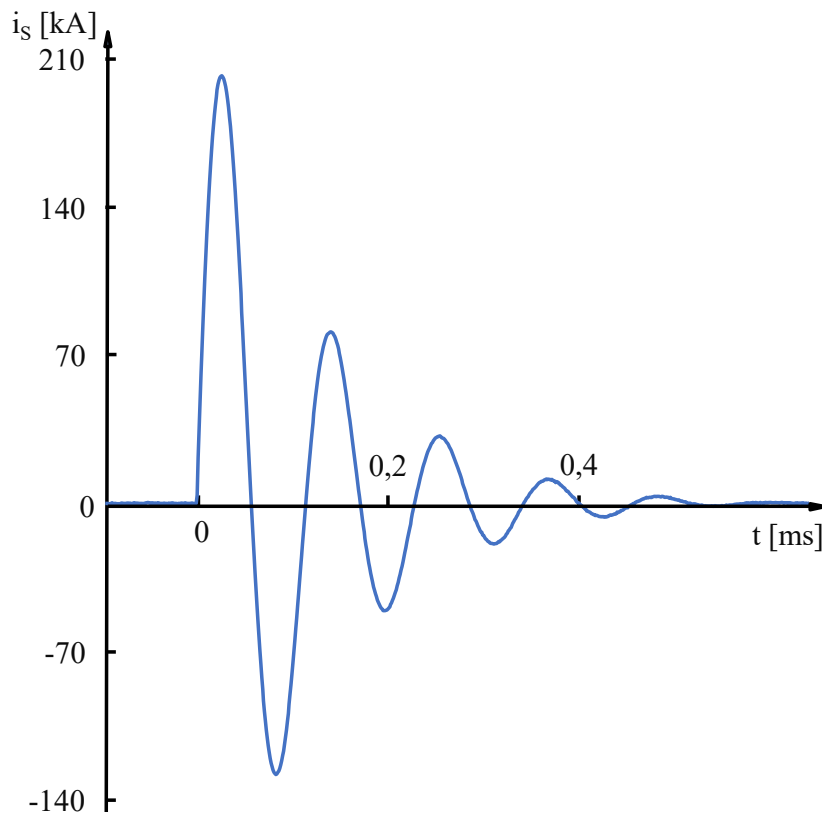


Bild C.7 Beispiel für die periodisch gedämpfte Stoßstrom-Komponente A

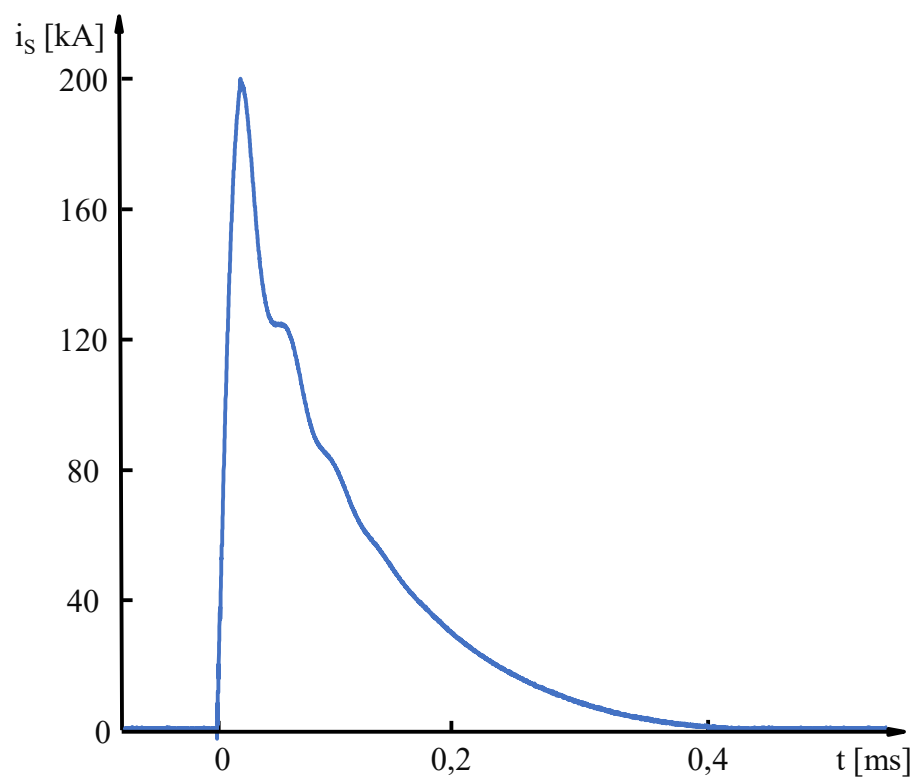


Bild C.8 Beispiel für die unipolare Stoßstrom-Komponente A

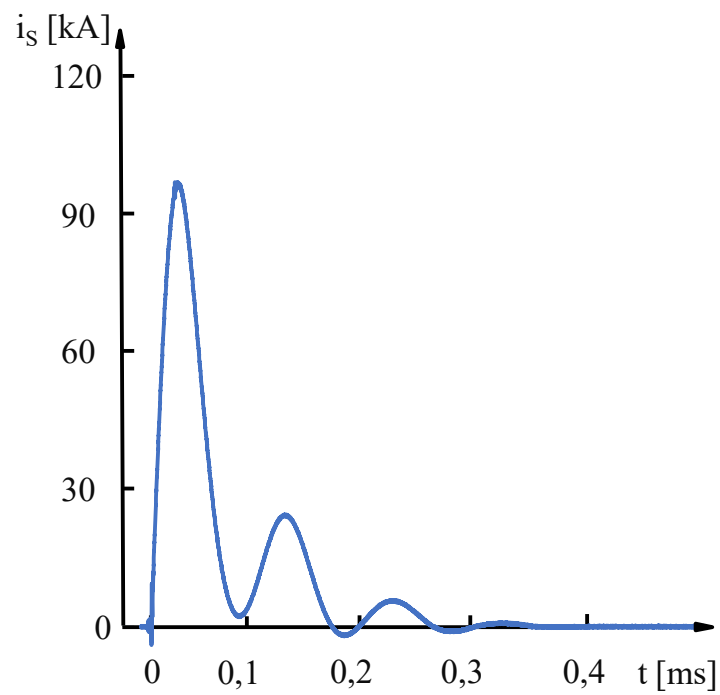


Bild C.9 Beispielhafte Stoßstrom-Komponente D nach [87] [33]

Literaturverzeichnis

- [1] V. Rakov, M. Uman, „Lightning Physics and Effects“, Cambridge University Press, New York, 2003, ISBN-13 978-0-521-58327-5
- [2] W. Korn, „Nordische Mythen“, Fabelträger Verlag, 2. Auflage, Köln 2016, ISBN 978-3-7716-4680-6
- [3] A. Kloss, „Von der Elektrizität zur Elektrizität“, Birkhäuser Verlag, Stuttgart, 1987, ISBN 3-7643-1838-4
- [4] C. Gerthsen, H. Kneser, H. Vogel, „Physik“, 12. völlig neubearbeitete und erweiterte Auflage, Springer Verlag, Berlin, 1974, ISBN 3-540-06336-6
- [5] P. Hasse, „Der Weg zum modernen Blitzschutz“, VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 2004, ISBN 3-8007-2844-3
- [6] F. Heidler, K. Stimper, „Blitz und Blitzschutz“, VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 2009, ISBN: 978-3-8007-2974-6
- [7] DIN EN 62305-3 VDE 0185-305-3: „Blitzschutz Teil 3: Schutz von baulichen Anlagen und Personen“, Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, Oktober 2011
- [8] P. Hasse, J. Wiesinger, „Handbuch für Blitzschutz und Erdung“, 4. bearbeitete Auflage, Pflaum Verlag München, VDE-Verlag Berlin Offenbach, 1993, ISBN 3-7905-0657-5 (Pflaum) und ISBN 3-8007-1882-0 (VDE-Verlag)
- [9] DIN EN 62305-4 VDE 0185-305-4: „Blitzschutz Teil 4: Elektrische und elektronische Systeme in baulichen Anlagen“, Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, Oktober, 2011
- [10] DEHN+Söhne, „Blitzplaner“, 4. aktualisierte Auflage, Neumarkt, 2017, ISBN 978-3-9813770-8-8
- [11] R. Huang, X. Wang, F. Fei, H. Li, J. Ye, Q. Zhou, „Analysis of onshore and offshore wind turbine blades damage caused by lightning“ Int. Symp. on Lightning Protection, Suzhou, 2023, S. 1-6, doi: 10.1109/SIPDA59763.2023.10349178
- [12] F. Fisher, J. Plumer „Aircraft lightning protection handbook“, Va. US Dep. of Commerce, National Technical Information Service, Springfield, 1989

- [13] M. Rock, „Prüfgeneratoren zur Simulation von Blitzimpulsströmen im Labor und ihre Wechselwirkung mit den Prüfobjekten“, Habilitation, Technische Universität Ilmenau, Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau, 2012, ISBN 978-3-86360-032-7
- [14] B. Wiedersich, „TaschenAtlas Wetter - Die turbulente Atmosphäre der Erde“, Klett-Perthes Verlag, 2006, ISBN-13: 978-3-12-828122-3
- [15] D. Malan, „Physics of Lightning“, The English University Press LTD, London, 1963, ISBN 0-521-58327-6
- [16] H. Prinz, „Gewitterelektrizität“, R: Oldenbourg Verlag München, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1979, ISBN 3-486-23511-7
- [17] V. Mazur, „Principles of Lightning Physics“, IOP Publishing, London, 2016, ISBN 978-0-7503-1152-3
- [18] R. Reiter, „Phenomena in atmospheric and environmental electricity“, Elsevier Science Publisher B.V., Amsterdam, 1992, ISBN 0-444-892869
- [19] V. Rakov, M.A. Uman, „Long continuing current in negative lightning ground flashes“, J. Geophys. Res., Bd. 95, Nr. D5, S. 5455-5470, 1990
- [20] T. Shindo, M. Uman, „Continuing current in negative cloud-to-ground lightning“, J. Geophys. Res., Bd. 94, Nr. D4, S. 5189–5198, 1989
- [21] M. Miki, V. Rakov, T. Shindo, G. Diendorfer, M. Mair, F. Heidler, W. Zischank, M. A. Uman, R. Thottappillil, D. Wang, „Initial stage in lightning initiated from tall objects and in rocket-triggered lightning“, J. Geophys. Res., Bd. 110, S. 1-15, 2005
- [22] K. McEachron, „Lightning to the Empire State Building“, J. Franklin Inst., Bd. 227, S. 149-217, 1939
- [23] A. Eriksson, „Research paper no 4: Lightning and tall structures“, Trans. of the South African Institute of Electrical Engineers, Bd. 69, Nr. 8, S. 238-252, 1978.
- [24] C. Paul, F. Heidler, „Electric field characteristics of subsequent return strokes, M-components, and ICC-pulses from negative upward lightning measured at the Peissenberg Tower“ in IEEE Trans. on EMC, Bd. 61, Nr. 4, S. 1138-1146, 2019, doi: 10.1109/TEMC.2018.2845686

- [25] F. Heidler, F. Modlinger, „Initial current variation of the ICC considering the negative upward lightning measured at the Peissenberg Tower, Germany“, IEEE Trans. on EMC, Bd. 66, Nr. 4, S. 1176-1182, 2024, doi: 10.1109/TEMC.2024.3404510
- [26] G. Bäuml, „Untersuchung der Blitzschutz-Wirksamkeit von segmentierten und massiven Ableiterstreifen“, Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, 2000
- [27] Fulmen, „European Project under the Transport RTD Programme of the 4. Framework Programme“, Schlussbericht, 2012
- [28] P. Laroche, P. Blanchet, A. Delannoy, F. Issac, „Experimental studies of lightning strikes to aircraft“, Journ. Aerospace Lab, Nr. 5, AL05-06, S. 1-13, 2012, hal-01184400
- [29] C. Karch, F. Heidler, C. Paul, „Protection of aircraft radomes against direct lightning strikes - an overview“, Atmosphere, 2021, Bd. 12, Nr. 1141, S. 1-13, doi: 10.3390/atmos12091141
- [30] C. Karch, C. Paul und F. Heidler, „Lightning strike protection of radomes“ Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE, Barcelona, Spanien, 2019, Seite 650-655, doi: 10.1109/EMCEurope.2019.8871944
- [31] DIN EN 62305-1 VDE 0185-305-1 „Blitzschutz - Teil 1: Allgemeine Grundsätze“, VDE Verlag, Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN, Oktober 2011
- [32] IEC 61400-24, „Wind energy generation systems - Part 24: Lightning protection“, Aufl. 2.0, VDE Verlag, 2019
- [33] EUROCAE ED-84A, „Aircraft lightning environment and related test wave-forms“, European Organisation for Civil Aviation Equipment, Paris, 2013
- [34] EUROCAE ED-91, „Aircraft lightning zoning“, European Organisation for Civil Aviation Equipment - Norm, Paris, Juli, 1998
- [35] H. Zhou, G. Diendorfer, R. Thottappillil, H. Pichler, M. Mair, „Characteristics of upward positive lightning flashes initiated from the Gaisberg tower“, J. Geophys. Res., Bd. 117, S. 1-13, 2012

- [36] N. Watanabe, A. Nag, G. Diendorfer, H. Pichler, W. Schulz, H. Rassoul, „Characterization of the initial stage in upward lightning at the Gaisberg Tower: 1 Current pulses“, *Electric Power System Research*, Bd. 213, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108626>, 2022
- [37] A. Hussein, M. Milewski, W. Janischewskyj, „Correlating the characteristics of the CN tower lightning return-stroke current with those of its generated electromagnetic pulse“ *IEEE Trans. on EMC*, Bd. 50, Nr. 3, S. 642–650, Aug. 2008
- [38] T. Miki, T.i Shindo, A. Asakawa, H. Motoyama, Y. Suzuhigashi, K. Fukuda, M. Ishii, M.i Chihara, „Measurement of lightning currents at Tokyo Skytree and observation of electromagnetic radiation caused by strikes to the tower“ *Int. Conf. on Lightning Protection*, Wien, 2012, Bericht 152, S. 1–5, doi: 10.1109/ICLP.2012.6344298
- [39] T. Miki, M. Saito, T. Shindo, M. Ishii, „Current observation results of downward negative flashes at Tokyo Skytree from 2012 to 2018“, *IEEE Trans. on EMC*, Bd. 61, Nr. 3, S. 663-673, 2019, doi: 10.1109/TEMC.2019.2910319
- [40] S. Visacro, A. Soares, M. Schroeder, L. Cherchiglia, V. Sousa, “Statistical analysis of lightning current parameters: Measurements at Morro do Cachimbo station“, *J. Geophys. Res.*, Bd. 109, 2004, Nr. D01105, doi: 10.1029/2003JD003662
- [41] J. Smit, H. Hunt, C. Schumann, „First lightning current measurements to the Sentech tower, South Africa“, *Int. Conf. on Lightning Protection und Int. Symp. on Lightning Protection*, Colombo, 2021, S. 1-6, doi: 10.1109/ICLPandSIPDA54065.2021.9627420
- [42] J. Smita, H. Hunt, C. Schumann, „The Johannesburg Lightning Research Laboratory, Part 1: Characteristics of lightning currents to the Sentech Tower“, *J. Electric Power Systems Research*, Bd. 216, S. 1-39, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.109059>
- [43] A. Rubinstein, C. Romero, M. Paolone, F. Rachidi, M. Rubinstein, P. Zweiacker, B. Daout, „Lightning measurement station on Mount Saentis in Switzerland“, *Int. Symp. On Lightning Protection*, Curitiba, 2009, S. 463–468

- [44] M. Azadifar, M. Rubenstein, F. Rachidi, V. Rakov, G. Diendorfer, W. Schulz, D. Pavanello, „A study of a large bipolar lightning event observed at the Sântis Tower“, IEEE Trans. on EMC, Bd. 61, Nr. 3, S. 796-806, 2019, doi: 10.1109/TEMC.2019.2913220
- [45] C. Romero, F. Rachidi, M. Rubinstein, M. Paolone, „Lightning currents measured on the Sântis Tower: A summary of the results obtained in 2010 and 2011“, IEEE Int. Symp. on EMC, Denver, 2013, S. 825-828, doi: 10.1109/ISEMC.2013.6670524
- [46] C. Romero, F. Rachidi, M. Paolone, M. Rubinstein, „Statistical distributions of lightning currents associated with upward negative flashes based on the data collected at the Sântis (EMC) Tower in 2010 and 2011“, IEEE Trans. on Power Delivery, Bd. 28, Nr. 3, S. 1804-1812, 2013, doi: 10.1109/TPWRD.2013.2254727
- [47] T. Warner, K. Cummins, R. Orville, „Comparison of upward lightning observations from towers in Rapid City South Dakota with national lightning detection network data—Preliminary findings“, 3rd Int. Symp. on Winter Lightning (ISWL2011), Sapporo, Japan, S. 221-226, 2011
- [48] D. Flache, V. Rakov, F. Heidler, W. Zischank, R. Thottappillil, „Initial-stage pulses in upward lightning: Leader/return stroke versus M-component mode of charge transfer to ground“ Geophys. Res. Lett., Bd. 35, 2008, Nr. L13812, doi:10.1029/2008GL034148
- [49] F. Fuchs, E. Landers, R. Schmid, J. Wiesinger, „Lightning current and magnetic field parameters caused by lightning strikes to tall structures relating to interference of electronic systems“, IEEE Trans. on EMC, Bd. 40, Nr. 4, S. 444-451, 1998
- [50] T. Zundl, “First results of the coordinated lightning current and LEMP measurements at the Peissenberg tower,” Int. Conf. on Lightning Protection, Budapest, 1994, Bericht R1c-09
- [51] F. Heidler, C. Hopf, „A new method of lightning electric field measurement“, Int. Conf. on Lightning Protection, Florenz, 1996, S. 91-96
- [52] F. Heidler, W. Zischank, J. Wiesinger, „Statistics of lightning current parameters and related nearby magnetic fields measured at the Peissenberg Tower“ Int. Conf. on Lightning Protection, Rhodes, 2000, S. 78–83

- [53] F. Fuchs, „Currents and near fields of lightning strokes to high buildings as source for electronic systems“ Dissertation Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, 1999
- [54] N. Trapp, “Registration of the lightning currents and their parameters by the use of automatically operating lightning measuring stations,” Dissertation Technische Universität München, München, Deutschland, 1985
- [55] O. Beierl, „Electromagnetic compatibility in case of lightning strike to a building,“ Dissertation, Technische Universität München, München, Deutschland, 1991
- [56] F. Heidler, M. Manhardt, K. Stimper, „Characteristics of upward positive lightning initiated from the Peissenberg Tower, Germany“, IEEE Trans. on EMC, Bd. 57, Nr. 1, S. 102-111, 2015, doi: 10.1109/TEMC.2014.2359584
- [57] M. Manhardt, F. Heidler, K. Stimper, „Enhanced lightning measuring setup at the Peissenberg Tower and first results“, Int. Conf. on Lightning Protection, Cagliari, 2010, S. 1-4, doi: 10.1109/ICLP.2010.7845894
- [58] M. Manhardt, „Measurement of lightning current and field,“ Dissertation Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, Deutschland, 2014
- [59] F. Heidler, M. Manhardt, K. Stimper, „The slow-varying electric field of negative upward lightning initiated by the Peissenberg Tower, Germany“, IEEE Trans. on EMC, Bd. 55, Nr. 2, S. 353-361, 2013, doi: 10.1109/TEMC.2012.2209121
- [60] D. Wang, N. Takagi, T. Watanebe, M. Hashimoto, „Observed characteristics of the lightning striking on a windmill and its lightning-protection tower“, Int. Conf. on Lightning Protection, Uppsala Schweden, 2008, Bericht 9c
- [61] K. Miyake, T. Suzuki, K. Shinjou, „Characteristics of winter lightning current on Japan Sea Coast“, IEEE Trans. on Power Delivery, Bd. 7, Nr. 3, S. 1450-1457, 1992, doi: 10.1109/61.141864
- [62] M. Manhardt, F. Heidler, K. Stimper, „The electric field of negative upward lightning strikes at the Peissenberg tower, Germany“, 2012 Int. Conf. on Lightning Protection, Wien, 2012, S. 1-9, doi: 10.1109/ICLP.2012.6344205

- [63] F. Modlinger, F. Heidler, „Initial continuous current of the negative upward lightning to the Peissenberg Tower, Germany“, Int. Symp. on High Voltage Engineering, Glasgow, 2023, S. 434-439, doi: 10.1049/icp.2024.0556
- [64] S. Hayashi, K. Michishita, S. Yokoyama, N. Honjo, „Measurement results of lightning current at Nikaho in winter from 2013 to 2017“, 11. Asia-Pacific Int. Conf. on Lightning (APL), Hong Kong, 2019, S. 1-6, doi: 10.1109/APL.2019.8815987
- [65] G. Diendorfer, H. Pichler, M. Mai, „Some parameters of negative upward-initiated lightning to the Gaisberg Tower (2000–2007)“, IEEE Trans. on EMC, Bd. 51, Nr. 3, S. 443-452, 2009, doi: 10.1109/TEM.2009.2021616
- [66] F. Heidler, F. Modlinger, „Parameters of the initial continuous current of negative upward lightning measured at the Peissenberg Tower, Germany, from 1992 to 2022“, IEEE Trans. on EMC, Bd. 65, Nr. 4, S. 1117-1123, 2023, doi: 10.1109/TEM.2023.3273217
- [67] C. Paul, F. Heidler, „Three types of M-Components and ICC-Pulses and their characteristics obtained from negative upward lightning measured at Peissenberg Tower“, Int. Conf. on Lightning Protection, Rzeszow, 2018, S. 1-6, doi: 10.1109/ICLP.2018.8503397
- [68] K. Berger, R. Anderson, H. Kroninger, „Parameters of lightning flashes“, Electra, Nr. 41, 1975, S. 23-37
- [69] M. Miki, T. Miki, A. Asakawa, T. Shindo, S. Yokoyama, „Characteristics of upward leaders of Winter lightning in the coastal area of the sea of Japan“, IEEJ Trans. on Power and Energy, Bd.132, Nr. 6, S. 560–567, 2012, doi: 10.1541/ieejpes.132.560
- [70] D. Wang, N. Takagi, „Characteristics of winter lightning that occurred on a windmill and its lightning protection tower in Japan“, IEEJ Trans. Power Energy, Bd. 132, Nr. 6, S. 568-572, 2012
- [71] D. Wang, N. Takagi, „Three unusual upward positive lightning triggered by other nearby lightning discharge activity“, Int. Lightning Detection Conf., Broomfield, USA, 2012

- [72] F. Heidler, M. Manhardt, K. Stimper, „Self-initiated and other-triggered positive upward lightning measured at the Peissenberg Tower, Germany“, 2014 Int. Conf. on Lightning Protection, Shanghai, 2014, S. 157-166, doi: 10.1109/ICLP.2014.6973113
- [73] F. Heidler, M. Manhardt, K. Stimper, „Upward positive lightning measured at the Peissenberg Tower, Germany“, 2013 Int. Symp. on Lightning Protection, Belo Horizonte, 2013, S. 82-90, doi: 10.1109/SIPDA.2013.6729214
- [74] N. Watanabe, A. Nag, G. Diendorfer, H. Pichler, W. Schulz, V. Rakov, H. Rassoul, „Characteristics of currents in upward lightning flashes initiated from the Gaisberg Tower“, IEEE Trans. on EMC, Bd. 61, Nr. 3, S. 705-718, 2019, doi: 10.1109/TEMC.2019.2916047
- [75] EUROCAE ED-105, „Aircraft lightning test methods“, European Organisation for Civil Aviation Equipment – Norm und SAE -Norm, Paris, 2005
- [76] J. Hourtane, „Current generator delivering the A, B, C, D waveform for direct lightning effects simulation on aircraft“, Int. Conf. on Lightning and Static Electricity, Bath, 1989, 5A.5.1- 5A.5.6
- [77] F. Drumm, „Untersuchung der Blitzschutz-Effektivität von segmentierten Ableiterstreifen“, Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, 1998
- [78] D. Kind, „An introduction to high-voltage experimental technique“, Fried. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, Braunschweig, 1978, ISBN 3-528-08383-2
- [79] W. Zischank, F. Drumm, R.J. Fisher, G.H. Schnetzer, M. Morris, „Reliable simulation of metal surface penetration by lightning continuing currents“, Int. Aerospace and Ground Conf. on Lightning and Static Electricity, Williamsburg, Virginia, 1995, DOI:10.2172/102198
- [80] G. Hohe, F. Matz, „Elektrische Sicherheit“ VDE-Verlag, Berlin, Offenbach, 1999, ISBN 3-8007-2500-2
- [81] N. Hyltén-Cavallius, „High-Voltage Laboratory Planning“, High Voltage Test System Emil Haefely & Cie AG, Schweiz, 1986
- [82] W. Boening, „Elektrische Energietechnik, Band 1: Maschinen“, 29. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 1978, ISBN 3-540-08585-8

- [83] R. Fischer, „Elektrische Maschinen“ 14. Auflage, Hanser Verlag, 2009, ISBN 978-3-446-41754-0
- [84] R. Kories, H. Schmidt-Walter, „Taschenbuch der Elektrotechnik“, 12. Auflage, Verlag Europa-Lehrmittel, Haan-Gruiten, 2022, ISBN 978-3-8085-5866-9
- [85] L. Papula, „Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler Band 1“, 12. überarbeitete und erweiterte Auflage, Vieweg+Teubner |GWV Fachverlage, Wiesbaden, 2009, ISBN 978-3-8348-0545-4
- [86] IEC 62305-1, „Protection against lightning-Part 1: General principles“, Int. Standard, Aufl. 2.0, 12/2010, ISBN 978-2-88912-282-6
- [87] RTCA/DO-160F, „Environmental conditions and test procedures for airborne equipment, Section 23: Lightning direct effects“, RTCA Inc., Washington DC, 2007
- [88] G. Brocard, „Simulation in LTSpice IV: Handbuch, Methoden, und Anwendungen“, Swiridoff Verlag, Künzelsau, 2013, ISBN 978-3899292572
- [89] H. Singer, H.-D Bruens, A. Freiberg, „CONCEPT II - Manual of the Program System“, Universität Hamburg-Harburg, Deutschland, 2005
- [90] A. Küchler, „Hochspannungstechnik“, 3. neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009, ISBN 978-3-540-78412-8, doi: 10.1007/978-3-540-78412-8
- [91] H. Brüns, „Pulserregte elektromagnetische Vorgänge in dreidimensionalen Stabstrukturen“ Dissertation, Universität der Bundeswehr Hamburg, Hamburg, 1985
- [92] P. Hasse, W. Kathrein, „Arbeitsschutz in elektrischen Anlagen“, VDE-Verlag, Berlin, Offenbach, 1996, ISBN 3-8007-2185-6
- [93] G. Wellenreuther, D. Zastrow, „Automatisieren mit SPS Theorie und Praxis“, 2. Auflage, Vieweg Verlag, Braunschweig, 2002, ISBN: 978-3-528-13910-0, DOI: 10.1007/978-3-663-05705-5
- [94] D. González-Niño, „Die Wirkung von Blitzstrom-Lichtbogen auf Bleche“, Dissertation, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, 2006

- [95] I. Metwally, A. A-Rahim, F. Heidler, W. Zischank, „Computation of transient-temperature profiles in objects exposed to simulated lightning currents“ Bologna Power Tech Conf. Proceedings, Bologna, 2003, Bd. 14, S. 6., doi: 10.1109/PTC.2003.1304132
- [96] I. Metwally, F. Heidler, W. Zischak, „Measurement of the rear-face temperature of metals struck by lightning long-duration currents“, Euro. Trans. On Electrical Power, 2004, Bd. 14, S. 201-222 doi:10.1002/etep.16
- [97] I. Metwally, F. Heidler, W. Zischak, „Factors influencing the surface-temperature rise of metals exposed to different lightning currents“, Int. Conf. On Lightning Protection, 2002, S. 779-784 doi:10.1002/etep.16
- [98] A. Garolera, S. F. Madsen, M. Nissim, J. D. Myers, J. Holboell, „Lightning Damage to Wind Turbine Blades From Wind Farms in the U.S.“ in IEEE Trans. on Power Delivery, Bd. 31, Nr. 3, S. 1043-1049, 2016, doi: 10.1109/TPWRD.2014.2370682
- [99] W. Adyatma, B. Denov, S. Hidayat, R. Zoro, „Tropical Lightning Damage on Various Commercial Aircraft Shapes and Sizes“, Int. Conf. on Lightning Protection, Colombo, 2021, S. 01-05, doi: 10.1109/ICLPandSIPDA54065.2021.9627371
- [100] Z. Duan, X. Si, S. Qiu, Y. Zhao, C. Song, K. Yao, J. Duan, „Lightning direct effect experimental research on rotor blade of a helicopter“, IEEE Int. Power Modulator and High Voltage Conf., Santa Fe, 2014, S. 295-299, doi: 10.1109/IPMHVC.2014.7287267
- [101] Y. Zhao, C. Yang, Z. Fu, „Experimental investigation of the damage of GFRP under 10/350 μ s simulated lightning currents“ Int. Conf. on Lightning, Hong Kong, 2019, S. 1-5, doi: 10.1109/APL.2019.8816028
- [102] X. Su, M. Zhou, S. Zheng, L. Cai, J. Wang, Y. Fan, „Damage Differences of Carbon Fiber Reinforced Polymer under Different Lightning Current Components“ Conf. on Energy Internet and Energy System Integration, Wuhan, 2020, S. 1065-1068, doi: 10.1109/EI250167.2020.9346781
- [103] J. Sun, S. Li, Y. Guo, X. Yao, Y. Wu, M. Rong, „Lightning Induced-damage Characteristics of CFRP Composites under Lightning Arc“ Int. Conf. on High Voltage Engineering and Applications, Chongqing, 2022, S. 1-4, doi: 10.1109/ICHVE53725.2022.9961820

- [104] W. Zischank, F. Drumm, R.J. Fisher, G.H. Schnetzer, M. Morris, „Reliable simulation of metal surface penetration by lightning continuing currents“, Int. Aerospace and Ground Conf. on Lightning and Static Electricity, Williamsburg, Virginia, 1995, DOI:10.2172/102198
- [105] X. Liu, X. Bi, C. Zhang, Y. Zhang, B. Tao, S. Wang, „Damage characteristics of oil pipelines under different lightning current components“ Int. Conf. on Lightning Protection, Dresden, 2024, S. 889-895
- [106] P. Wang, G. Liu, X. Fang, L. Chen, S. Chen, D. Guo, X. Yan, W. Lyu, „Experiments for Influence of Arc Ignition Metal Wire on Injected Energy in Artificially Triggered Lightning and Laboratory-Generated Lightning Return Strokes“ IEEE Trans. on Power Delivery, Bd. 40, Nr. 2, S. 852-863, 2025, doi: 10.1109/TPWRD.2025.3528581
- [107] Y. Liu, Y. Wang, „Is Indirect Electrode a Good Choice for Simulated Lightning Damage Tests?—The Effect of Metal Vapor“ IEEE Trans. on Plasma Science, Bd. 49, Nr. 5, S. 1661-1668, 2021, doi: 10.1109/TPS.2021.3073534
- [108] A. Kern, „Theoretische und experimentelle Untersuchung der Erwärmung von Metallblechen bei Blitzeinschlag“, Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, 1990
- [109] N. Shirke, V. Ghase, V. Jamdar, V., „Recent advances in stealth coating“, Polym. Bull., Bd. 81, S. 9389–9418, 2024, doi:10.1007/s00289-024-05166-4
- [110] S. Lu, J. Huang, L. Song, M. Yi, „A study on zoning coating method of absorbing materials for stealth aircraft“, Optik, Bd. 208, 2020, doi: 10.1016/j.ijleo.2019.163912
- [111] Software FlexPro 2019, 12.0.22, Weisang GmbH, Sophie-Krämer-Str. 13, D-66386 St. Ingbert, Deutschland, <https://www.weisang.com/>
- [112] R. Benölken, H.-J. Gorski, S. Müller-Philipp, „Leitfaden Geometrie“, 7. Überarbeitete und erweiterte Auflage, Springer Spektrum, Wiesbaden, 2018, ISBN 978-3-658-23377-8, doi.org/10.1007/978-3-658-23378-5

- [113] G. Chen, L. He, B. Zhao, H. Zhang, Z. Zhao, H. Zeng, J. Lei, X. Liu, „Effects of Working Medium Gases on Emission Spectral and Temperature Characteristics of a Plasma Igniter“, Journal of Spectroscopy, S. 1-10, 2019, doi: 1-10. 10.1155/2019/5395914.
- [114] D. Luo, A. Pradhan, H. Saraph, P. Storey, Y. Yu, „Atomic data for opacity calculations. X. Oscillator strengths and photoionisation cross sections for O III“, Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, At. Mol. Opt. Phys. Bd. 22, S. 389-406, doi 10.1088/0953-4075/22/3/006
- [115] National Institute of Standards and Technology, Physical Meas Laboratory, NIST Atomic Spectra Database Lines Data, Zugriffsdatum 17.07.2025, <https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database>, <https://dx.doi.org/10.18434/T4W30F>
- [116] K. Simonyi, „Theoretische Elektrotechnik“, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaft, Berlin, 1989, ISBN 3-326-00045-6
- [117] I. Bronstein, K. Semendjajew, „Taschenbuch der Mathematik“, 15. Auflage Verlag Harri Deutsch, Zürich und Frankfurt/Main, 1975, ISBN 3-87144 016-7
- [118] H. Heuser, „Gewöhnliche Differentialgleichungen“, B.G. Teubner Verlag, Stuttgart, 1989, ISBN 3-519-02227-3
- [119] W. Zischank, „Eine Crowbar-Funkenstrecke in einem kapazitiven Stoßstromgenerator zur Simulation direkter Blitzströme“ Int. Conf. on Lightning Protection, Den Haag, S. 201-208, 1983
- [120] V. Cooray, M. Fernando, „Lightning protection“, The Institution of Engineering and Technology, London, 2010, ISBN 978-0-86341-744-3
- [121] T. Burton, N. Jenkins, E. Bossanyi, D. Sharpe, M. Graham, „Wind energy handbook“, 3. Auflage, John Wiley & Sons, USA, 2021, LCCN 2020036473, ISBN 9781119451150
- [122] VG 95371-10, „Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) einschließlich Schutz gegen den Elektromagnetischen Impuls (EMP) und Blitz — Allgemeine Grundlagen“, DIN Media, DIN-Normenstelle Elektrotechnik (NE), Februar, 2018
- [123] SAE ARP 5416, „Aircraft Lightning Test Methods“, SAE Int., www.sae.org, März, 2005

- [124] AECTP-250, „Electrical and electromagnetic environmental conditions“, Allied Environmental Conditions and Test Publication, Aufl. 1, Leaflet 254, Februar, 2009
- [125] MIL-STD-464D, „Electromagnetic environmental effects: Requirements for systems“, US Department of Defense Interface Standard, Dezember 2020, Engineering.Standards@wpafb.af.mil
- [126] MIL-STD-1757, „Lightning qualification test techniques for aerospace vehicles and hardware“, US Department of Defence Interface Standard, Juni, 1980, Engineering.Standards@wpafb.af.mil
- [127] K. Schon, „Stoßspannungs- und Stoßstrommesstechnik“, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010, ISBN 978-3-642-13116-5, doi: 10.1007/978-3-642-13117-2
- [128] W. Zischank, „Schutzfunkenstrecken zur Überspannungsbegrenzung bei direkten Blitzeinschlägen“, Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, 1983
- [129] W. Zischank, „A surge current generator with a double-crowbar spark gap for the simulation of direct lightning strike effects“ Int. Symp. High Voltage Eng., Braunschweig, Paper 61.07, S. 1-3, 1987

Liste der eigenen Veröffentlichungen und Preise

Eigene Veröffentlichungen

F. Heidler, F. Modlinger, „Parameters of the Initial Continuous Current of Negative Upward Lightning Measured at the Peissenberg Tower, Germany, From 1992 to 2022“ IEEE Trans. on EMC, Bd. 65, Nr. 4, S. 1117-1123, 2023, doi: 10.1109/TEM.C.2023.3273217

F. Modlinger, F. Heidler, „Initial continuous current of the negative upward lightning to the Peissenberg Tower, Germany“ Int. Symp. on High Voltage Engineering, Glasgow, 2023, S. 434-439, doi: 10.1049/icp.2024.0556

F. Modlinger, F. Heidler, C. Karch, „Comparison of the Damages Produced by Lightning Current Tests for Aircrafts with Unipolar and Oscillatory Waveform for Component A“ Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility, Krakow, 2023, S. 1-6, doi: 10.1109/EMCEurope57790.2023.10274353

F. Heidler, F. Modlinger, „Initial Current Variation of the ICC Considering the Negative Upward Lightning Measured at the Peissenberg Tower, Germany“ IEEE Trans. on EMC, Bd. 66, Nr. 4, S. 1176-1182, 2024, doi: 10.1109/TEM.C.2024.3404510

F. Modlinger, F. Heidler, „ICC of Negative Upward Flashes to the Peissenberg Tower, Germany“, Int. Conf. on Lightning Protection, Dresden, 2024, S. 783-789

F. Modlinger, F. Heidler, „Parameter der einleitenden Langzeitströme negativer Aufwärtsblitze gemessen am Peissenberg-Turm, Deutschland, von 1992 bis 2022“, VDE Blitzschutztagung, Aschaffenburg, 2023, VDE Verlag, ISBN 978-3-8007-6201-9

Eigene Preise

„Young Scientist award“ des Scientific committee of the international conference on lightning protection (ICLP) bei der 37. Internationalen Conference on Lightning Protection ICLP 2024