

Messung von Blitzströmen und Blitzfeldern

Michael Manhardt

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

Doktor-Ingenieur
(Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Gutachter: 1. Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus Stimper
2. Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Weyh
3. Prof. Dr.-Ing. habil. Fridolin Heidler

Die Dissertation wurde am 05.12.2013 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 17.04.2014 angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 06.05.2014 statt.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Formelzeichen und Naturkonstanten	v
Wichtige Formelzeichen.....	v
Naturkonstanten.....	vii
1 Einleitung	1
2 Grundlagen der Blitzentladungen	3
2.1 Entstehung und Eigenschaften von Gewittern.....	3
2.2 Blitzströme.....	4
2.2.1 Typen von Blitzentladungen.....	4
2.2.2 Wolke-Erde-Blitze (Abwärtsblitze).....	5
2.2.3 Erde-Wolke-Blitze (Aufwärtsblitze).....	7
2.2.4 Komponenten von Blitzströmen.....	8
2.2.5 Modellierung von Blitzströmen.....	9
2.2.5.1 Blitzkanalmodelle.....	9
2.2.5.2 Blitzstromfunktion.....	9
2.3 Elektrisches und magnetisches Feld von Blitzentladungen.....	10
3 Blitzmessstation Hoher Peißenberg	13
3.1 Geschichte der Messstation.....	13
3.2 Lage und schematische Übersicht.....	14
3.3 Blitzstrom-Messstation im Fernmeldeturm.....	16
3.3.1 Stromsensoren an der Spitze des Peißenbergturmes.....	16
3.3.2 Sensor für die Messung der Blitzstrom-Steilheit (di/dt-Sensor).....	18
3.3.3 Sensor für die Messung des Blitzstromes (i-Sensor).....	20
3.3.4 Messkabel und Erdungskonzept.....	21
3.3.5 Messwertaufzeichnung in der Messkabine.....	22
3.3.5.1 Chassis und Controller des Messrechners.....	22
3.3.5.2 Messwandlerkarten.....	24
3.3.5.3 Triggerung.....	25
3.3.5.4 Zeitstempel und Triggerweiterleitung.....	27
3.3.5.5 Messsoftware.....	28
3.4 Messeinrichtungen in der Feldmesskabine.....	30
3.4.1 Standort und Aufbau der Messkabine.....	30

3.4.2 Allgemeine Ausstattung der Messkabine.....	31
3.4.3 Sensoren für die Messung des elektrischen Feldes.....	33
3.4.3.1 Kapazitiver elektrischer Feldsensor.....	33
3.4.3.2 E(t)-Sensor.....	35
3.4.3.3 dE/dt-Sensor.....	40
3.4.3.4 Überprüfung der Rechenergebnisse mit dem Programm COMSOL.....	41
3.4.3.5 Messung des elektrostatischen Feldes mit einer Feldmühle.....	42
3.4.4 Sensoren für die Messung des magnetischen Feldes.....	44
3.4.4.1 Induktiver magnetischer Feldsensor.....	44
3.4.4.2 H(t)-Sensor.....	45
3.4.4.3 dH/dt-Sensor.....	47
3.4.5 Weitere Messeinrichtungen an der Feldmesskabine.....	49
3.4.5.1 Induzierte Spannung auf einer Freileitung.....	49
3.4.5.2 Wetterstation.....	51
3.4.5.3 Videoaufzeichnung.....	51
3.4.6 Zusammenfassung der Kenndaten der Feldsensoren.....	52
3.4.7 Messwertaufzeichnung in der Feldmesskabine.....	52
3.4.7.1 Controller und Messwandlerkarten.....	52
3.4.7.2 Triggerung und Messsoftware.....	54
4 Auswertung der Messergebnisse	57
4.1 Statistische Grundlagen.....	57
4.1.1 Logarithmische Normalverteilung.....	57
4.1.2 Korrelation.....	59
4.2 Messungen des Blitzstroms.....	59
4.2.1 Auswertung der Langzeitströme.....	60
4.2.1.1 Parameter der Langzeitströme.....	60
4.2.1.2 Dauer der Langzeitströme.....	61
4.2.1.3 Ladung der Langzeitströme.....	62
4.2.1.4 Maximalwert des Langzeitstroms.....	63
4.2.2 Auswertung der Stoßströme.....	64
4.2.2.1 Parameter der Stoßströme.....	64
4.2.2.2 Verteilung von Art und Anzahl der Stoßströme.....	66
4.2.2.3 Stärke des Langzeitstroms bei Einsatz des Stoßstroms.....	67
4.2.2.4 Maximalwerte der Stoßströme im Abschnitt A.....	68
4.2.2.5 Anstiegszeit der Stoßströme.....	69

4.2.2.6	Steilheit der Stoßströme.....	72
4.2.2.7	Halbwertsbreite der Stoßströme.....	73
4.2.2.8	Dauer des Abschnitts A der Stoßströme.....	76
4.2.2.9	Ladung der Stoßströme im Abschnitt A.....	78
4.2.2.10	Vorhandensein des Abschnitts B der Stoßströme.....	81
4.2.2.11	Maximalwert der Stoßströme im Abschnitt B.....	82
4.2.2.12	Ladung der Stoßströme im Abschnitt B.....	83
4.2.2.13	Dauer des Abschnitts B der Stoßströme.....	84
4.2.2.14	Gesamte Ladung der Stoßströme.....	85
4.2.2.15	Gesamte Dauer der Stoßströme.....	86
4.2.3	Auswertungen des gesamten Blitzstromverlaufs.....	86
4.2.3.1	Anzahl der Stoßströme je Blitzentladung.....	86
4.2.3.2	Pausenzeiten zwischen den Stoßströmen.....	87
4.2.3.3	Dauer der gesamten Blitzentladung.....	88
4.2.4	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	89
4.3	Schwingungen im Stirnbereich der Stoßströme.....	90
4.3.1	Parameter der Schwingungen.....	90
4.3.2	Auftreten der Schwingungen.....	91
4.3.3	Simulation der Resonanzen des Turmbauwerks.....	92
4.3.3.1	Simulationsmodell.....	92
4.3.3.2	Simulationsergebnisse.....	94
4.4	Fangstangen.....	97
4.5	Videoaufzeichnung der Blitzströme.....	99
4.6	Messung des elektrischen Feldes.....	102
4.6.1	Messung des schnell veränderlichen elektrischen Feldes.....	102
4.6.1.1	Elektrische Felder vom Typ 1.....	103
4.6.1.2	Elektrische Felder vom Typ 2.....	107
4.6.1.3	Elektrische Felder vom Typ 3.....	109
4.6.1.4	Elektrische Felder mit anderem Verlauf.....	111
4.6.2	Messung des langsam veränderlichen elektrischen Feldes.....	111
4.6.3	Zusammenfassung.....	111
4.7	Messung des magnetischen Feldes.....	112
4.7.1	Magnetisches Feld der Stoßströme vom Typ RS-n.....	112
4.7.2	Magnetisches Feld der Stoßströme vom Typ IS-n.....	113
4.7.3	Zusammenfassung.....	114
4.8	Messung der in einer Freileitung induzierten Spannung.....	116

4.8.1 Stoßströme vom Typ IS-n.....	116
4.8.1.1 Zeitlicher Verlauf der eingekoppelten Spannung.....	116
4.8.1.2 Maximalwert der eingekoppelten Spannung.....	117
4.8.2 Stoßströme vom Typ RS-n.....	117
4.8.2.1 Zeitlicher Verlauf der eingekoppelten Spannung.....	117
4.8.2.2 Maximalwert der eingekoppelten Spannung.....	118
4.8.3 Stoßströme vom Typ M.....	119
4.8.4 Zusammenfassung.....	119
5 Zusammenfassung	121
Anhang	123
A1 Tabellen der Messwerte.....	123
A1.1 Langzeitströme.....	123
A1.2 Stoßströme.....	124
A2 Technische Zeichnungen.....	131
A2.1 Turmspitze.....	131
A2.2 E(t)-Sensor.....	132
A2.3 dE/dt-Sensor.....	133
A2.4 H(t)-Sensor.....	134
A2.5 dH/dt-Sensor.....	135
Literaturverzeichnis	137

Verzeichnis der Formelzeichen und Naturkonstanten

Wichtige Formelzeichen

A	Fläche
B	Bestimmtheitsmaß
C	Kapazität
C_A	Antennenkapazität
$C_{A,X}$	Antennenkapazität des Sensors für die Größe X
C_b	Beschaltungskapazität
d	Durchmesser
E	Elektrische Feldstärke
E_Q	Nahfeldkomponente des elektrischen Feldes
E_i	Übergangskomponente des elektrischen Feldes
E_{di}	Fernfeldkomponente des elektrischen Feldes
E_{start}	Elektrische Feldstärke zu Beginn der Messung
f	Frequenz
$f(x)$	Dichtefunktion der Zufallsvariable x
$F(x)$	Verteilungsfunktion der Zufallsvariable x
f_g	Grenzfrequenz
$f_{g,o}$	Obere Grenzfrequenz
$f_{g,o,X}$	Obere Grenzfrequenz des Sensors für die Größe X
$f_{g,u}$	Untere Grenzfrequenz
$f_{g,u,X}$	Untere Grenzfrequenz des Sensors für die Größe X
H	Magnetische Feldstärke
H_i	Übergangskomponente des magnetischen Feldes
H_{di}	Fernfeldkomponente des magnetischen Feldes
i	Strom, Blitzstrom
i_K	Kurzschlussstrom
i_{LZ}	Langzeitstrom
i_{max}	Maximalwert des Stromes
$i_{\text{ü,max}}$	Maximale Überhöhung des Stromes

\vec{k}	Wellenvektor
k_X	Umrechnungsfaktor des Sensors für die Größe X
l	Länge
l_{eff}	Effektive Länge einer Antenne
l_X	Länge des Sensors für die Größe X
L	Induktivität
L_A	Antenneninduktivität
L_i	Innere Induktivität
M	Gegeninduktivität
n	Zählvariable
N	Anzahl
P_V	Verlustleistung
Q	Ladung
Q_A	Ladung des Abschnitts A eines Stoßstroms
Q_B	Ladung des Abschnitts B eines Stoßstroms
r	Radius, radialer Abstand
r_X	Radius des Sensors für die Größe X
R	Widerstand
$R_{m,X}$	Abschlusswiderstand des Sensors für die Größe X
s	Abstand
s_{kor}	Korrigierter Abstand
S_{max}	Maximale Stromsteilheit
S_{10-90}	Mittlere Stromsteilheit
t	Zeit, Dauer
t_{an}	Anstiegszeit
t_A	Dauer des Abschnitts A eines Stoßstroms
t_B	Dauer des Abschnitts B eines Stoßstroms
t_{h1}	Erste Halbwertsbreite eines elektrischen Feldes
t_{h2}	Zweite Halbwertsbreite eines elektrischen Feldes
t_S	Dauer eines Schwingungsvorgangs
t_{50}	Halbwertsbreite eines Stoßstroms
T	Zeitkonstante
$T_{p,S}$	Periodendauer einer Schwingung
T_1	Anstiegszeit
u	Spannung

u_a	Ausgangsspannung
u_e	Eingangsspannung
u_{ind}	Induzierte Spannung
u_{mess}	Messspannung
$u_{m,X}$	Messspannung des Sensors für die Größe X
u_0	Leerlaufspannung
\ddot{u}	Übersetzungsverhältnis
W	Energie
x, y, z	Ortsvariablen
X, Y	Zufallsvariablen

Γ	Wellenwiderstand
η	Feldüberhöhungsfaktor, Korrekturfaktor
θ	Winkel
λ	Wellenlänge
φ	Winkel
Φ	Magnetischer Fluss
τ	Zeitkonstante

Naturkonstanten

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$	Magnetische Feldkonstante
$\varepsilon_0 \approx 8,8542 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$	Elektrische Feldkonstante
$c_0 \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
$\Gamma_0 \approx 377 \text{ } \Omega$	Feldwellenwiderstand des Vakuums

1 Einleitung

Seit jeher sind Blitze sowohl ein beeindruckendes Naturschauspiel, als auch eine Bedrohung für Leben und Gesundheit des Menschen. Nachdem Blitze über Jahrtausende als Ausdruck göttlicher Macht angesehen wurden, setzte sich erst im 18. Jahrhundert die Erkenntnis durch, dass es sich bei Blitzen um elektrische Entladungen handelt. Somit konnten auch erste Schutzmaßnahmen entwickelt werden, wozu auch das noch heute verwendete System bestehend aus Fangstange, Ableitung und Erdung zählt, welches von Benjamin Franklin vorgeschlagen wurde. Diese Komponenten bieten einen Basisschutz gegen direkte Blitzeinschläge und deren Folgen, wie beispielsweise Brände.

Mit dem Einzug elektronischer Komponenten in immer weitere Bereiche des täglichen Lebens hat sich das Bedrohungsszenario durch Blitzeinschläge fast vollständig gewandelt, da die größten materiellen und finanziellen Gefahren heute von sogenannten indirekten Blitzeinschlägen ausgehen. Hierunter sind durch entfernte Blitzeinschläge verursachte Überspannungen auf Leitungen der elektrischen Energieversorgung oder durch schnell veränderliche magnetische Felder in Leiterbahnen induzierte Spannungen und Ströme zu verstehen.

Grundlage jeder Einrichtung für den Blitzschutz sind umfangreiche nationale und internationale Normenwerke, welche Blitze und ihre Auswirkungen klassifizieren und geeignete Schutzmaßnahmen vorschreiben. Unverzichtbare Basis dieser Normung sind immer Messungen realer Blitzereignisse, wobei deren Erfassung aufgrund ihrer extremen Parameter und ihres statistischen Auftretens jedoch gewisse messtechnische Schwierigkeiten bereiten. Prinzipiell sind derartige Blitzmessungen nur an Objekten mit einer hinreichend großen Einschlagwahrscheinlichkeit, wie Türmen oder anderen hohen Bauwerken, sinnvoll durchführbar.

Bereits vor über 100 Jahren wurden von Pockels [40] erste Versuche unternommen, aus der durch den Blitzstrom hervorgerufenen Magnetisierung von Basaltstäbchen auf die Stärke des Blitzstroms zu schließen. Eine Weiterentwicklung stellt die Blitzstrommessung mit Magnetstäbchen dar, welche ab den 1930er-Jahren in Deutschland in großer Zahl an Freileitungsmasten zu Einsatz kamen [19]. Bei beiden Methoden ist es jedoch nur möglich, den Maximalwert des stärksten Blitzstroms in einem bestimmten Zeitraum zu bestimmen. Über die einzelnen Komponenten des Stroms und deren zeitlichen Verlauf lässt sich keine Aussage treffen.

Eine wesentliche Neuerung für die Blitzmessung stellte die Verwendung oszillografischer Aufzeichnungsverfahren dar, welche zuerst von McEachron in den 1930er-Jahren am Empire State Building in New York durchgeführt wurden [33]. Umfangreiche Messungen dieser Art wurden schließlich am Monte San Salvatore von Berger in den Jahren 1943 bis 1971 unternommen (z.B. [4], [5], [6]). Die Ergebnisse dieser Messungen fanden in der Fachwelt breite Anerkennung und sind noch heute eine wichtige Basis der Blitzforschung.

Auch die elektrischen und magnetischen Felder, welche durch die Blitzentladung verursacht werden, waren schon früh Gegenstand von Messungen, beginnend in den 1920er-Jahren in Schweden durch Norinder [38] sowie in den 1930er-Jahren durch Malan und Schonland (z.B. [32]) in Südafrika. Schnell veränderliche elektrische und magnetische Felder wurden ab den 1970er-Jahren in den USA von Krider [29] erfasst sowie ab den 1980er-Jahren auch an der Universität der Bundeswehr München ([3], [17], [23], [26]).

Neben der in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Blitzmessstation auf dem Hohen Peißenberg werden Messungen des Stromes sowie der elektrischen und magnetischen Felder von Blitzereignissen heute an zahlreichen Türmen und anderen hohen Bauwerken weltweit durchgeführt. Namhafte Standorte sind dabei in Europa der Fernsehturm auf dem Gaisberg bei Salzburg (z.B. [10], [39], [53]) und der Fernsehturm auf dem Säntis in der Ostschweiz (z.B. [42], [43]) sowie weltweit mehrere Stationen in Nord- und Südamerika und Asien. Die messtechnische Ausstattung orientiert sich dabei in weiten Teilen an jener der Messstation auf dem Hohen Peißenberg.

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist nach einer Einführung in die Theorie der Blitzentladungen die vollständige Beschreibung aller Einrichtungen der Messstation sowie die Auswertung der bis zum 31.12.2012 erzielten Messergebnisse.

2 Grundlagen der Blitzentladungen

2.1 Entstehung und Eigenschaften von Gewittern

Grundlegende Voraussetzung für die Entstehung von Gewittern ist das Vorhandensein feuchter Luftmassen. Da die Dichte von Luftmassen mit steigender Temperatur abnimmt, entwickelt sich durch den Dichteunterschied gegenüber der umgebenden Luft eine Aufwärtsströmung, infolge derer die Luft abkühlt und der enthaltene Wasserdampf kondensiert und gefriert und sich somit Wolken ausbilden. Durch die frei werdende Kondensations- bzw. Gefrierwärme wird dieser Prozess weiter aufrecht erhalten, sodass die Wolken Höhen von über 10 km erreichen können (z.B. [30]).

Die Meteorologie unterscheidet im wesentlichen vier Arten, durch welche die Luftmassen zum Aufsteigen bewegt werden, und somit vier Gewitterarten. Wärmegewitter können entstehen, wenn bodennahe Luftschichten durch starke Sonneneinstrahlung aufgeheizt werden und aufgrund ihrer abnehmenden Dichte aufsteigen. Dieser Gewittertyp tritt folglich in mittleren Breiten nur in den Sommermonaten auf. Bei Kaltfrontgewittern schieben sich kalte Luftmassen unter örtliche wärmere Luftmassen und drücken diese empor. Da für diese Vorgänge lediglich die Temperaturdifferenz der beteiligten Luftmassen entscheidend ist, können Gewitter dieses Typs in allen Jahres- und Tageszeiten auftreten. Orografische Gewitter können nur bei charakteristischen landschaftlichen Gegebenheiten entstehen, und zwar wenn Luftmassen beim Übergang von flachem in bergiges Gelände zum Aufsteigen gezwungen werden. Ähnlich sind die Voraussetzungen für die Entwicklung von Warmfrontgewittern, wobei hier das „Hindernis“ durch bodennahe kalte Luftmassen gebildet wird, über die die wärmeren Luftmassen aufgleiten ([1], [18], [21]).

Sind die Luftmassen durch einen der oben beschriebenen Prozesse in größere Höhen aufgestiegen und ist der enthaltene Wasserdampf zu Eis- bzw. Wasserteilchen geworden, werden diese aufgrund starker vertikaler Luftbewegungen in der Wolke durch noch nicht abschließend geklärte Mechanismen elektrisch geladen. Wesentliche mechanische Vorgänge dürften hierbei die Reibung zwischen den Teilchen und Zerstäubungsvorgänge von Wassertropfen sein. Eine entscheidende Rolle wird der Masse der Teilchen und der bei diesen Prozessen vorherrschenden Temperatur zugeschrieben. Bei Temperaturen unter etwa -15°C sind leichtere Teilchen positiv und schwerere Teilchen negativ aufgeladen, so dass die Wolke vereinfacht

dargestellt im oberen Bereich ein positives und im unteren Bereich ein negatives Ladungszentrum besitzt. Bei niedrigeren Temperaturen scheint sich die Polarität umzukehren. Am äußersten unteren Ende einer Gewitterwolke kann sich im allgemeinen ein weiterer positiv geladener Bereich befinden. Dieser wird durch Ladungen gebildet, die durch die vorherrschende Feldstärke von Objekten auf der Erdoberfläche als Korona abgesprüht werden. Diesen grundsätzlichen Aufbau einer Gewitterzelle zeigt Bild 2.1. Die tatsächliche Anordnung der Ladungszentren in Gewitterwolken wird durch diese Modellvorstellung in den meisten Fällen hinreichend genau beschrieben, dürfte aber in der Realität wesentlich komplexer sein. Hierzu sei auf die weiterführende Literatur (z.B. [1], [28], [37], [48], [51]) verwiesen.

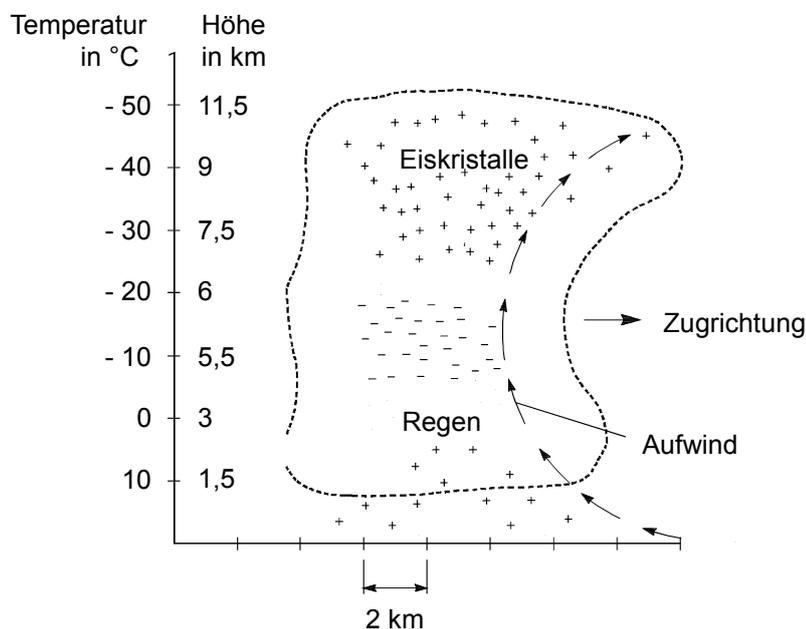


Bild 2.1: Prinzipieller Aufbau einer Gewitterwolke

2.2 Blitzströme

2.2.1 Typen von Blitzenladungen

Beginnt oder endet der Blitzkanal nicht im negativen, sondern im meist darübergelegenen positiven Ladungszentrum der Wolke, so spricht man von einem positiven Blitz; im anderen Falle von einem negativen Blitz. Die Benennung eines Blitzes kennzeichnet also die Polarität der von der Wolke zur Erde transportierten Ladungsträger. Je nach Ausbreitungsrichtung des Leitblitzes wird bei Blitzen außer-

dem unterschieden zwischen Erde-Wolke- und Wolke-Erde-Blitzen. Wird eine Blitzentladung nicht zwischen Erde und Wolke ausgelöst, sondern findet ein Ladungsausgleich zwischen zwei Gewitterwolken oder innerhalb einer Gewitterwolke statt, so wird dies als Wolke-Wolke-Blitz bezeichnet. Eine Einteilung nach Polarität ist hierbei nicht sinnvoll.

2.2.2 Wolke-Erde-Blitze (Abwärtsblitze)

Anteilmäßig stellen negative Abwärtsblitze die größte Gruppe der zur Erde reichenden Blitzentladungen dar. Aufgrunddessen wird dieser Blitztyp im folgenden zur Beschreibung herangezogen; die Mechanismen der positiven Blitze sind grundsätzlich analog zu betrachten.

Wird durch die im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Vorgänge der Ladungstrennung in einer Gewitterwolke eine große Raumladungsdichte in der Größenordnung von 10 nC/m^3 erreicht und ist dadurch lokal eine hohe Feldstärke gegeben (die Annahmen reichen dabei von einigen 10 kV/m bis zu einigen 100 kV/m), so bestehen die Voraussetzungen zum Einsatz von Leitblitzentladungen (Leader). Die Bestandteile eines derartigen Leaders sind ein mehrere 1000°C heißer Plasmakanal mit einem Durchmesser von etwa 1 cm und eine diesen umgebende Koronahülle mit einem Durchmesser von einigen Metern, in welcher die aus der Wolke abfließenden Ladungen gespeichert werden [21]. Die Ladungsdichte liegt dabei in der Größenordnung von 1 C/km .

Vom Kopf eines derartigen Leitblitzes gehen schließlich mehrere energieschwache Entladungen, sogenannte Streamer, aus, welche um die Ladungszufuhr aus dem bestehenden Abschnitt des Leitblitzes konkurrieren. Während dieses Prozesses ist in den Streamer-Strecken noch nicht genügend Energie angesammelt, um ein sichtbares Leuchten hervorzurufen. Die Blitzentladung entwickelt sich nun in dem Streamer, der die meiste Ladung (und damit Energie) in sich versammelt hat und damit zu einem neuen Leitblitz-Abschnitt wird, welcher dann als Fortsetzung des Blitzkanals sichtbar wird. Durch dieses stufenweise Wachstum des Blitzkanals wird die englische Bezeichnung „stepped leader“ verständlich. Falls zwei oder mehrere Streamer annähernd gleiche Energiemengen beinhalten, ergibt sich eine deutlich sichtbare Gabelung des Blitzkanals, wobei der Weg des Blitzkanals insgesamt grundsätzlich zufällig ist. Als typische Kennwerte des Leitblitzes wird eine Vorwachsengeschwindigkeit im Bereich von $1 \text{ m}/\mu\text{s}$ und eine Länge der Leitblitz-Abschnitte (Ruckstufen) von einigen 10 m angegeben.

Durch die Annäherung des Blitzkanals an die Erdoberfläche steigt dort der Betrag der elektrischen Feldstärke stark an, sodass an Stellen, an denen das elektrische Feld stark inhomogen ist (z.B. Ecken oder Kanten von Bauwerken, Baum- oder

Bergspitzen und Ähnliches), die Durchbruchfeldstärke der Luft überschritten werden kann. In diesem Fall bilden sich an den betreffenden Stellen Fangentladungen aus, welche dem sich annähernden Leitblitzkanal entgegen wachsen. Trifft eine dieser Fangentladungen auf den Leitblitzkanal, so ist damit eine leitende Verbindung zum Erdboden hergestellt und die im Blitzkanal gespeicherte Ladung wird zur Erde abgeführt. Die letzte Strecke der Blitzentladung, die durch die Fangentladung geschlossen wird, bezeichnet man als Enddurchschlagstrecke. Für die Länge der Enddurchschlagstrecke wird als Richtwert in Abhängigkeit der maximalen Stromamplitude angegeben [11]:

$$r = 10 \text{ m} \cdot \left(\frac{i_{\text{max}}}{1 \text{ kA}} \right)^{0.65} \quad (1)$$

Die Gleichung (1) beruht auf der Tatsache, dass die Enddurchschlagstrecke mit steigender Ladung des Blitzes zunimmt, und diese auch für den maximalen Blitzstrom bestimmend ist. Eine schematische Veranschaulichung des beschriebenen Vorgangs zeigt Bild 2.2.

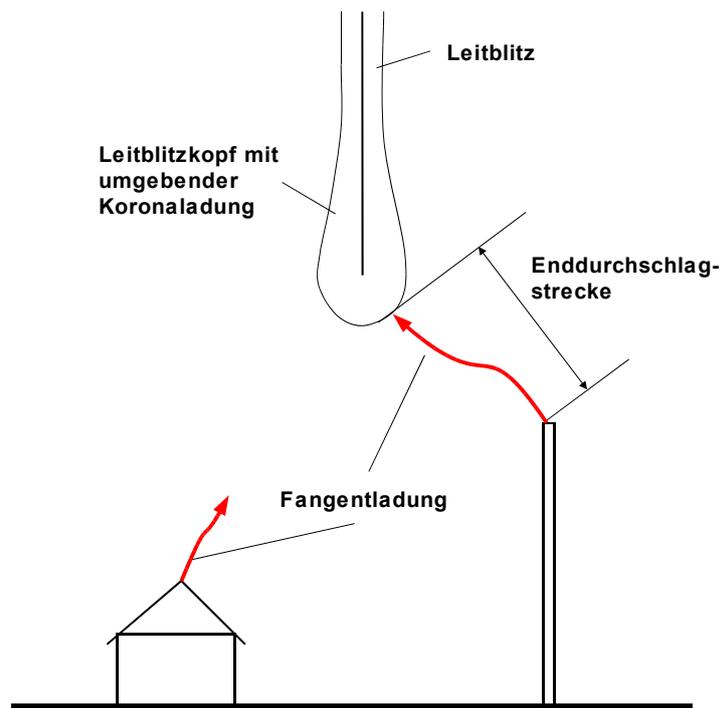


Bild 2.2: Ausbildung von Fangentladungen

Ist durch die Fangentladung eine Verbindung zum Erdboden hergestellt, so beginnt die eigentliche Blitzentladung durch das Abfließen der in der Koronahülle

des Leitblitzes gespeicherten Ladung zum Erdboden. Da das Abfließen der Ladungen notwendigerweise mit den dem Erdboden am nächsten gelegenen Ladungen beginnt, ergibt sich das Bild einer nach oben laufenden Stromwelle. Da diese Entladung somit der Ausbreitungsrichtung des Leitblitzes entgegengerichtet ist, ergibt sich die englische Bezeichnung „return stroke“ für die Hauptentladung. Als Geschwindigkeit der Hauptentladung findet man Werte zwischen 70 und 150 m/ μ s. (z.B. [7], [27], [31], [41])

Nach Abschluss der Hauptentladung bleibt der Blitzkanal als heißer, ionisierter Kanal noch eine gewisse Zeit bestehen. Bei entsprechender Ladungsverteilung ist es nun möglich, dass sich weitere Folgeblitze durch diesen Kanal ausbilden. Der Ablauf ist dem des Erstblitzes ähnlich, allerdings pflanzt sich der Leitblitz kontinuierlich anstatt in Stufen fort, da der Blitzkanal nicht mehr aufgebaut werden muss und somit der Streamer-Mechanismus entfällt. Dieser Leitblitz in einem bestehenden Blitzkanal wird als „dart leader“ bezeichnet. Weicht dieser Leitblitz vom bestehenden Kanal ab oder ist dieser nicht mehr ausreichend leitfähig, so entspricht er einem normalen Leitblitz, wie zuvor beschrieben.

Sowohl bei einem Erst- als auch bei einem Folgeblitz kann weitere Ladung aus der Gewitterwolke in den Blitzkanal einfließen, wodurch sich ein Strom mit annähernd konstanter Amplitude, ein sogenannter Langzeitstrom, ergibt. Die Amplitude dieser Langzeitströme liegt im Bereich von einigen 10 A bis zu einigen 100 A; die Dauer beträgt zwischen einigen 10 und einigen 100 ms.

2.2.3 Erde-Wolke-Blitze (Aufwärtsblitze)

Der beschriebene Mechanismus des Startens einer Leaderentladung von Objekten auf der Erdoberfläche kann in bestimmten Fällen bereits ohne die Annäherung eines Blitzkanals ablaufen. Die Voraussetzung dafür ist eine Grundfeldstärke, welche an exponierten Objekten, wie z.B. im vorliegenden Fall einem Fernsehturm, zu Feldüberhöhungen führt, die die Durchbruchfeldstärke überschreiten. Während des Aufbaus des Leaders fließt über das Objekt ein Langzeitstrom, welcher zum Vorwachsen des Leaders erforderlich ist. Dieser Langzeitstrom ist ein Strom mit einer annähernd konstanten Amplitude von einigen 100 A und einer Dauer von einigen 10 ms. Beim Aufbau des Leaders können sich wie beim Abwärtsblitz Verzweigungen ergeben, welche in diesem Fall allerdings nach oben geöffnet sind. Ein Aufwärtsblitz lässt sich somit auch rein optisch von einem Abwärtsblitz unterscheiden. Während des Stromflusses des Langzeitstroms können sich diesem Stoßströme überlagern, welche eine Amplitude von einigen Ampère aufweisen und als IS-Komponenten bezeichnet werden [35]. Diese können durch von der Wolke ausgehende Leader entstehen, die auf den sich nach oben aufbauenden Blitzkanal treffen und sich durch diesen zur Erde hin entladen. An den Langzeit-

strom können sich ebenfalls Stoßströme anschließen, welche als RS-Komponenten bezeichnet werden. Bei diesen handelt es sich um von einer Wolke ausgehende Stoßströme, welche den durch den Langzeitstrom ionisierten Blitzkanal nutzen. Somit haben sie ähnliche Charakteristika wie Entladungen von Abwärtsblitzen.

2.2.4 Komponenten von Blitzströmen

Grundsätzlich lassen sich Blitzströme, wie in den vorangegangenen Abschnitten bereits beschrieben, in Langzeitströme und Stoßströme einteilen. Bei den Stoßströmen lassen sich folgende Typen unterscheiden (z.B. [15], [16], [52]):

- Typ IS: Die einem einleitenden Langzeitstrom eines Aufwärtsblitzes überlagerten Stoßströme werden als IS-Impulse (*initial stage*) oder auch als ICC-Impulse (*initial continuous current*) bezeichnet.
- Typ RS: Der Stoßstrom einer Hauptentladung (*return stroke*) schließt sich bei Aufwärtsblitzen an den einleitenden Langzeitstrom an, bei Abwärtsblitzen stellt der *return stroke* die erste Komponente des Blitzstroms dar.
- Typ M: Stoßströme, die einem auf eine Hauptentladung folgenden Langzeitstrom überlagert sind, werden als M-Komponenten bezeichnet.

Das folgende Bild 2.3 fasst die Komponenten der Blitzströme idealisiert anhand eines negativen Aufwärtsblitzes zusammen.

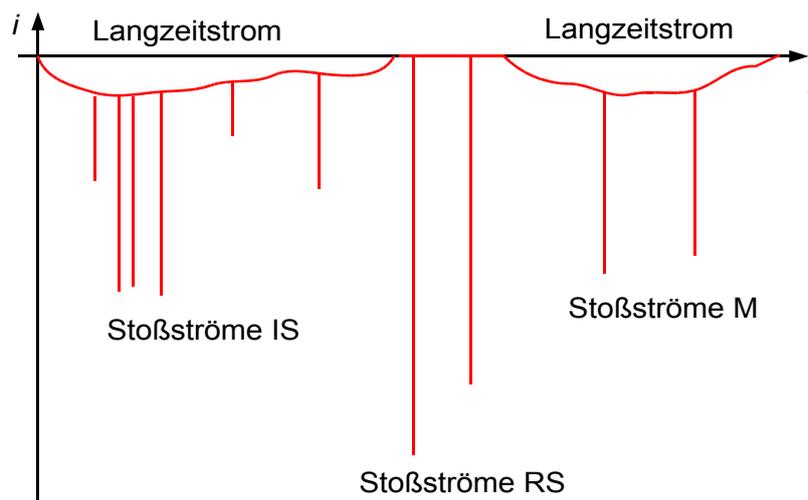


Bild 2.3: Komponenten von Blitzströmen

2.2.5 Modellierung von Blitzströmen

2.2.5.1 Blitzkanalmodelle

Grundaufgabe von Blitzkanalmodellen ist die Angabe der räumlichen und zeitlichen Verteilung des Stromes auf dem Blitzkanal zur späteren Berechnung der abgestrahlten elektrischen und magnetischen Felder.

Anhand ihrer Grundstruktur lassen sich Blitzkanalmodelle in zwei Klassen einteilen. Blitzkanalmodelle der TL-Klasse (*transmission line*) verwenden eine Stromquelle am Einschlagpunkt und geben den Strom durch den Blitzkanal als sich nach oben fortpflanzende Wanderwelle an. Auf die physikalischen Gegebenheiten der Entladung eines Blitzkanals gehen die Modelle dabei nicht ein. Bei den Blitzkanalmodellen der TCS-Klasse (*travelling current source*) dagegen wird eine sich an der Spitze des Blitzkanals nach oben bewegende Stromquelle angenommen, welche einen nach unten gerichteten Blitzstrom abgibt. Die zeitliche und räumliche Verteilung des Blitzstromes orientiert sich bei dieser Modellklasse an den physikalischen Vorgängen der Ladungsträgerbewegung bei realen Blitzereignissen.

2.2.5.2 Blitzstromfunktion

Für die Berechnung der elektrischen und magnetischen Felder anhand eines Blitzkanalmodells ist es erforderlich, den Verlauf des Blitzstroms $i(z, t)$ entlang des Blitzkanals zu kennen. Dieser ergibt sich aus dem Verlauf des Blitzstroms an der Einschlagstelle $i_G(t)$. Weitere wichtige Größen sind dessen zeitliche Ableitung $di_G(t)/dt$ und dessen Integral, die Ladung Q_G . Als Funktion für $i_G(t)$ wird häufig die folgende, von Heidler [22] vorgeschlagene Funktion

$$i(t) = \frac{i_{\max}}{\eta} \cdot \frac{\left(\frac{t}{T}\right)^{10}}{1 + \left(\frac{t}{T}\right)^{10}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2)$$

verwendet. Hierbei gibt T die Stirnzeitkonstante, τ die Rückenzeitkonstante und η einen Korrekturfaktor für das Strommaximum an. Der Exponent der Zeitverhältnisse kann auch andere Werte als zehn annehmen.

2.3 Elektrisches und magnetisches Feld von Blitzentladungen

Für die numerische Feldberechnung wird der Blitzkanal vereinfacht als senkrecht und geradlinig über einer unendlich ausgedehnten, ideal leitenden Erdoberfläche angenommen und in einzelne, theoretisch infinitesimal kleine Segmente unterteilt. Diese als Elementardipole bezeichneten Segmente liefern Beiträge zum elektromagnetischen Feld im Beobachtungspunkt. Das Gesamtfeld ergibt sich durch Integration der einzelnen Feldanteile.

Der elektrische Feldanteil setzt sich aus drei Komponenten zusammen. Die Nahfeldkomponente $E_Q(t)$ wird vor allem durch die Ladung bestimmt, die Übergangskomponente $E_i(t)$ durch den Strom und die Fernfeldkomponente $E_{di}(t)$ durch die Stromänderung. Insgesamt ergibt sich also

$$E(t) = E_Q(t) + E_i(t) + E_{di}(t). \quad (3)$$

In analoger Weise kann das magnetische Feld in eine Übergangs- und eine Fernfeldkomponente zerlegt werden:

$$H(t) = H_i(t) + H_{di}(t) \quad (4)$$

Die grundsätzliche Anordnung zur Berechnung der elektrischen und magnetischen Felder eines Blitzstroms zeigt Bild 2.4.

Aufgrund der geometrischen Konfiguration gelten folgende Zusammenhänge:

$$r = \sqrt{s^2 + z^2} \quad (5)$$

und

$$\sin(\theta) = \frac{s}{r} \quad (6)$$

Für die von einem Elementardipol abgestrahlten Anteile des elektrischen Feldes gelten nach [49] die folgenden Zusammenhänge.

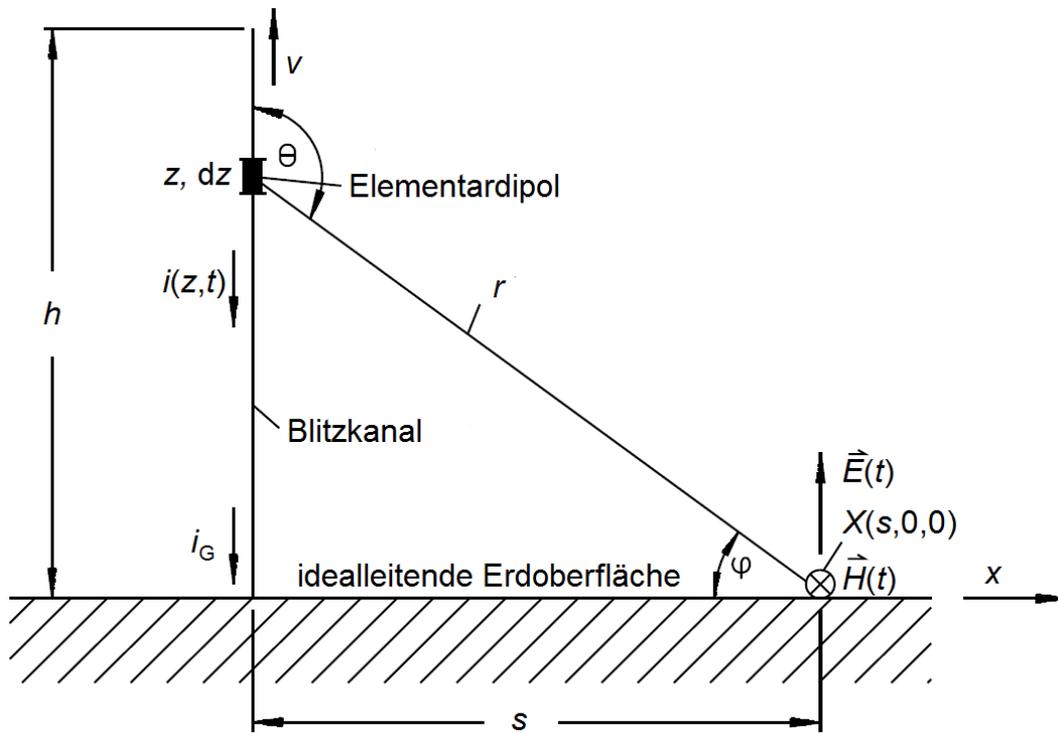


Bild 2.4: Anordnung zur Berechnung der Blitzfelder (nach [24])

$$d E_{\varrho}(t) = \frac{d z}{2 \pi \epsilon_0} \frac{3 \sin^2(\theta) - 2}{r^3} \int_{t_{x,0}}^{t_x} i(z, \tau) d \tau \quad (7)$$

$$d E_i(t) = \frac{d z}{2 \pi \epsilon_0} \frac{3 \sin^2(\theta) - 2}{c_0 r^2} i(z, t_x) \quad (8)$$

$$d E_{di}(t) = \frac{d z}{2 \pi \epsilon_0} \frac{\sin^2(\theta)}{c_0^2 r} \frac{\partial i(z, t_x)}{\partial t} \quad (9)$$

Für die Anteile des magnetischen Feldes gelten folgende Gleichungen:

$$d H_i(t) = \frac{d z}{2 \pi} \frac{\sin(\theta)}{r^2} i(z, t_x) \quad (10)$$

$$d H_{di}(t) = \frac{dz \sin(\theta)}{2\pi c_0 r} \frac{\partial i(z, t_x)}{\partial t} \quad (11)$$

Die Variable t_x , welche als retardierte Zeit bezeichnet wird, ergibt sich durch die endliche Zeit, die vergeht bis die zum Zeitpunkt t abgestrahlten Feldanteile den Beobachtungspunkt X erreichen. Somit gilt:

$$t_x = t - \frac{r}{c_0} = t - \frac{\sqrt{(s^2 + z^2)}}{c_0} \quad (12)$$

Das resultierende elektrische und magnetische Feld ergibt sich schließlich durch Integration der Gleichungen (7) bis (9) sowie (10) und (11) zwischen den Grenzen $z_u = 0$ und $z_o = h$.

Durch die Verwendung weiterer Zusammenhänge ist es möglich, auch einen geeigneten Blitzkanal oder die endliche Leitfähigkeit des Erdbodens zu berücksichtigen. Hierzu wird auf die Literatur ([23], [26], [46]) verwiesen.

3 Blitzmessstation Hoher Peißenberg

3.1 Geschichte der Messstation

Bereits mit Inbetriebnahme des Fernsehturms im Jahre 1978 wurde durch den Lehrstuhl für Hochspannungs- und Anlagentechnik der Technischen Universität München (TUM) in Zusammenarbeit mit der Universität der Bundeswehr München eine Station zur Messung des Anstiegsbereichs von Blitzströmen betrieben [47]. Hierzu war ein induktiver Sensor installiert, der ein der Blitzstromsteilheit proportionales Signal ausgibt. Beginnend mit dem ersten Stoßstrom im Jahr 1981 wurden in den folgenden Jahren Blitzeinschläge sowohl mit dem induktiven Sensor als auch mit Blitzzählern und Fotokameras analysiert [2], [47].

Im April 1992 ging die Verantwortung für die Blitzmessstation auf die Universität der Bundeswehr München über [54]. Von diesem Zeitpunkt an war das Ziel der Forschung nicht nur die Blitzstromsteilheit, sondern das gesamte elektromagnetische Gefährdungspotential bei Blitzeinschlägen in hohe Bauwerke. Dazu wurde im Jahr 1992 in einer Entfernung von etwa 200 m vom Turm eine Station zur Messung der vom Blitz abgestrahlten elektromagnetischen Felder (Lightning Electro-Magnetic Pulse, LEMP) installiert. Mit dieser LEMP-Messstation war es möglich, das elektrische und das magnetische Feld sowie deren zeitliche Ableitungen von bis zu zehn Einzelblitzen mit Stoßströmen aufzuzeichnen. Hierbei war wiederum der Anstiegsbereich der elektrischen und magnetischen Felder von besonderem Interesse. Die Triggerung der Feldmessstation erfolgte zunächst eigenständig, ab Juli 1993 dann per Lichtwellenleiter aus der Messstation im Fernsehturm.

Im August 1993 wurde dann ein Stromwandler an der Turmspitze installiert, um Blitzströme über eine Zeitdauer von 1 s und somit auch Langzeitströme aufzeichnen zu können. Im Winter 1995/1996 wurde schließlich eine Ausstattung mit Induktionsspule und Stromwandler auch am Turmfuß angebracht, um das transiente Verhalten des Fernsehturms besser erfassen zu können [17]. Um analog zum Stromverlauf auch das elektrische Feld über eine Zeitdauer von einer Sekunde aufzeichnen zu können, wurde die LEMP-Messstation im Jahr 1996 mit einer Sonde für das langsam veränderliche elektrische Feld nachgerüstet. Die Feldmessung wurde komplettiert durch eine Feldmühle, mit der das quasi-statische elektrische Feld kontinuierlich aufgezeichnet wurde. Zudem wurden in der LEMP-Messstation ein Standard-Video-Aufzeichnungssystem mit 25 Bildern pro Sekunde und

ein schnelles Video-Aufzeichnungssystem mit 1000 Bildern pro Sekunde aufgebaut. Das Standard-Video-Aufzeichnungssystem diente dazu, einen Überblick über die räumliche Entwicklung des Blitzkanals zu gewinnen. Entsprechend der Richtung der Verästelungen des Blitzkanals kann damit ein Erde-Wolke-Blitz von einem Wolke-Erde-Blitz unterschieden werden. Das schnelle Video-System erlaubt hingegen, auch die zeitliche Entwicklung der einzelnen Kanalabschnitte aufzulösen.

Sowohl die Blitzstrom-Messstation im Turm, als auch die LEMP-Messstation wurden bis in das Jahr 1999 betrieben. Anschließend wurden sie außer Betrieb genommen und demontiert.

Wenige Jahre später begannen Planungen, die Blitzmessstation bestehend aus der Blitzstrom-Messstation im Turm und der LEMP-Messstation in 200 m Entfernung wieder aufzubauen und mit modernster Technik auszustatten. Nach der Beschaffung der notwendigen Ausstattung und der Koordination mit den Verantwortlichen konnte zunächst die Blitzstrom-Messstation im Herbst 2008 wieder in Betrieb genommen werden. Es dauerte dann bis zum Herbst 2009, als schließlich eine Feldmesskabine auf den Hohen Peißenberg gebracht wurde und etwa an der gleichen Stelle wie die frühere LEMP-Messstation, in 200 m Entfernung vom Turm, aufgebaut wurde. Die Feldmesskabine wurde in der Folgezeit ausgerüstet, so dass seit Frühjahr 2010 wieder eine LEMP-Messstation zur Messung der Blitzfelder zur Verfügung steht.

3.2 Lage und schematische Übersicht

Die Blitzmessstation Hoher Peißenberg ist auf dem gleichnamigen Berg in der Gemeinde Hohenpeißenberg gelegen. Der Hohe Peißenberg befindet sich im oberbayerischen Voralpenland, ca. 70 km südwestlich von München. Die höchste Stelle des Berges befindet sich in einer Höhe von 988 m über Normalhöhennull (NHN) und damit etwa 300 m über der umliegenden Ebene. Eine Orientierungs- und eine Detailansicht zeigen die Karten in Bild 3.1.

Einen schematischen Überblick über die Messstation Hoher Peißenberg zeigt Bild 3.2. Die Messstation ist in zwei räumlich getrennte Messeinrichtungen unterteilt: Die erste Messeinrichtung, die Blitzstrom-Messstation, befindet sich im Peißenbergturm und dient dort der Aufzeichnung der Blitzströme. Als zweite Messeinrichtung, die LEMP-Messstation, wurde eine Meßkabine in etwa 200 m Entfernung vom Turm errichtet, wo u.a. das elektrische und magnetische Feld beim Blitzeinschlag in den Turm gemessen wird. Ein Lichtwellenleiter, der auf einem Tragseil zwischen den beiden Messeinrichtungen verlegt ist, dient der synchronen

Auslösung beider Messeinrichtungen. Die wichtigsten Komponenten werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

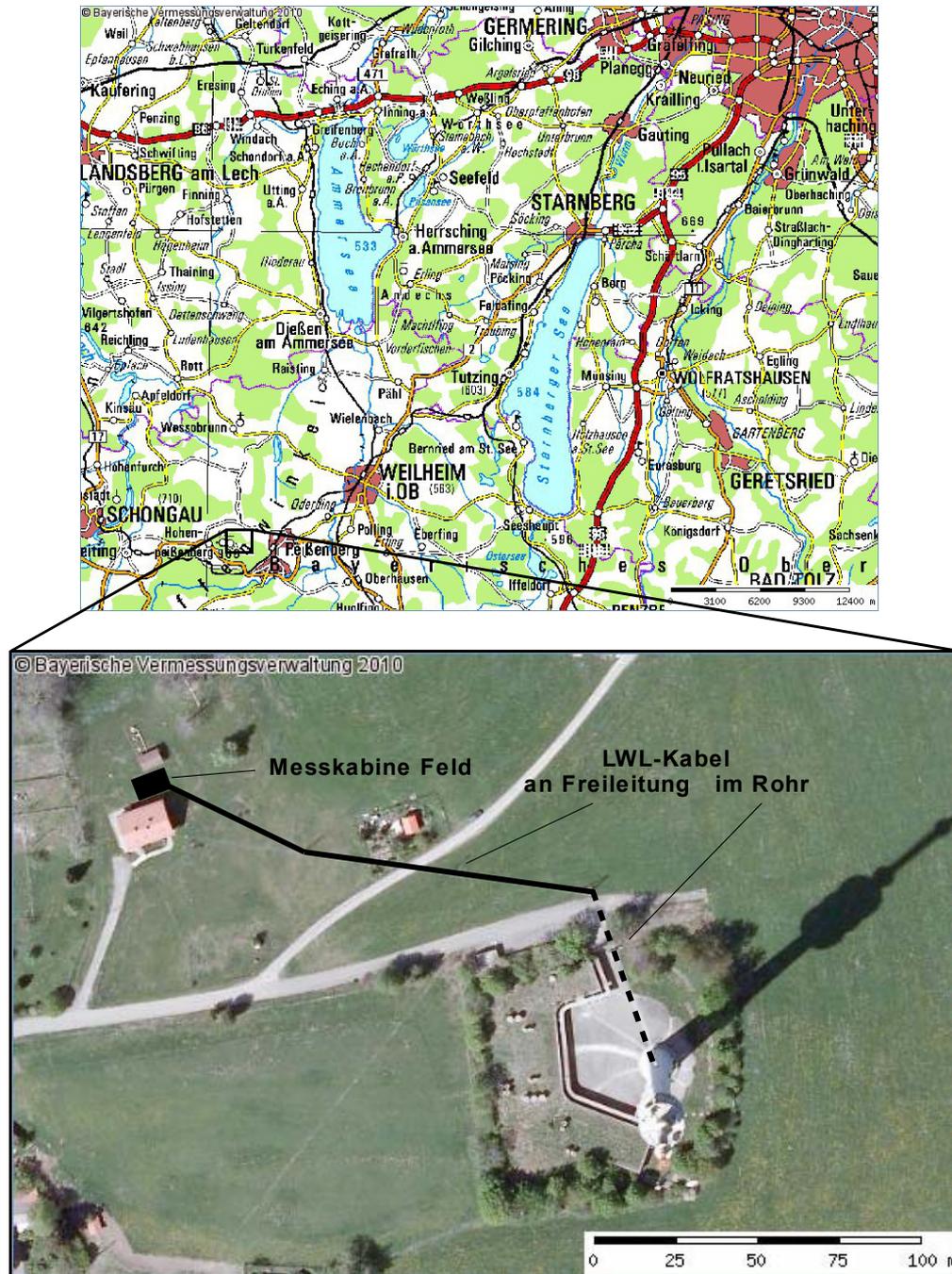


Bild 3.1: Geografische Lage der Blitzmessstation

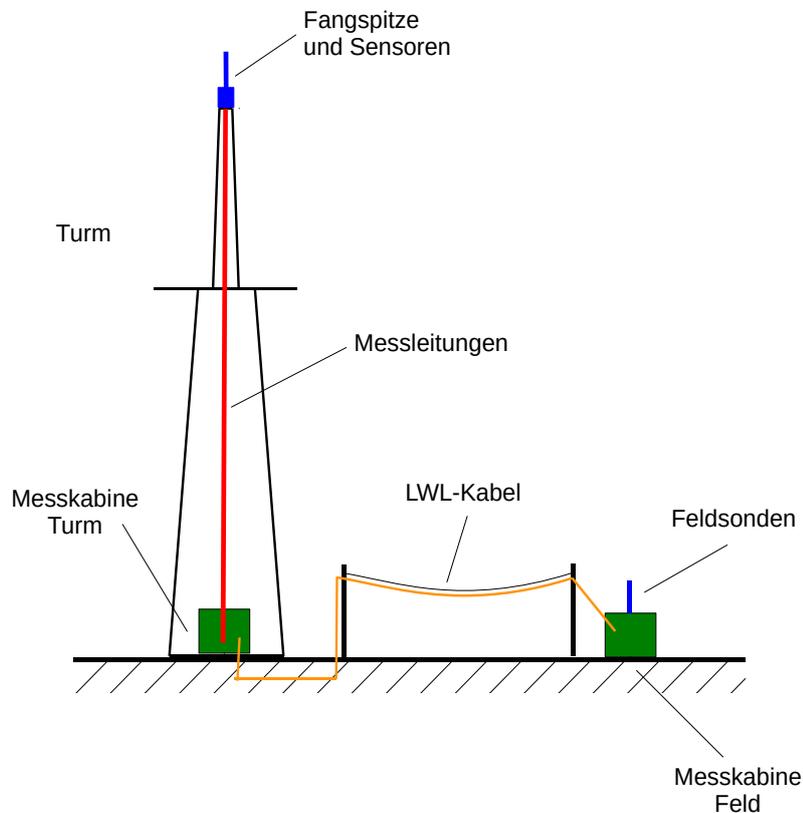


Bild 3.2: Schematische Übersicht über die Blitzmessstation Hoher Peißenberg

3.3 Blitzstrom-Messstation im Fernmeldeturm

Die Messeinrichtung der Blitzstrom-Messstation im Fernmeldeturm umfasst die an der Turmspitze installierten Sensoren, die Messkabine in der Nähe des Turmfußes und die Messkabel, die von den Sensoren an der Turmspitze zur Messkabine laufen.

3.3.1 Stromsensoren an der Spitze des Peißenbergturmes

Die Turmspitze besteht aus einem Zylinder aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK), der die Antennen für die Fernseh-Ausstrahlung enthält. Als der Fernmeldeturm Hoher Peißenberg im Oktober 2007 auf das digitale Antennenfernsehen

(DVB-T) umgerüstet wurde, wurde der GFK-Zylinder ausgetauscht. Im Zuge dieser Arbeiten wurden an der Turmspitze die Sensoren zur Messung der Blitzströme neu installiert. Bild 3.3 zeigt den Messaufbau mit geöffnetem Sensorgehäuse. Als obere Abdeckung des GFK-Zylinders dient eine metallene Plattform, auf der ein seitlicher Fangring befestigt ist. In der Mitte der metallenen Abdeckung ist ein metallener Flansch aufgebracht, der als Halterung für das Sensorgehäuse dient. Das Sensorgehäuse beinhaltet einen Stromsensor für die Messung des Blitzstroms (i -Sensor) und einen Sensor für die Messung der zeitlichen Ableitung des Blitzstroms (di/dt -Sensor). Als i -Sensor dient ein koaxialer Röhrenshunt, der in Bild 3.3 im unteren Teil des Sensorgehäuses erkennbar ist. Der di/dt -Sensor ist als weißer Körper unmittelbar unter der Plexiglasabdeckung sichtbar.



Bild 3.3: Sensoren zur Messung der Blitzströme an der Spitze des Peißenbergturmes

Das Sensorgehäuse besteht aus einem unteren Bereich, der nach Schließen der Wartungsklappe rundum metallisch geschirmt ist, und einem oberen Bereich, der mit einer Plexiglashaube für den Wetterschutz abgedeckt ist. Durch die Plexiglashaube ist eine 3 m lange vertikale Fangstange geführt, die seitlich zum Fangring hin mit sechs Kunststoffseilen abgespannt ist. Wenn ein Blitz in die Spitze der Fangstange einschlägt, wird der Blitzstrom über die Fangstange zum Sensorgehäuse geleitet und durchfließt dann zunächst den di/dt -Sensor und hierauf den i -Sensor.

Aufgrund der exponierten Lage und den durch den Senderbetrieb stark eingeschränkten Möglichkeiten für Wartung und Reparaturen ist für das Sensorgehäuse eine besonders robuste Konstruktion notwendig. Vor allem auf den Schutz gegen Witterungseinflüsse, Verschmutzung und Insekten wurde geachtet. Bei der Konstruktion wurde weiterhin darauf Rücksicht genommen, dass sich die Sensoreinheit so zerlegen lässt, dass sie sowohl bezüglich ihrer Masse als auch ihres Volumens leicht transportabel ist. Somit können die Teile bei Bedarf einfach ausgetauscht und durch neue ersetzt werden.

Die Anschlüsse für die Messleitungen befinden sich im unteren geschirmten Teil des Sensorgehäuses. Von dort verlaufen die Messleitungen in einem metallenen Schirmrohr zunächst durch den GFK-Zylinder bis zum oberen Bereich der stahlarmierten Betonstruktur des Turmes. Im unteren Turmbereich ist auf die Verlegung der Messleitungen in Schirmrohren auf Grund der guten Schirmung durch die Stahlarmierung verzichtet worden.

3.3.2 Sensor für die Messung der Blitzstrom-Steilheit (di/dt -Sensor)

Die Blitzfangstange wird im oberen Teil des Sensorgehäuses direkt durch eine Induktionsspule umschlossen. Gemäß dem Induktionsgesetz induziert nun eine zeitliche Änderung des magnetischen Feldes an den offenen Klemmen der Spule die Spannung:

$$u_{\text{ind}}(t) = - M \cdot \frac{di(t)}{dt} \quad (13)$$

Durch Aufzeichnung von $u_{\text{ind}}(t)$ erhält man also gemäß Gleichung (13) ein der zeitlichen Änderung des Blitzstroms $di(t)/dt$ proportionales Signal.

Für die Messstation auf dem Hohen Peißenberg wird ein Sensor des Typs IMM 4 des Herstellers EG&G eingesetzt. Die wichtigsten Kenndaten laut Datenblatt gibt

Tabelle 1 an. Das Messsignal wird über einen Steckverbinder vom Typ N ausgegeben. Um Überschläge zu verhindern, ist das Gehäuse des Sensors an der Turmstruktur geerdet, ebenso der Kabelschirm des Messkabels.

Größe	Wert
Gegeninduktivität M	$0,5 \cdot 10^{-9} \text{ H}$
Obere Grenzfrequenz $f_{g,o}$	$> 1,4 \text{ GHz}$
Anstiegszeit T_1	$< 0,25 \text{ ns}$
Max. Ausgangsspannung	5 kV
Masse	5,5 kg
Innendurchmesser	9,8 cm
Außendurchmesser	16,5 cm
Höhe	10,0 cm

Tabelle 1: Technische Daten des di/dt -Sensors

Der Sensor wurde ausgewählt, da er nach Angabe des Herstellers eine obere Grenzfrequenz über 1,4 GHz aufweist. Somit lassen sich mit diesem Sensor auch sehr kurzzeitige Ströme mit Anstiegszeiten von einigen 10 ns messen. Andererseits wurde festgestellt, dass der di/dt -Sensor bei langsam ansteigenden Strömen erhebliche Messfehler aufweist. Daher wurde der Sensor vor der Montage im Hochspannungslabor des Instituts für elektrische Energieversorgung der Universität der Bundeswehr München mit Stoßströmen unterschiedlicher Stirnzeiten getestet. Die prozentualen Fehler aus diesen Messungen sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Für Stirnzeiten bis zu einigen Mikrosekunden ist der Fehler auf einige Prozent beschränkt. Da die bisher am Turm auf dem Hohen Peienbereg gemessenen Stoßströme in der Regel Stirnzeiten haben, die deutlich kürzer als eine Mikrosekunde sind ([17], [54]), kann für die vorliegenden Messungen von einem maximalen Fehler von etwa 3 % ausgegangen werden.

Stirnzeit T_1	Fehler der maximalen Stromsteilheit
20 μs	34 %
8 μs	10 %
0,8 μs	2 %

Tabelle 2: Prozentualer Fehler des di/dt -Sensors bei Beaufschlagung mit Stoßströmen unterschiedlicher Stirnzeiten

3.3.3 Sensor für die Messung des Blitzstromes (*i*-Sensor)

Wie bereits oben ausgeführt, dient ein koaxialer Stromshunt als *i*-Sensor für die Messung des Blitzstromes. Die Messspannung $u_{m,i}$ ergibt sich aus dem Blitzstrom i und dem Shuntwiderstand R_{Shunt} zu:

$$u_{m,i} = R_{\text{Shunt}} \cdot i \quad (14)$$

Für die Dimensionierung des Shunts sind neben dem Widerstand vor allem die Stromtragfähigkeit und die obere Grenzfrequenz zu beachten. Da die Blitzstoßströme Amplituden von mehr als 100 kA erreichen können, ist weiterhin zu beachten, dass der Widerstand nicht zu groß ist, um unzulässig hohe Messspannungen zu verhindern.

Die Stromtragfähigkeit eines Shunts wird von der umgesetzten Energie bestimmt. Sie ergibt sich aus der spezifischen Energie und dem Shuntwiderstand R_{Shunt} zu:

$$W = R_{\text{Shunt}} \cdot \int i^2 dt \quad (15)$$

Eine maßgebliche Größe für die Dimensionierung eines Stromshunts ist daher das „Grenzlastintegral“, das die maximal zulässige spezifische Energie angibt. Wird dieses Grenzlastintegral überschritten, erwärmt sich das Widerstandsmaterial unzulässig hoch, was zu seiner Zerstörung führen kann.

Da durch die koaxiale Ausführung das Innere feldfrei ist, müsste sich der Shunt wie ein reiner Wirkwiderstand verhalten. Tatsächlich besitzt ein Stromshunt eine beschränkte Bandbreite, was auf Stromverdrängungserscheinungen im Innern des Widerstandsmaterials zurückzuführen ist. Daher sinkt die obere Grenzfrequenz mit zunehmender Dicke bzw. abnehmendem Widerstandswert. Im elektrischen Ersatzschaltbild wird dieses Verhalten üblicherweise dadurch berücksichtigt, dass dem Shunt eine „innere Induktivität“ L_i zugeordnet wird, die dann zusammen mit dem ohmschen Widerstand als Tiefpass wirkt. Die sich so ergebende Grenzfrequenz berechnet sich zu

$$f_{g,o} = \frac{R_{\text{Shunt}}}{2\pi \cdot L_{\text{Shunt}}} \quad (16)$$

Will man also eine möglichst hohe obere Grenzfrequenz erreichen, ist das Widerstandsmaterial möglichst dünn auszuführen. Dem steht jedoch entgegen, dass dadurch der Widerstand und somit die umgesetzte Energie ansteigt. Nach Abwägung

dieser Gesichtspunkte wurde ein Shunt vom Typ ISM 500 der Firma Hilo-Test gewählt. Dieser Typ hat eine obere Grenzfrequenz von 50 MHz und ein Grenzlastintegral von $2,2 \cdot 10^6 \text{ A}^2\text{s}$. Die weiteren technischen Daten fasst Tabelle 3 zusammen.

Größe	Wert
Nennwiderstand	0,25 mΩ
Impulsbelastbarkeit	100 kA
Dauerbelastbarkeit	500 A
Verlustleistung	62,5 W
Grenzlastintegral	$2,2 \cdot 10^6 \text{ A}^2\text{s}$
Anstiegszeit	7,0 ns
Bandbreite	50 MHz
Durchmesser	200 mm
Höhe	160 mm
Masse	9,0 kg

Tabelle 3: Technische Daten des Shunts

Der Shunt wurde vor seiner Montage mit Strömen unterschiedlicher Kurvenformen im Hochspannungslabor getestet. Dabei wurde festgestellt, dass die Messspannung des Shunts die Ströme mit einer prozentualen Abweichung von höchstens 1,5 % wiedergibt.

3.3.4 Messkabel und Erdungskonzept

Zur Übertragung der Messsignale des di/dt -Sensors und des i -Sensors sind zwei parallele Koaxialkabelstränge von der Turmspitze zur Messkabine im Turmfuß verlegt. Im oberen Teil des Turms, der aus dem GFK-Zylinder besteht, werden die Kabel vom Typ RG214 verwendet. Die Messkabel sind im GFK-Zylinder in flexiblen metallischen Schirmrohren verlegt. Im unteren Turmabschnitt, welcher aus Stahlbeton besteht, werden Kabel des Typs RG218 verwendet. Hier sind die Kabel nur im oberen Bereich in Schirmrohren mit einem Außendurchmesser von 5 cm und einer Wandstärke von 1 mm verlegt. Weiter unten können die Schirmrohre entfallen, da die Wandstärke des stahlarmierten Betons aufgrund der mechanischen Belastung sehr dick ist und daher die Stahlarmierung als Schirmung hinreichend ist. Die Kabel sind somit in diesem Bereich ohne Schirmrohre in einem Kabelgestell verlegt. Die Dämpfungswerte der verwendeten Kabel bei 40 MHz fasst Tabelle 4 zusammen. Da sich bei einer Frequenz von $f = 40 \text{ MHz}$ eine Gesamt-

dämpfung je Kabelstrang von 3 dB ergibt, stellt diese Frequenz die obere Grenzfrequenz der beiden Messkabel dar.

Kabeltyp	RG214	RG218	Gesamt
Länge	25 m	125 m	150 m
Dämpfung bei $f = 40$ MHz	2,0 dB	1,0 dB	3,0 dB

Tabelle 4: Dämpfung der Messkabel

Im Gegensatz zu vorangegangenen Messungen ([17], [47], [54]) ist die Messeinrichtung nur an der Turmspitze geerdet. Dies geschieht dadurch, dass die Mäntel der Messkabel dort mit der lokalen Erde verbunden sind. Durch die einseitige Erdung wird verhindert, dass Teilblitzströme über die Kabelmäntel fließen und dort einen Längsspannungsfall verursachen. Dies setzt allerdings voraus, dass die Messung in der Messkabine potentialfrei gegenüber der lokalen Erde erfolgt. Daher werden die Messgeräte in der Messkabine gegen Erde isoliert und die Messkabel isoliert in die Messkabine eingeführt. Aus demselben Grund erfolgt die Energieversorgung der Messkabine über einen Trenntransformator und die Signalübertragung über Lichtwellenleiter.

3.3.5 Messwertaufzeichnung in der Messkabine

Zur Schirmung der Messgeräte wird eine rundum metallisch geschirmte Messkabine, Typ Belling-Lee, eingesetzt. Die Messkabine ist in etwa 5 m Höhe in einer Nische über der Eingangsebene des Turmes installiert. Bild 3.4 zeigt einen Überblick über die in der Messkabine eingesetzten Geräte.

Zur Aufzeichnung der Messsignale wird ein Industrierechner des Herstellers National Instruments verwendet. Dieser Rechner besteht aus einem Chassis vom Typ PXI¹-1042 und hat als Einschubkarten einen Controller vom Typ PXI-8187, drei Messwandlerkarten der Typen PXI-5122, PXI-5124 und PXI-6052E sowie eine GPS-Karte vom Typ PXI-6682. Die nähere Funktionsweise dieses Messsystems ist im folgenden beschrieben.

3.3.5.1 Chassis und Controller des Messrechners

Das Messrechner-Chassis vom Typ NI PXI-1042 umfasst acht mögliche Einschubplätze für Mess-, Steuer- und Reglerkarten. Die Verbindung zwischen den Karten erfolgt über einen internen PXI-Bus mit einer Übertragungsrates von

¹ PCI extensions for Instrumentation

266 MB/s. Der PXI-Bus ist eine Erweiterung des bei Standardrechnern verwendeten PCI-Busses um zusätzliche Takt- und Triggerleitungen.

Zentraler Bestandteil des Chassis ist der Controllereinschub vom Typ PXI-8187. Dieser Einschub stellt alle für den Betrieb des Rechners notwendigen Funktionen bereit, wie sie in Standardrechnern auf der Hauptplatine zu finden sind. Im wesentlichen sind dies der Hauptprozessor, der Arbeitsspeicher und ein Festplatten-Speicher sowie die externen Schnittstellen zum Anschluss von Maus, Tastatur, Bildschirm und externen Festplatten.

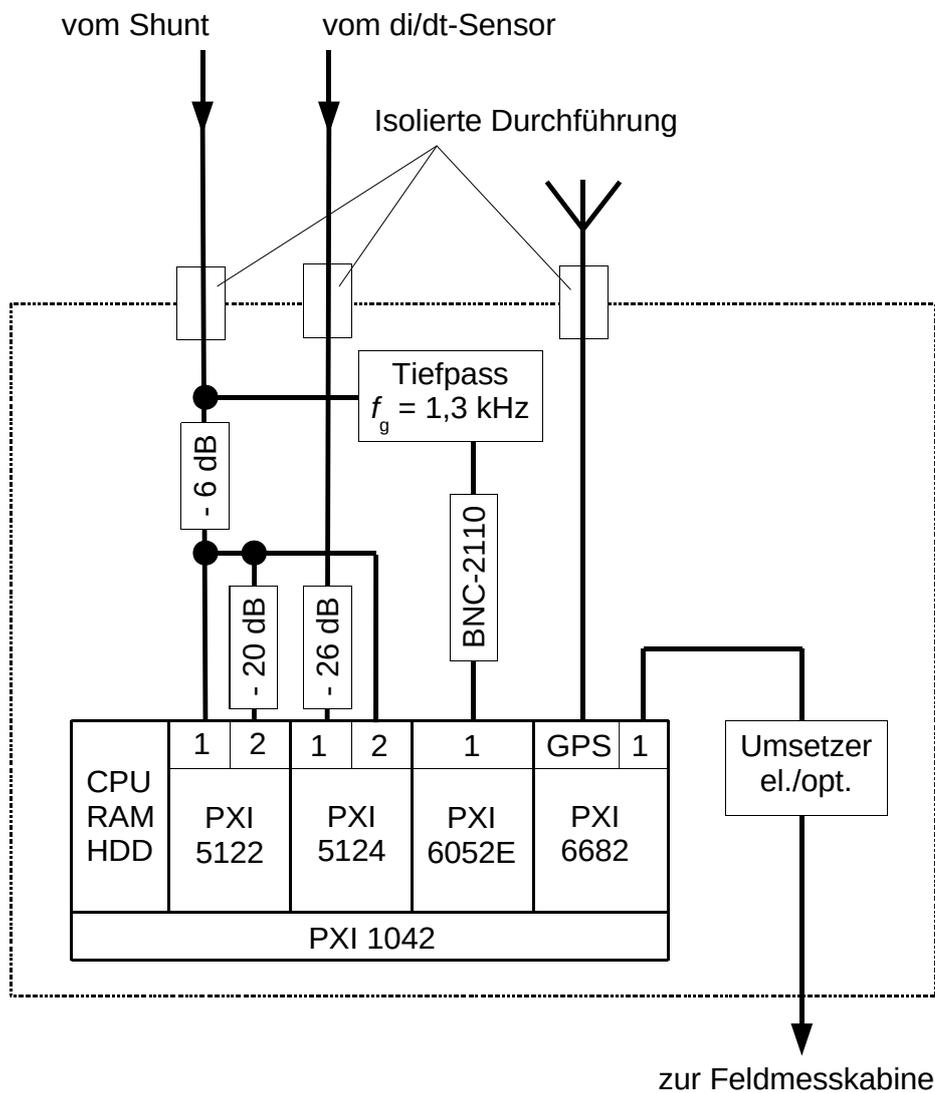


Bild 3.4: Blockschaltbild der Messeinrichtungen in der Turmmesskabine

3.3.5.2 Messwandlerkarten

Die beiden Messwandlerkarten der Typen PXI-5122 und PXI-5124 dienen zur Messung des Blitzstroms i und seiner zeitlichen Änderung di/dt . Beide Karten verfügen jeweils über zwei Messkanäle, so dass insgesamt eine vierkanalige Messung erfolgt. Die Daten und Einstellungen der Messwandlerkarten sind in Bild 3.4 zusammengestellt.

Der Blitzstrom wird mit beiden Kanälen der Messwandlerkarte vom Typ PXI-5122 mit jeweils 14 Bit Auflösung und einem Abtastintervall von 10 ns aufgezeichnet. Den Messkanälen sind Dämpfungsglieder mit unterschiedlichen Werten von 6 dB und 26 dB vorgeschaltet. Dadurch ergeben sich eine gröbere und eine feinere Auflösung für die beiden Kanäle. Mit der gröberen Auflösung (26 dB) lassen sich Stoßströme bis 80 kA aufzeichnen, während die feinere Auflösung vor allem der Aufzeichnung der wesentlich schwächeren Langzeitströme bis 8 kA dient. Um den Stirnbereich der Stoßströme von Folgeblitzen mit sehr kleiner Stirnzeit besser auflösen zu können, wird der Blitzstrom zusätzlich auf den zweiten Messkanal der Messwandlerkarte vom Typ PXI-5124 gegeben. Die Aufzeichnung erfolgt hierbei mit 12 Bit Auflösung bei einer Abtastrate von 5 ns.

Jede Karte verfügt über einen Speicher von 512 MB pro Messkanal. Da die Karten jeden Messwert als 2 Byte-Ganzzahl speichern, fasst jeder Speicher $256 \cdot 10^6$ Punkte eines digitalisierten Signals. Mit den in Tabelle 5 aufgeführten Abtastraten ergeben sich folglich für die einzelnen Kanäle der Messwandlerkarten PXI-5122 und PXI-5124 Aufzeichnungsdauern von 2,56 s und 1,28 s.

Bei vorangegangenen ähnlichen Messungen war die Aufzeichnung des Blitzstroms auf eine Zeitdauer von 1 s bei einer Abtastung mit einem 8 Bit-Wandler mit einem Abtastintervall von 1 μ s beschränkt. Dadurch konnte die Feinstruktur der Blitzströme nicht zur Gänze aufgelöst werden ([17], [47], [54]). Mit der neuen verbesserten Ausstattung können die Blitzströme und ihre zeitlichen Ableitungen nun mit wesentlich höherer Genauigkeit über die gesamte Dauer ihres Auftretens aufgezeichnet werden. Tabelle 5 fasst die Kenndaten der Messwandlerkarten zusammen und gibt einen Überblick über die Messbereiche und ihre Einstellungen.

Typ	PXI-5122		PXI-5124	
Speicher je Kanal	512 MB		512 MB	
Abtastrate	100 MS/s		200 MS/s	
horizontale Auflösung	10 ns		5 ns	
vertikale Auflösung	14 bit		12 bit	
Speicher je Messwert	2 Byte		2 Byte	
Anzahl Messwerte	256000000		256000000	
Aufzeichnungsdauer	2,56 s		1,28 s	
	Kanal 1	Kanal 2	Kanal 1	Kanal 2
Messgröße	$i(t)$	$i(t)$	$di(t)/dt$	$i(t)$
Dämpfungsfaktor	2 (= 6 dB)	20 (= 26 dB)	20 (= 26 dB)	2 (= 6 dB)
Umrechnung: 1 V je...	8 kA	80 kA	40 kA/ μ s	8 kA
Messbereich	± 24 kA	± 240 kA	± 240 kA/ μ s	± 24 kA
Auflösung (gerundet)	3 A	30 A	117 A/ μ s	12 A

Tabelle 5: Daten und Einstellungen der Messwandlerkarten in der Turm-Messkabine

3.3.5.3 Triggerung

Die Messwandlerkarten zeichnen die Messwerte fortlaufend im sogenannten Pre-trigger-Modus in ihrem internen Speicher auf. Bei Triggerung auf ein Messereignis wird die Speicherung auf die Festplatte gestartet, wobei ein Vorlauf von 0,5 s eingestellt ist. Durch diesen Vorlauf lassen sich Ereignisse bis zu 0,5 s vor dem Hauptereignis, das zum Auslösen des Triggersignals führt, erkennen.

Die Triggerung der Messeinrichtung erfolgt auf das Spannungssignal des i-Sensors bei einer Triggerschwelle von 10 mV. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass bei Blitzschlägen vor der eigentlichen Entladung oftmals starke Vorentladungen beispielsweise durch startende Leader auftreten. Diese Vorentladungen würden die Messeinrichtung vorzeitig auslösen, wenn der Spannungspegel des Messsignals direkt zur Triggerung benützt würde. Um dies zu vermeiden, wird das für die Triggerung benutzte Spannungssignal gefiltert.

Ziel der Filterung ist es, dass das ganze Blitzereignis erfasst wird. Daher sollte die Triggerung der Meßeinrichtung stets auf die erste Komponente des Blitzstroms erfolgen. Bei Aufwärtsblitzen ist dies der sich nur langsam ändernde einleitende

Langzeitstrom mit typischen Amplituden von einigen 100 A. Abwärtsblitze haben hingegen als erste Komponente einen Stoßstrom, der typischerweise innerhalb von einigen Mikrosekunden rasch auf den Maximalwert von einigen 10 kA ansteigt.

Um ein Auslösen der Meßeinrichtung auf beide Blitzarten zu erreichen, erfolgt die Filterung des Triggersignals durch ein RC-Tiefpassfilter erster Ordnung (siehe Bild 3.5). Die Eingangsspannung u_e und die Ausgangsspannung u_a sind über folgende Differentialgleichung bestimmt:

$$u_e = R \cdot C \cdot \frac{du_a}{dt} + u_a \quad (17)$$

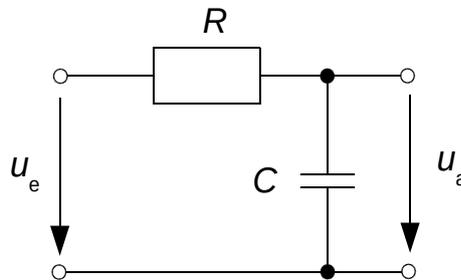


Bild 3.5: RC-Tiefpassfilter erster Ordnung

Bei Triggerung auf einen sich langsam ändernden Langzeitstrom kann der erste, von du_a/dt abhängige Summand auf der rechten Seite von Gleichung (17) vernachlässigt werden und es gilt: $u_a \approx u_e$. Ein Triggerpegel von $u_a = 10$ mV entspricht gemäß Bild 3.4 und Tabelle 5 einem Blitzstrom von $i = 40$ A.

Für die rasch ansteigenden Stoßströme kann dagegen der zweite Summand in Gleichung (17) vernachlässigt werden, und es ergibt sich nach der Umformung

$$u_a = \frac{1}{RC} \cdot \int u_e dt = \frac{1}{\tau} \int i \cdot R_{\text{Shunt}} dt = \frac{R_{\text{Shunt}}}{\tau} \cdot Q, \quad (18)$$

dass die Spannung am Ausgang des Tiefpasses der Ladung Q proportional ist.

Mit den gewählten Bauelementwerten $R = 5$ k Ω und $C = 25$ nF ergibt sich die Zeitkonstante des Filters zu $\tau = 125$ μ s bzw. die obere Grenzfrequenz gemäß

$$f_{g,o} = \frac{1}{2\pi\tau} \quad (19)$$

zu $f_{g,o} = 1,3$ kHz. Die Grenzfrequenz gibt an, welche Größe für die Triggerung maßgebend ist. Bei langsam veränderlichen Impulsen wie den Langzeitströmen mit einer wesentlich längeren Dauer als die Zeitkonstante τ erfolgt die Triggerung bei Überschreiten des oben angegebenen Stromwertes von 40 A. Bei schnell veränderlichen Impulsen wie den Stoßströmen ist hingegen eine wesentlich kleinere Zeitdauer als $\tau = 125 \mu\text{s}$ gegeben. In diesem Fall erfolgt die Triggerung bei Überschreiten der Ladung entsprechend Gleichung (18).

Die nach Gleichung (18) zur Triggerauslösung erforderliche Ladung berechnet sich mit der Triggerschwelle von $u_a = 10$ mV nun zu

$$Q = \frac{u_a \cdot \tau}{R_{\text{Shunt}}} = \frac{10 \text{ mV} \cdot 125 \mu\text{s}}{0,25 \text{ m}\Omega} = 5 \text{ mC}. \quad (20)$$

Das durch den Tiefpassfilter geleitete Signal wird von einer Messwerterfassungskarte des Typs PXI-6052E mit einer Rate von 333 kS/s und einer vertikalen Auflösung von 16 Bit abgetastet. Falls der Betrag des Signals 10 mV überschreitet, gibt die Erfassungskarte einen Triggerimpuls auf den PXI-Triggerbus, woraufhin die Messwandlerkarten und die GPS-Karte ausgelöst werden.

3.3.5.4 Zeitstempel und Triggerweiterleitung

Die Aufgabe der GPS²-/Timer-Karte vom Typ PXI-6682 ist die Abspeicherung eines Zeitstempels in der Messwerte-Datei und die Ausgabe des Triggerimpulses vom PXI-Triggerbus an einen externen Anschluss. Die Triggerung der übrigen Geräte erfolgt dann über diesen externen Anschluss.

Die Verwendung des GPS-Systems zur Zeitbestimmung hat seine Gründe in der einfachen Verfügbarkeit von GPS-Empfänger- bzw. Controllerkarten für PXI-Rechnersysteme. Das GPS-Zeitsignal wird auf einer Frequenz von etwa 1,5 GHz übertragen und besitzt eine Auflösung von etwa 10 ns. Da die Übertragungs- und Verarbeitungszeit eines PXI-Triggersignals in der gleichen Größenordnung liegt, ist der abgespeicherte Zeitstempel auf 10 ns genau.

Zu beachten ist allerdings, dass sich durch die Einführung sogenannter Schaltsekunden, welche von den GPS-Satelliten nicht übertragen werden können, die

2 Global Positioning System

GPS-Zeit der UTC-Zeit vorausläuft. Dieser Vorlauf, der derzeit 15 s beträgt, ist per Softwareeinstellung korrigiert und wird bei Einführung neuer Schaltsekunden angepasst.

Das über den PXI-Triggerbus übertragene Triggersignal wird von der GPS-/Timer-Karte über den digitalen Ausgang „PFI 1“ per SMB-Anschluss nach außen gegeben. Hier ist ein elektro-optischer Umsetzer vom Typ Meinberg TTL/FO/10M angeschlossen, welcher das elektrische Triggersignal in ein optisches Triggersignal umwandelt und an die per ST-Steckverbinder angeschlossene Glasfaserverbindung ausgibt. Auf dieser Glasfaserverbindung gelangt das optische Triggersignal zur Feldmesskabine, wo es der synchronen Triggerung der dort installierten Messgeräte dient (siehe Bild 3.2).

Bei Auslösung der Messeinrichtung erfolgt eine automatische Benachrichtigung über SMS an das Institut für Elektrische Energieversorgung der Universität der Bundeswehr. Dazu dient das GSM³-Sende-Modul vom Typ Conrad GX-106.

3.3.5.5 Messsoftware

Zur optimalen Ausnutzung der Fähigkeiten der Messwandlerkarten wurde das Messprogramm mit LabVIEW, einer grafischen „Programmiersprache“ von National Instruments, erstellt. Nach Einschalten des Rechners wird die Software einschließlich der automatisch ablaufenden Programme geladen und gestartet.

Bild 3.6 zeigt eine Übersicht über das Hauptprogramm. Aufgabe des Hauptprogramms ist die Initialisierung und Konfiguration der Messwandlerkarten, was nach Einstellung des Rechnerstandortes (Turm bzw. Feld) automatisch erfolgt. Anschließend beginnt das Programm mit der Ausführung einer Endlosschleife, welche fortlaufend Daten in den Speicher der Messwandlerkarten schreibt und bei Triggerung der Messeinrichtung die Aufzeichnung wie oben beschrieben anhält. Anschließend werden die auf den Messwandlerkarten gespeicherten Daten in den Arbeitsspeicher des Rechners übertragen und auf der Festplatte gespeichert. Da sowohl hinsichtlich der Datenrate des Busses als auch der Größe des Arbeitsspeichers Beschränkungen bestehen, werden die Daten jedes Kanals der Messwandlerkarten in vier Datensegmente unterteilt, die zeitlich aufeinander folgend verarbeitet werden. Die Stückelung der Daten in vier Datensegmente stellt einen Kompromiss dar zwischen einer möglichst geringen Anzahl an Einzelabschnitten und einer möglichst hohen Leistungsfähigkeit des Speichervorgangs. Die getrennten Datensegmente werden dann bei der Datenauswertung wieder zusammengefügt.

3 Global System for Mobile Communications

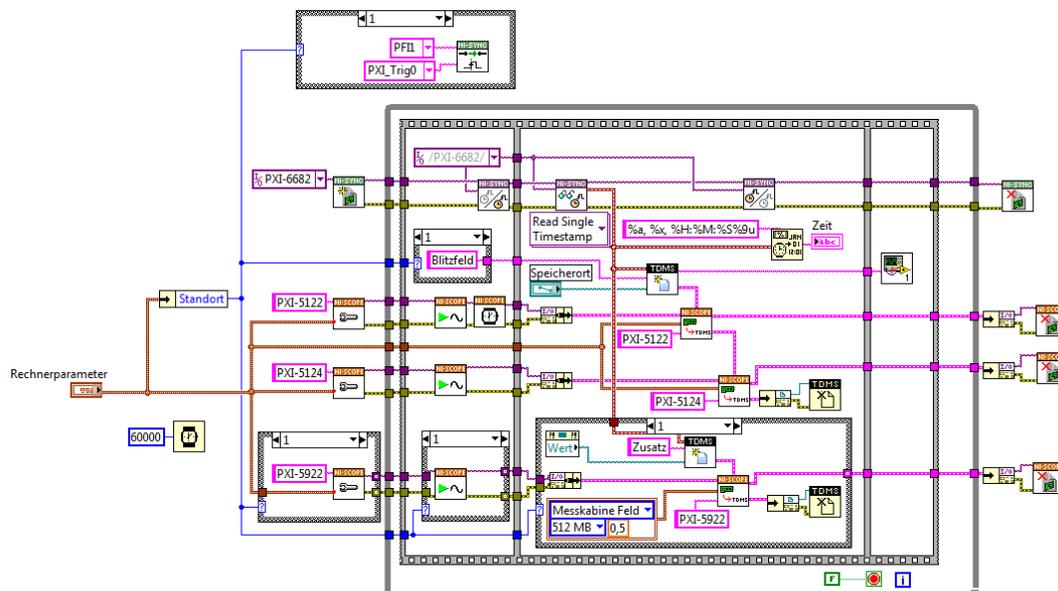


Bild 3.6: Übersicht über das Hauptprogramm

Die Speicherung der Messdaten erfolgt im TDMS-Format, einem Dateityp der insbesondere für die Abspeicherung mehrkanaliger Messdaten ausgelegt ist. Eine TDMS-Datei ist hierarchisch gegliedert in der Reihenfolge: Datei, Kanalgruppen, Kanäle. Jede dieser Ebenen könnte beliebig viele Kopfdaten zur Beschreibung der Messdaten beinhalten. Im vorliegenden Fall wird jede der vier Messwerte in einer Kanalgruppe gespeichert, die oben beschriebene Aufteilung in vier Datensegmente erfolgt durch Speicherung in vier verschiedenen Kanälen derselben Kanalgruppe. Als Kopfdaten der Kanäle bzw. Kanalgruppen werden die Messgröße, deren Einheit, Informationen zur zeitlichen Synchronisation der Messungen, sowie der jeweilige in Tabelle 5 angegebene Skalierungsfaktor abgespeichert, sodass sich bei der Auswertung durch Multiplikation der Ganzzahl-Daten mit diesem Faktor sofort der tatsächliche Messwert z.B. des Blitzstromes ergibt. In das Kopfdatenfeld der gesamten Datei wird der Standort des Rechners sowie der GPS-Zeitstempel geschrieben.

Die Abspeicherung der Messwerte erfolgt als Datenstrom aus 2 Byte-Ganzzahlen, wobei die 12 bzw. 14 bit langen Werte der Messwandlerkarten aus programmtechnischen Gründen nach dem niederwertigsten Bit mit vier bzw. zwei Nullen aufgefüllt werden. Ein Durchlauf des Messprogramms dauert zwischen 80 und 90 s. Während dieser Zeit ist das System nicht messbereit und ein eventuell auftretender Blitzeinschlag kann in dieser Zeit nicht registriert werden.

3.4 Messeinrichtungen in der Feldmesskabine

3.4.1 Standort und Aufbau der Messkabine

Als Feldmesskabine wird eine rundum geschirmte Standard-Fernmeldekabine der Bundeswehr mit den Abmaßen 2900 mm x 2050 mm x 1888 mm und einer Masse von etwa 1,5 t verwendet. Diese Kabine befindet sich in einer Entfernung von etwa 200 m vom Fernmeldeturm auf einem Gelände des Deutschen Wetterdienstes. Bild 3.1 vermittelt einen Eindruck des Standortes.

Die Messkabine wurde nach ihrer Grundausrüstung am Institut für Elektrische Energieversorgung der Universität der Bundeswehr München per Tieflader auf den Hohen Peißenberg transportiert. Aufgrund der schwierigen örtlichen Gegebenheiten wurde die Abladung und Aufstellung der Messkabine mit einem 100 t-Kran durchgeführt. Wie auf Bild 3.7 ersichtlich ist, wurde mit diesem Kran die Messkabine über ein Gebäude an ihrem Standort gehoben.

Die weitere Ausstattung der Messeinrichtung sowie die Installation der Messensoren erfolgte dann sukzessive vor Ort.



Bild 3.7: Aufstellen der Feldmesskabine

3.4.2 Allgemeine Ausstattung der Messkabine

Auf dem Dach der Messkabine wurde ein Aufbau aus Aluminium (siehe Bild 3.8) angebracht, um hierauf die Messsensoren zu installieren. Der Dachaufbau umfasst eine 10 m² große, ebene Platte aus 4 mm starkem Aluminiumblech, welches von einer Stützkonstruktion aus Aluminium-Vierkantprofilen getragen wird. Durch die Aluminiumplatte wird eine gut leitfähige Ebene über der Messkabine geschaffen. Die Platte ist in Segmente unterteilt, auf denen die Sensoren zur Messung des elektrischen und magnetischen Feldes aufgebaut sind.



Bild 3.8: Feldmesskabine mit Dachkonstruktion

Bild 3.8 zeigt die auf dem Kabinendach installierten Sensoren. Die als Stäbe erkennbaren Monopolantennen dienen als Sensoren zur Messung des elektrischen Feldes und seiner zeitlichen Ableitung. Zur Vermeidung von Koronaentladungen sind sie an der Spitze mit einem halbkugelförmigen Profil versehen. Um zusätzlich das elektrostatische Feld messen zu können, ist eine Feldmühle an der hinteren, in Bild 3.8 nicht erkennbaren abgewandten Ecke des Kabinendaches montiert. Zur Messung des magnetischen Feldes und seiner zeitlichen Änderung sind eine Rahmenantenne als $H(t)$ -Sensor und eine Schlitzantenne als dH/dt -Sensor im vorderen Dachbereich installiert. Bild 3.9 zeigt einen Ausschnitt aus dem Flachdach, auf dem der $H(t)$ -Sensor und der dH/dt -Sensor zu erkennen sind. Die beiden Sen-

soren sind so ausgerichtet, dass das magnetische Feld die Messflächen bei einem Blitzeinschlag in den Fernmeldeturm senkrecht durchdringt. Die Messeinrichtung wird komplettiert durch einen Abschlusswiderstand, der zwischen der Messkabine und dem Tragseil des Lichtwellenleiters eingefügt ist. Mit diesem Messwiderstand werden die in das Tragseil eingekoppelten Überspannungen gemessen. Bei der Auswahl der Sensoren wurde besonderer Wert auf die Dauerbetriebsfestigkeit und die Beständigkeit gegenüber den teilweise extremen Wetterbedingungen gelegt. Im Sommer betragen die Temperaturen bis über 30 °C, während sie im Winter unter -20 °C absinken können. Hinzu kommt die Schnee- und Eislast im Winter sowie die Windlast, wobei Windstärken bis zum Orkan zu berücksichtigen sind. Um die Wetterdaten aufzuzeichnen, wurde ergänzend eine automatisch arbeitende Wetterstation installiert. Die Wetterstation ist auf der abgewandten Seite des Kabinendaches installiert und daher auf Bild 3.8 nicht sichtbar.



Bild 3.9: Sensoren für das magnetische Feld, die zeitliche Änderung des elektrischen Feldes und die zeitliche Änderung des magnetischen Feldes

Die Dachkonstruktion ist mehrfach leitend mit dem Kabinendach und der Kabinenwand verbunden. Mit dieser Maßnahme sollen die Potentialunterschiede und somit die Messfehler möglichst klein gehalten werden. Die Messkabel von den Sensoren zum Kabineninnern sind in flexiblen, metallenen Schirmrohren zum Schutz gegen elektrische Störungen und mechanische Beanspruchungen verlegt.

Die Messkabine ist an ihren unteren Ecken durch insgesamt vier 150 cm lange Tiefenerder geerdet.

Bei intensiver Sonneneinstrahlung würden sich im Sommer sehr hohe Innentemperaturen ergeben, sodass eine durchgängige Kühlung der Messkabine erforderlich ist. Zur Kühlung des Innenraums ist die Kabine mit zwei Klimaanlage des Typs Stulz Wall-Air CVS 40 ausgerüstet. Die erforderliche Kühlleistung kann durch eine einzige Klimaanlage erbracht werden. Da jedoch ein Ausfall der Klimaanlage unbedingt zu vermeiden ist, sind aus Gründen der Redundanz zwei baugleiche Geräte installiert.

Die Versorgung der Kabine mit elektrischer Energie erfolgt über einen Drehstromanschluss (400 V, 32 A) aus dem örtlichen Niederspannungsnetz. Die beiden Klimaanlage sind dreiphasig angeschlossen; sämtliche anderen Geräte und die Beleuchtungen sind einphasig über einen Filter mit dem Stromnetz verbunden.

3.4.3 Sensoren für die Messung des elektrischen Feldes

3.4.3.1 Kapazitiver elektrischer Feldsensor

Der elektrische Feldsensor entspricht einer elektrischen Antenne, bei der die Abmessungen hinreichend klein gegenüber der Wellenlänge sind. In diesem Fall kann der Strahlungswiderstand vernachlässigt werden und die elektrische Antenne kann im Ersatzschaltbild als kapazitiver Sensor mit der Antennenkapazität C_A und der Leerlaufspannung u_0 , dargestellt werden (siehe Bild 3.10). Die Leerlaufspannung u_0 ergibt sich aus dem elektrischen Feld und der effektiven Länge l_{eff} der Antenne gemäß folgender Beziehung:

$$u_0 = E \cdot l_{\text{eff}} \quad (21)$$

Für eine über einer ideal leitenden Ebene angebrachte Monopolantenne mit der Länge l ergibt sich die effektive Länge zu:

$$l_{\text{eff}} = \frac{l}{2} \quad (22)$$

Die Antennenkapazität C_A lässt sich analytisch nur näherungsweise bestimmen. In guter Näherung kann sie nach [14] über folgende Gleichung abgeschätzt werden:

$$C_A = \frac{2\pi\epsilon \cdot l}{\ln\left(\frac{l}{r\sqrt{3}}\right)} \quad (23)$$

Der Abschlusswiderstand R bestimmt das Frequenzverhalten der Antenne. Hierfür ist die Grenzfrequenz f_g maßgebend:

$$f_g = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C_A} \quad (24)$$

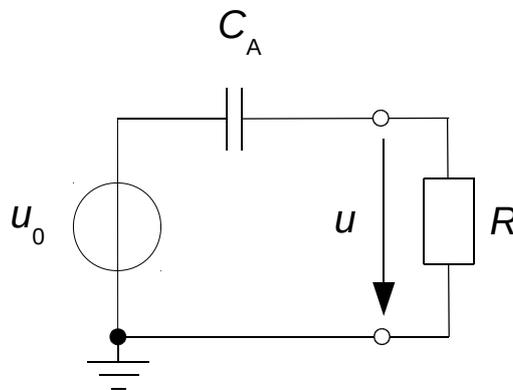


Bild 3.10: Ersatzschaltbild eines kapazitiven elektrischen Sensors

Für Frequenzen wesentlich höher als f_g wirkt die Antennenkapazität C_A näherungsweise als Kurzschluss, weshalb für die Spannung am Abschlusswiderstand näherungsweise gilt: $u = u_0$. Nach Gleichung (21) wird in diesem Fall eine dem elektrischen Feld proportionale Spannung u gemessen, d.h. die Antenne wirkt als $E(t)$ -Sensor. Die Grenzfrequenz f_g ist hierbei die untere Grenzfrequenz des $E(t)$ -Sensors.

Für Frequenzen, die wesentlich niedriger als f_g sind, fällt die Spannung im wesentlichen über der Antennenkapazität C_A ab. Für die am Abschlusswiderstand R auftretende Spannung gilt daher näherungsweise:

$$u = R \cdot C_A \cdot \frac{du_0}{dt} \quad (25)$$

Nach Gleichung (25) wird in diesem Fall eine der elektrischen Feldänderung proportionale Spannung gemessen, d.h. die Antenne wirkt als dE/dt -Sensor. Die Grenzfrequenz f_g ist hierbei die obere Grenzfrequenz des dE/dt -Sensors.

Neben der Beschaltung ist die Länge l des Antennenstabes gegenüber der Wellenlänge λ zu beachten. Die erste Resonanzfrequenz einer Monopolantenne ergibt sich für $l = \lambda/4$. Will man die Antenne als kapazitiven Sensor im linearen Bereich unterhalb dieser Resonanzfrequenz betreiben, muss die Wellenlänge hinreichend klein hierzu sein. Als Abschätzung für die minimal zulässige Wellenlänge kann man die Bedingung $l = 0,1 \cdot \lambda_{\min}$ zugrunde legen. Hieraus ergibt sich mit der Lichtgeschwindigkeit c_0 eine obere Grenzfrequenz, die nur von den geometrischen Abmaßen bestimmt ist:

$$f_{g,o} = \frac{c_0}{\lambda_{\min}} = \frac{c_0}{10 \cdot l} \quad (26)$$

3.4.3.2 $E(t)$ -Sensor

Der $E(t)$ -Sensor für die Messung des elektrischen Feldes ist als Monopolantenne gefertigt. Der runde Antennenstab besteht aus Aluminium und hat eine Länge $l_E = 2,5$ m und einen Radius $r_E = 4$ cm. Die effektive Länge ergibt sich nach Gleichung (22) zu $l_{\text{eff}} = 1,25$ m. Mit Gleichung (23) berechnet sich die Antennenkapazität zu $C_{A,E} = 40$ pF. Die obere Grenzfrequenz ergibt sich näherungsweise mit Gleichung (26) zu $f_{g,o,E} = 12$ MHz.

Legt man als Messwiderstand den Eingangswiderstand der Messwandlerkarten $R_{m,E} = 1$ M Ω zugrunde, würde sich die untere Grenzfrequenz des $E(t)$ -Sensors nach Gleichung (24) ergeben zu:

$$f_{g,u,E} = \frac{1}{2\pi \cdot R_{m,E} \cdot C_{A,E}} = 4 \text{ kHz} \quad (27)$$

Da eine Blitzentladung über eine Sekunde dauern kann, ist für eine zeitlich richtige Aufzeichnung des elektrischen Feldes eine deutlich tiefere Grenzfrequenz wünschenswert. Dies lässt sich erreichen, indem die Antennenkapazität um eine zwischen Erde und Antennenstab geschaltete Kapazität C_b vergrößert wird. Bild 3.11 zeigt die gewählte Beschaltung mit der Kapazität $C_b = 2$ μ F. Mit dieser Kapazität ergibt sich die untere Grenzfrequenz nach Gleichung (27) zu $f_{g,u,E} = 0,08$ Hz. Der dem Messkabel vorgeschaltete Widerstand $R_b = 50$ Ω dient als reflexionsfreier Abschluss für das koaxiale Messkabel mit dem Wellenwiderstand $\Gamma = 50$ Ω . Dadurch lässt sich nach [25] eine durch Reflexionen unverzerrte Messung erreichen, auch

wenn am Abschlusswiderstand $R_{m,E} = 1 \text{ M}\Omega$ das Messsignal näherungsweise total reflektiert wird. Die in Bild 3.11 eingezeichnete Antennenkapazität $C_{A,E} = 44,8 \text{ pF}$ weicht leicht vom oben angegebenen Wert ab. Hierbei ist berücksichtigt, dass sich bei genauerer Betrachtung und bei Aufstellung auf dem Dach ein etwas veränderter Wert ergibt.

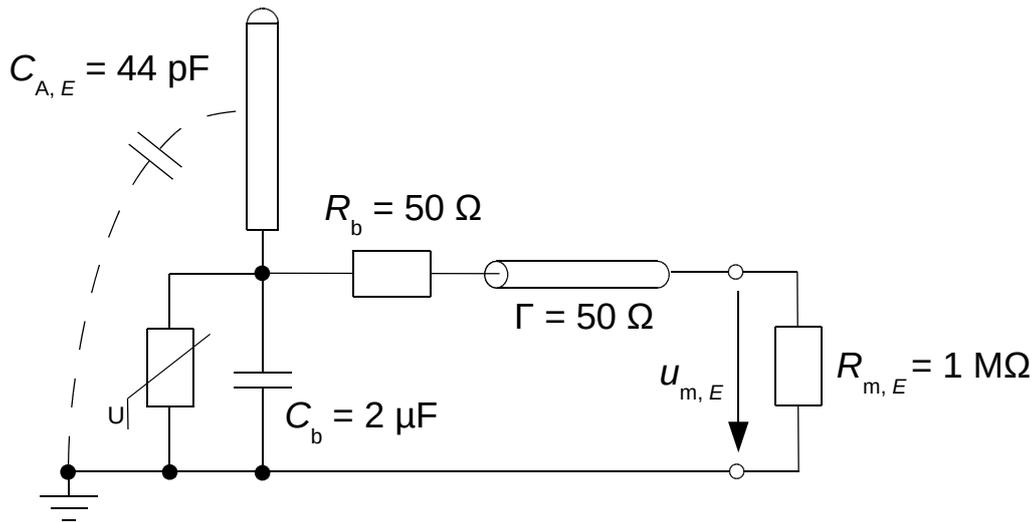


Bild 3.11: Ersatzschaltbild des $E(t)$ -Sensors

Die untere Grenzfrequenz ließe sich weiter absenken, wenn die Kapazität C_b erhöht würde. Dem steht entgegen, dass die Kapazität C_b mit der Antennenkapazität $C_{A,E}$ einen Spannungsteiler bildet. Eine Vergrößerung der Kapazität C_b würde daher dazu führen, dass das Messsignal auf nicht mehr sinnvoll zu messende kleine Spannungen reduziert würde.

Beim praktischen Aufbau ist aufgrund der Leiterführung auch eine Induktivität in Serie zur Kapazität C_b wirksam. Analog zu einem Hochspannungsteiler muss die Induktivität möglichst klein gehalten werden, um die Messung nicht durch induktive Anteile zu verfälschen. Um einen niederinduktiven Aufbau zu gewährleisten, besteht die Kapazität C_b aus 20 parallelgeschalteten, coaxial angeordneten Styroflex-Kondensatoren mit einer Kapazität von je 100 nF. Als Überspannungsschutz ist ein Varistor vom Typ Siemens S20K20 eingefügt. Der Varistor ist als nichtlinearer Widerstand parallel zur Kapazität C_b im Ersatzschaltbild des $E(t)$ -Sensors (Bild 3.11) zu erkennen.

Bei einer genaueren Betrachtung werden nun die Aufstellung der Antenne auf dem Dach der Messkabine und der Einfluss der Aufbauten berücksichtigt. Da bei diesem komplexen Aufbau keine analytische Lösung möglich ist, wurde eine numeri-

sche Simulation mit dem Programm CONCEPT II durchgeführt [44]. Bild 3.12 zeigt die Nachbildung der Messkabine. Oberhalb der Messkabine ist die Dachkonstruktion mit dem Flachdach erkennbar, auf dem neben dem $E(t)$ -Sensor die Sensoren für die Messung der elektrischen Feldänderung (dE/dt -Sensor) und für die Messung des Magnetfeldes ($H(t)$ -Sensor) und seiner zeitlichen Änderung (dH/dt -Sensor) aufgebracht sind. Die an der Kante der Messkabine installierte Feldmühle ist vereinfachend als Drahtstruktur nachgebildet.

Das CONCEPT-Programm basiert auf der Momentenmethode, wobei die Maxwell-Gleichungen im Frequenzbereich gelöst werden [20]. Die zeitlichen Größen wie Spannungen und Ströme werden durch inverse Fourier-Transformation bestimmt. Die grundlegenden Annahmen des Programms und seine Benutzung sind in [8] und [45] beschrieben. Validierungen des Programms finden sich in [8] und [9].

Die sogenannte Dünndrahtmethode wird benutzt, um gegenüber ihrer Länge dünne Drähte nachzubilden. Dazu ist eine Segmentierung der Drähte in gegenüber der Wellenlänge λ hinreichend kleine Stücke erforderlich, wobei für die maximale Drahtlänge l die Bedingung $l < \lambda/10$ eingehalten wird. Die Drahtstrukturen werden generell mit der Leitfähigkeit von $38 \cdot 10^6$ S/m angenommen, was für Aluminium typisch ist. Metallplatten werden hingegen durch rechteckige bzw. dreieckige ideal leitende Plattenstücke nachgebildet. Bild 3.12 zeigt die gewählte Unterteilung in Plattenstücke, wobei auch hier darauf geachtet ist, dass die Kantenlänge der einzelnen Plattenstücke klein gegenüber der Wellenlänge ist.

Die Messkabine befindet sich unmittelbar über der Erde, die als ideal leitende, unendlich ausgedehnte Ebene angenommen ist. Die an den vier Ecken befindlichen Erder werden mit kurzen Drähten simuliert, die jeweils mit Erde über einen Widerstand von 100Ω verbunden sind. Nähere Ausführung hierzu finden sich im Abschnitt 3.4.5.1.

Die Messgrößen werden an den Sensoren in ein spannungsabhängiges Messsignal umgewandelt. Zur Bestimmung der Umrechnungsfaktoren werden die Sensoren durch ein definiertes Feld angeregt. Als Feldanregung dient eine ebene elektromagnetische Welle mit einer Amplitude von $E = 1$ kV/m, und der Frequenz $f = 100$ kHz. Die Richtung des einfallenden Feldes ist in Bild 3.12 ersichtlich. Hierbei gibt der Wellenvektor \vec{k} die Ausbreitungsrichtung der hinsichtlich des elektrischen Feldes vertikal polarisierten ebenen Welle vor.

Betrachtet man zunächst die $E(t)$ -Antenne im Leerlauf und ohne Beschaltung mit C_b , ergibt sich aus der rechnerischen Simulation eine Messspannung $u_{m,E,0} = 2,37$ kV. Dieser Wert zeigt, dass die für eine unendlich ausgedehnte, idealleitende

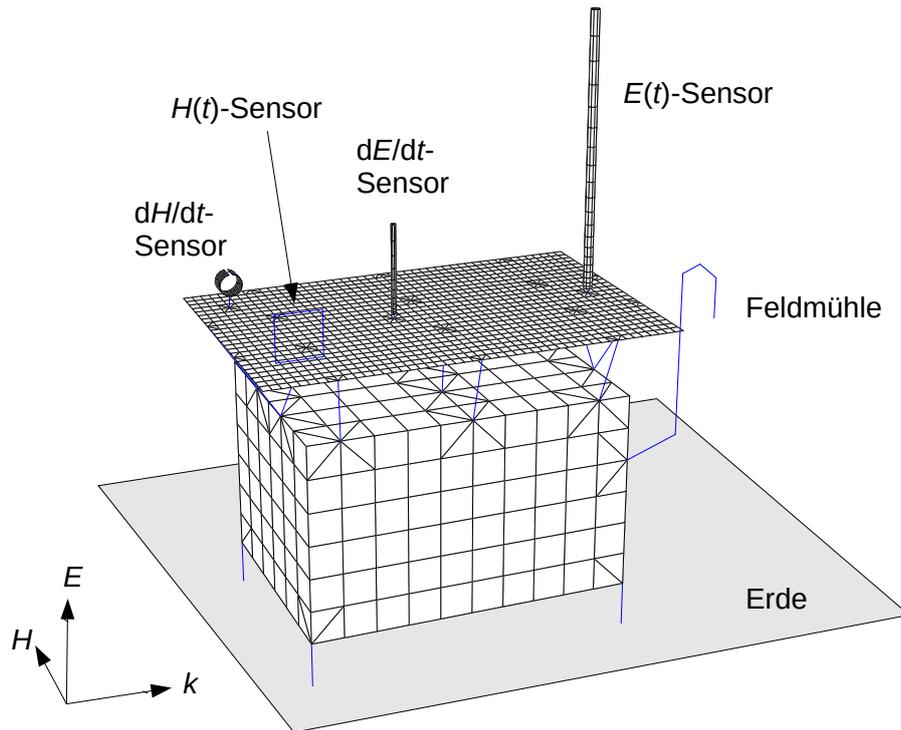


Bild 3.12: Simulationsmodell der Messkabine in CONCEPT II

Ebene berechnete effektive Länge nach Gleichung (22) modifiziert werden muss. Grund hierfür ist die Feldüberhöhung durch das etwa 3 m hohe Dach. Um die Feldüberhöhung zu berücksichtigen, wird ein Überhöhungsfaktor η_E eingeführt. Die effektive Länge ergibt sich somit zu:

$$l_{\text{eff},E} = \frac{u_{m,E,0}}{E} = \eta_E \frac{l_E}{2}, \quad (28)$$

Aus Gleichung (28) ergeben sich unmittelbar der Überhöhungsfaktor und die effektive Länge zu $\eta_E = 1,89$ und $l_{\text{eff},E} = 2,37$ m.

Nun wird die Antenne bei sonst gleichen Verhältnissen kurzgeschlossen, um die Antennenkapazität $C_{A,E}$ zu bestimmen. Da die treibende Spannung $u_{m,E,0}$ gegenüber dem Leerlauf unverändert bleibt, ergibt sich die Antennenkapazität $C_{A,E}$ nach Bild 3.10 aus dem Kurzschlussstrom $i_{K,E}$ zu:

$$C_{A,E} = \frac{i_{K,E}}{2\pi f \cdot u_{m,E,0}} \quad (29)$$

Bei der gewählten Frequenz $f = 100$ kHz wird durch CONCEPT II ein Kurzschlussstrom $i_{K,E} = 66,685$ mA berechnet. Nach Gleichung (29) ergibt sich somit eine Antennenkapazität $C_{A,E} = 44,84$ pF. Gegenüber Gleichung (22) stimmt die Antennenkapazität mit einer Abweichung von etwa 10 % überein. Im folgenden wird dieser verbesserte Wert von $C_{A,E} = 44,84$ pF zugrunde gelegt.

Für die Kalibrierung des $E(t)$ -Sensors verbleibt noch, den Umrechnungsfaktor k_E , zwischen der elektrischen Feldstärke E und der Messspannung $u_{m,E}$ zu bestimmen. Der Umrechnungsfaktor ist gegeben durch:

$$k_E = \frac{E}{u_{m,E}} \quad (30)$$

Bei den Simulationen ist die Beschaltungskapazität $C_b = 2$ μ F bisher unberücksichtigt geblieben. Berücksichtigt man nun die Beschaltungskapazität C_b , führt dies auf einen Spannungsteiler mit der Antennenkapazität $C_{A,E}$. Da $C_b \gg C_{A,E}$ gilt, ergibt sich das Übersetzungsverhältnis \ddot{u}_E in guter Näherung zu:

$$\ddot{u}_E = \frac{C_b}{C_{A,E}} = \frac{2 \mu\text{F}}{44,8 \text{ pF}} = 44600. \quad (31)$$

Mit den Gleichungen (28), (30) und (31) ergibt sich der Umrechnungsfaktor zu

$$k_E = \frac{\ddot{u}_E}{l_{\text{eff},E}} = \frac{44600}{2,37 \text{ m}} = 18800 \text{ m}^{-1}. \quad (32)$$

Zur Überprüfung des Ergebnisses wird bei der Simulation mit CONCEPT II die Beschaltungskapazität C_b eingefügt. Bei der Feldstärke $E = 1$ kV/m ergibt sich eine Spannung $u_{m,E} = 53$ mV. Nach Gleichung (30) errechnet sich auch auf diesem Weg der Umrechnungsfaktor zu $k_E = 18800 \text{ m}^{-1}$.

Zur Ermittlung der oberen Grenzfrequenz wird der Frequenzgang mit CONCEPT II von einigen kHz bis einige 10 MHz aufgenommen. Da bei Erhöhung der Frequenz die Messspannung zunächst in etwa konstant ist und dann bei etwa 12 MHz um 3 dB abzuweichen beginnt, ergibt sich diese Frequenz als obere Grenzfrequenz des $E(t)$ -Sensors. Dieses Ergebnis ist in guter Übereinstimmung zu der vereinfachten Abschätzung der oberen Grenzfrequenz mit Gleichung (26) (siehe oben).

3.4.3.3 dE/dt-Sensor

Der dE/dt-Sensor für die Messung der elektrischen Feldänderung ist ebenfalls als Monopolantenne gefertigt. Der runde Antennenstab besteht ebenfalls aus Aluminium und hat die Länge $l_{dE/dt} = 80$ cm und den Radius $r_{dE/dt} = 2$ cm. Die effektive Länge ergibt sich nach Gleichung (22) zu $l_{eff,dE/dt} = 40$ cm. Mit Gleichung (23) berechnet sich die Antennenkapazität zu $C_{A,dE/dt} = 14$ pF. Bild 3.13 zeigt das Ersatzschaltbild der Antenne, die über ein koaxiales Messkabel mit dem Wellenwiderstand $\Gamma = 50 \Omega$ angeschlossen ist. Um Reflexionen zu verhindern, ist das Messkabel mit dem Widerstand $R_{m,dE/dt} = 50 \Omega$ abgeschlossen. Aus der Beschaltung der Antenne ergibt sich eine obere Grenzfrequenz nach (24) von über 200 MHz. Andererseits ist die Frequenzbeschränkung aufgrund der geometrischen Abmessungen zu beachten. Nach Gleichung (26) ergibt sich daher eine reduzierte obere Grenzfrequenz von $f_{g,o,dE/dt} = 37,5$ MHz

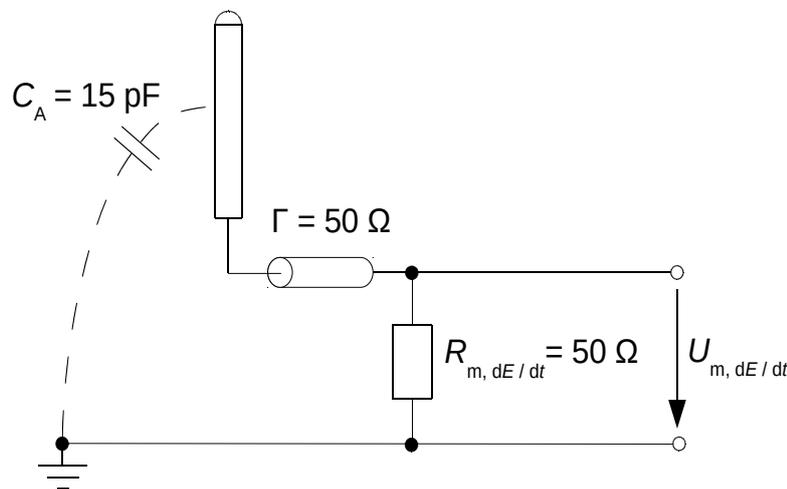


Bild 3.13: Ersatzschaltbild der dE/dt-Antenne

Für eine genauere Betrachtung wurde analog zum $E(t)$ -Sensor eine rechnerische Simulation mit CONCEPT II einschließlich der Dachaufbauten durchgeführt (siehe Bild 3.12). Dabei zeigte sich, dass die Dachaufbauten das Feld abhängig von der Frequenz verzerren. Dadurch wird die obere Grenzfrequenz weiter reduziert, so dass die tatsächliche obere Grenzfrequenz etwa auf $f_{g,o,dE/dt} = 15$ MHz beschränkt ist. Eine untere Grenzfrequenz ist nicht zu beachten, da sie theoretisch $f_{g,u,dE/dt} = 0$ Hz beträgt. Allerdings erzeugen sich langsam ändernde Felder nur kleine Messspannungen, die bei sehr niedriger Amplitude mit den Messwandlerkarten nicht aufgelöst werden können. Dadurch entstehen zwangsläufig Einschränkungen hinsichtlich der unteren Grenzfrequenz.

Analog zum $E(t)$ -Sensor wurde die Kalibrierung des dE/dt-Sensors mit Hilfe von CONCEPT II ausgeführt. Die effektive Länge der Antenne ergab sich zu

$l_{\text{eff,dE/dt}} = 0,87$ m und der Feldüberhöhungsfaktor zu $\eta_{\text{dE/dt}} = 2,175$. Für den Kurzschlussfall ergab sich ein Kurzschlussstrom $i_{\text{K,dE/dt}} = 8,139$ mA, womit sich nach Gleichung (29) die Antennenkapazität zu $C_{\text{A,dE/dt}} = 14,9$ pF berechnen lässt.

Der Umrechnungsfaktor zwischen Feldstärkeänderung dE/dt und Messspannung $u_{\text{m,dE/dt}}$ ist gegeben durch:

$$k_{\text{dE/dt}} = \frac{dE/dt}{u_{\text{m,dE/dt}}} \quad (33)$$

Aus Gleichung (21) und Gleichung (25) ergibt sich die Messspannung zu:

$$u_{\text{m,dE/dt}} = R_{\text{m,dE/dt}} \cdot C_{\text{A,dE/dt}} \cdot l_{\text{eff,dE/dt}} \cdot \frac{dE}{dt} \quad (34)$$

Hieraus bestimmt sich der Umrechnungsfaktor unmittelbar zu:

$$k_{\text{dE/dt}} = \frac{1}{C_{\text{A,dE/dt}} \cdot l_{\text{eff,dE/dt}} \cdot R_{\text{m,dE/dt}}} = 1,54 \cdot 10^9 \frac{1}{\text{m} \cdot \text{s}} \quad (35)$$

3.4.3.4 Überprüfung der Rechenergebnisse mit dem Programm COMSOL

Die Rechenergebnisse von CONCEPT II wurden mit dem Feldberechnungsprogramm COMSOL überprüft. Das Programm COMSOL, das auf der Finite-Elemente-Methode (FEM) basiert, ist ein in Forschung, Lehre und Entwicklung breit eingesetztes Programm.

Um die Ergebnisse mit CONCEPT II unmittelbar vergleichen zu können, wurde zwischen zwei Platten eine Spannung gelegt, sodass sich im homogenen Bereich eine vertikale Feldstärke von $E = 1$ kV/m einstellte. In diesen homogenen Feldbereich wurde dann die Nachbildung der Messkabine unmittelbar auf die untere Platte, die die Erde nachbildet, gesetzt. Bei diesem Modell ist die Messkabine samt Dachaufbau durch einen geerdeten Aluminiumquader nachgebildet. Auf den Quader wurde wahlweise der $E(t)$ -Sensor oder der dE/dt -Sensor platziert.

Bild 3.14 zeigt die verwendete Anordnung für den dE/dt -Sensor mit dem berechneten Verlauf des elektrischen Potentials. Die Verzerrung der Potentiallinien durch

die Messkabine ist deutlich erkennbar. Für den dE/dt -Sensor wurde mit COMSOL eine Leerlaufspannung von $u_{m,dE/dt,0} = 876 \text{ V}$ berechnet. Mit Gleichung (21) ergibt sich die effektive Länge zu $l_{\text{eff},dE/dt} = 87,6 \text{ cm}$, was mit dem mit CONCEPT berechneten Wert von $l_{\text{eff},dE/dt} = 0,87 \text{ m}$ bis auf eine minimale Differenz identisch ist.

In analoger Weise wurde mit COMSOL für den $E(t)$ -Sensor eine Leerlaufspannung von $u_{m,E,0} = 2,40 \text{ kV}$ ermittelt. Im Vergleich hierzu ergibt sich zu den Berechnungen mit CONCEPT II, bei denen die Leerlaufspannung zu $u_{m,E,0} = 2,37 \text{ kV}$ ermittelt wurde, eine minimale Differenz. Diese minimalen Unterschiede bestätigen, dass die Eichfaktoren mit hinreichender Genauigkeit bestimmt sind.

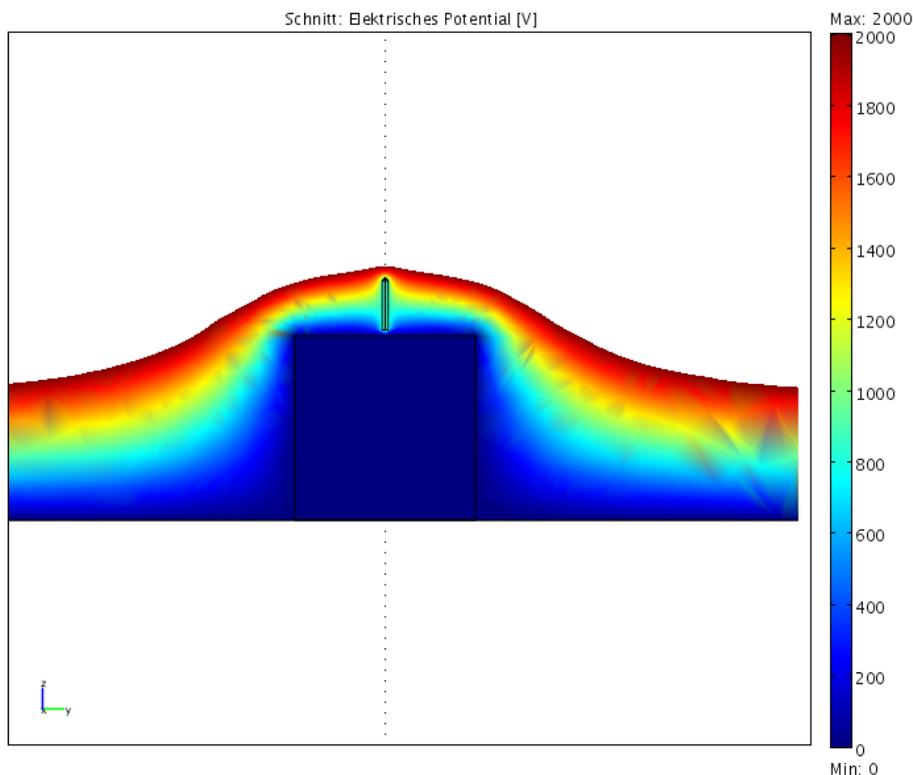


Bild 3.14: COMSOL-Simulationsergebnis für den dE/dt -Sensor mit dem Verlauf des elektrischen Potentials

3.4.3.5 Messung des elektrostatischen Feldes mit einer Feldmühle

Zur Messung des (quasi-)elektrostatischen Feldes wird als Sensor eine Feldmühle vom Typ EFS 1000 der Firma Mission Instruments eingesetzt. Die Feldmühle ist an einer Kante der Messkabine befestigt, so dass sich die Öffnung etwa auf Höhe der Dachebene befindet (siehe Bild 3.15). Das Messprinzip der Feldmühle beruht auf der periodischen Abdeckung geerdeter Platten durch ebenfalls geerdete Rotor-

blätter. Durch die dadurch verursachte Ladungsänderung entsteht ein Verschiebungsstrom, der von einer nachgeschalteten Elektronik in eine dem elektrischen Feld proportionale Spannung umgewandelt wird.

Die Anstiegszeit der Feldmühle beträgt laut Herstellerangabe 0,1 s, womit sich eine obere Grenzfrequenz von etwa 3,5 Hz ergibt. Der Umrechnungsfaktor $k_{E,\text{stat}}$ zwischen dem elektrostatischen Feld und der Messspannung ist gegeben durch:

$$k_{E,\text{stat}} = \frac{E}{u_{m,E,\text{stat}}} \quad (36)$$

Seitens des Herstellers wurde die Feldmühle mit ihrem Haltearm über einer metallenen Platte mit einem Umrechnungsfaktor $k_{E,\text{stat}} = 2000 \text{ m}^{-1}$ geeicht. Bei einer maximalen betragsmäßigen Messspannung von 10 V können hiermit Feldstärken von -20 kV/m bis $+20 \text{ kV/m}$ gemessen werden. Da hiermit die Messspannung bei ladungsstarken Blitzen, die Feldstärken bis etwa 100 kV/m erzeugen können, den Messbereich überschreiten würden, wurde die Feldmühle unempfindlicher gemacht. Dies geschah dadurch, dass sie zunächst von ihrem ursprünglichen Haltearm getrennt und an der Kabine etwa auf Höhe des Messdaches befestigt wurde.



Bild 3.15: Feldmühle, Wetterstation und E(t)-Sensor

Anschließend wurde über die Öffnung der Sensorfläche ein metallener Ring geschoben, um das elektrische Feld zu schwächen. Der metallene Ring wurde so justiert, dass sich ein Umrechnungsfaktor von $k_{E,stat} = 10000 \text{ m}^{-1}$ ergab. Die Justierung erfolgte durch eine kalibrierte zweite Feldmühle, wobei als Referenzgröße das Schönwetterfeld der Erde benutzt wurde.

3.4.4 Sensoren für die Messung des magnetischen Feldes

3.4.4.1 Induktiver magnetischer Feldsensor

Der magnetische Feldsensor entspricht einer magnetischen Antenne, bei der die Abmessungen hinreichend klein gegenüber der Wellenlänge sind. In diesem Fall kann die magnetische Antenne im elektrischen Ersatzschaltbild als magnetischer Feldsensor mit der Antenneninduktivität L_A und der Leerlaufspannung U_0 dargestellt werden (siehe Bild 3.16). Die Leerlaufspannung u_0 ergibt sich aus dem magnetischen Feld und der effektiven Fläche A_{eff} der Antenne gemäß folgender Beziehung:

$$u_0 = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot A_{\text{eff}} \cdot \frac{dH}{dt} \quad (37)$$

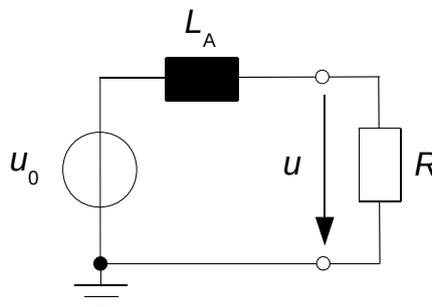


Bild 3.16: Ersatzschaltbild eines induktiven magnetischen Sensors

Für die Permeabilitätszahl wird im Folgenden der Wert für Luft $\mu_r = 1$ angesetzt.

Für eine Rahmenantenne bestehend aus einer einlagigen Schleife entspricht die effektive Fläche der tatsächlichen Schleifenfläche A :

$$A_{\text{eff}} = A \quad (38)$$

Die Antenneninduktivität L_A lässt sich analytisch nur näherungsweise bestimmen.

Nach [13] lässt sich die Induktivität einer quadratischen Leiterschleife mit der Kantenlänge a und dem Radius r mit folgender Formel abschätzen:

$$L_A = \frac{2\mu_0 a}{\pi} \left(\ln\left(\frac{a}{r}\right) - 0,774 \right) \quad (39)$$

Der Abschlusswiderstand R bestimmt das Frequenzverhalten der Antenne. Hierfür ist die Grenzfrequenz f_g maßgebend:

$$f_g = \frac{R}{2\pi \cdot L_A} \quad (40)$$

Für Frequenzen wesentlich niedriger als f_g wirkt die Antenneninduktivität L_A näherungsweise als Kurzschluss, weshalb für die Ausgangsspannung näherungsweise gilt: $u = u_0$. Nach Gleichung (37) wird in diesem Fall eine der magnetischen Feldänderung proportionale Spannung gemessen. Die Grenzfrequenz f_g wirkt hierbei als obere Grenzfrequenz des dH/dt -Sensors.

Für Frequenzen wesentlich höher als f_g fällt die Spannung im wesentlichen über der Antenneninduktivität L_A ab und es gilt:

$$u_0 = \mu_0 \cdot A \cdot \frac{dH}{dt} = L_A \cdot \frac{di}{dt} \quad (41)$$

Durch Integration erhält man folgende Beziehung zwischen dem Magnetfeld H und dem in der Schleife fließenden Strom i :

$$H = \frac{L_A}{\mu_0 \cdot A} i \quad (42)$$

Nach Gleichung (42) wird in diesem Fall ein dem Magnetfeld proportionaler Strom gemessen, d.h. die Antenne wirkt als $H(t)$ -Sensor. Die Grenzfrequenz f_g bestimmt hierbei die untere Grenzfrequenz des $H(t)$ -Sensors.

3.4.4.2 H(t)-Sensor

Zur Messung des magnetischen Blitzfeldes wird eine geschlossene, quadratische Drahtschleife mit einer Kantenlänge $a_H = 0,4$ m und einem Drahradius $r_H = 4$ mm

eingesetzt. Der $H(t)$ -Sensor ist so auf den Turm ausgerichtet, dass das Magnetfeld die Schleifenfläche bei Blitzeinschlag in den Turm senkrecht durchdringt. Der durch das Magnetfeld bzw. dessen Änderung induzierte Kurzschlussstrom wird an der unteren Kante der Drahtschleife mit einem Strommonitor gemessen. Der Strommonitor vom Typ Pearson 410 hat ein Übersetzungsverhältnis

$$\ddot{u}_H = \frac{u_{m,H}}{i_{k,H}} = 0,1 \frac{\text{V}}{\text{A}} \quad (43)$$

Tabelle 6 gibt die Kenndaten des Strommonitors wieder.

Größe	Wert
Innendurchmesser	1,27 cm
Untere Grenzfrequenz	120 Hz
Obere Grenzfrequenz	20 MHz
Anstiegszeit	20 ns

Tabelle 6: Kenndaten des Strommonitors Pearson 410

Für den $H(t)$ -Sensor ist Gleichung (42) maßgebend. Mit Gleichung (43) ergibt sich folgende Beziehung:

$$H = \frac{L_H}{\ddot{u}_H \cdot \mu_0 \cdot A} \cdot u_{m,H} = k_H \cdot u_{m,H} \quad (44)$$

Hierbei bezeichnet die Größe k_H den Umrechnungsfaktor zwischen dem Magnetfeld H und der am Strommonitor gemessenen Spannung $u_{m,H}$.

Mit Gleichung (39) errechnet sich die Induktivität zu $L_H = 1,226 \mu\text{H}$. Daraus folgt der Umrechnungsfaktor zu $k_H = 60,97 \text{ A/Vm}$.

Analog zum $E(t)$ -Sensor wird nun bei einer genaueren Betrachtung die Aufstellung des $H(t)$ -Sensors auf dem Dach der Messkabine und der Einfluss der Aufbauten berücksichtigt. Die Berechnung erfolgt wiederum mit dem Programm CONCEPT II mit einer Feldanregung durch die oben beschriebene ebene elektromagnetische Welle mit der Amplitude $E = 1 \text{ kV/m}$. Für die einfallende ebene elektromagnetische Welle ergibt sich die Amplitude des magnetischen Feldes mit

$$H = \frac{E}{\Gamma_0} \quad (45)$$

zu $H = 2,6526 \text{ A/m}$, wobei Γ_0 den Feldwellenwiderstand im Vakuum bezeichnet.

Für die Frequenz $f = 100 \text{ kHz}$ ergibt sich eine Messspannung $u_{m,H} = 0,05005 \text{ V}$. Bei den weiteren Untersuchungen zeigte sich, dass der Frequenzgang einen leichten Einfluss auf die Messspannung hat. Daher wurde das Zeitbereichsverhalten des Sensors bei einer Anregung mit einem zeitlich trapezförmigen Feld mit identischer Amplitude und einer Anstiegszeit von 10 ns untersucht. Die Simulationsrechnung wurde im Frequenzbereich mit Frequenzen zwischen 10 kHz und 20 MHz durchgeführt. Die Messspannung ergab sich aus der inversen Fourier-Transformation zu $u_{m,H} = 0,05420 \text{ V}$. Da diese Zeitbereichsantwort die Wirkung des $H(t)$ -Sensors besser wiedergibt als eine Einzelfrequenz, wird im folgenden der Wert $u_{m,H} = 0,05420 \text{ V}$ angesetzt.

Den Umrechnungsfaktor für die $H(t)$ -Sonde

$$k_H = \frac{H}{u_{m,H}} \quad (46)$$

erhält man damit zu $k_H = 48,9 \text{ A / Vm}$.

Die untere Grenzfrequenz der Sonde ergibt sich mit Gleichung (40) näherungsweise zu 150 Hz . Hierbei ist eine Induktivität $L_H = 1,226 \text{ }\mu\text{H}$ und eine Abschätzung für den Widerstand des Spulendrahtes $R_H = 1 \text{ m}\Omega$ zugrunde gelegt. Die obere Grenzfrequenz wurde durch Simulation in CONCEPT II ermittelt. Deutliche Abweichungen vom gewünschten linearen Übertragungsverhalten zeigen sich ab etwa 25 MHz . Daher wird die obere Grenzfrequenz des Sensors vom Strommonitor mit seiner deutlich niedrigeren oberen Grenzfrequenz von 20 MHz bestimmt (siehe Tabelle 6). Die obere Grenzfrequenz des $H(t)$ -Sensors beträgt somit näherungsweise $f_{g,o,H} = 20 \text{ MHz}$.

3.4.4.3 dH/dt-Sensor

Der dH/dt -Sensor besteht aus einer einlagigen kreisförmigen Schleife mit dem Kreisradius $r_{dH/dt} = 10 \text{ cm}$, wobei als Schleifenmaterial ein koaxiales *semi-rigid*-Kabel mit einem Wellenwiderstand von $50 \text{ }\Omega$ verwendet wird. Bei Anschluss an das Messkabel, das den gleichen Wellenwiderstand aufweist, ergibt sich dadurch ein reflexionsfreier Übergang. Der Sensor ist so auf den Turm ausgerichtet, dass

das Magnetfeld die Schleifenfläche bei Blitzeinschlag in den Turm senkrecht durchdringt.

Die Messung der zeitlichen Änderung des magnetischen Blitzfeldes erfolgt prinzipiell ähnlich zur Messung des magnetischen Feldes, allerdings ist hier die Spannungsmessung an einer offenen Schleife notwendig. Um die für den dH/dt -Sensor notwendige Öffnung zu erhalten, ist der metallene Außenleiter des *semi-rigid*-Kabels auf einer Strecke von etwa 5 mm entfernt. Dadurch entsteht ein Spalt, der am höchsten Punkt der Schleife angebracht ist, sodass sich gegenüber der Vertikalen zwei symmetrische Hälften des Sensors ergeben. Diese Maßnahme dient dazu, das elektrische Feld zu kompensieren, welches ansonsten durch die Messung verfälscht würde.

Beim dH/dt -Sensor wirkt die Grenzfrequenz f_g nach Gleichung (40) als obere Grenzfrequenz. Will man die obere Grenzfrequenz erhöhen, verbleibt nur die Erniedrigung der Induktivität, da der Abschlusswiderstand von 50Ω durch das *semi-rigid*-Kabel bereits vorgegeben ist. Zu diesem Zweck wurde an die vom *semi-rigid*-Kabel gebildete Schleife auf ihrer Innenseite ein dünnes 20 cm breites Kupferblech angelötet. Dadurch entstand ein Zylinder, der vom *semi-rigid*-Kabel umfasst wird. Wie beim *semi-rigid*-Kabel wurde in den Zylinder ein 5 mm breiter Spalt eingefügt. Aus Gründen der mechanischen Stabilität ist der Spalt mit Kunststoff-Abstandshaltern überbrückt. Für diese Zylinderantenne mit dem Radius $r_{dH/dt}$ und der Länge $l_{dH/dt}$ berechnet sich die Antenneninduktivität nach [36] zu:

$$L_{dH/dt} = \mu_0 \pi \frac{r_{dH/dt}^2}{l_{dH/dt}} \quad (47)$$

Mit dem Radius des Zylinders $r_{dH/dt} = 10$ cm und der Länge $l_{dH/dt} = 20$ cm ergibt sich die Induktivität zu $L_{dH/dt} = 200$ nH. Hieraus ergibt sich mit Gleichung (40) die obere Grenzfrequenz zu $f_{g,o,dH/dt} = 40$ MHz. Wie beim dE/dt -Sensor ist eine untere Grenzfrequenz nicht zu beachten.

Der Umrechnungsfaktor $k_{dH/dt}$ zwischen der Messspannung $u_{m,dH/dt}$ und der zeitlichen Änderung des magnetischen Feldes dH/dt bestimmt sich mit folgender Beziehung:

$$k_{dH/dt} = \frac{dH/dt}{u_{m,dH/dt}} \quad (48)$$

Mit Gleichung (37) ergibt sich:

$$u_{m,dH/dt} = r_{dH/dt}^2 \cdot \pi \cdot \mu_0 \frac{dH}{dt} \quad (49)$$

Aus den Gleichungen (48) und (49) ergibt sich der Umrechnungsfaktor zu:

$$k_{dH/dt} = \frac{1}{r_{dH/dt}^2 \cdot \pi \cdot \mu_0} = 24,1 \cdot 10^6 \frac{\text{A}}{\text{Vms}}. \quad (50)$$

Analog zu den übrigen Sensoren wird nun bei einer genaueren Betrachtung die Aufstellung des dH/dt -Sensors auf dem Dach der Messkabine und der Einfluss der Aufbauten berücksichtigt. Die Berechnung erfolgt wiederum mit dem Programm CONCEPT II mit einer Feldanregung durch eine ebene elektromagnetische Welle mit der Amplitude $E = 1 \text{ kV/m}$, was einem Magnetfeld mit der Amplitude $H = 2,6526 \text{ A/m}$ entspricht. Die Berechnungen ergeben, dass die obere Grenzfrequenz aufgrund der Feldverzerrung durch die Dachkonstruktion auf etwa $f_{g,o,dH/dt} = 25 \text{ MHz}$ reduziert ist. Der Umrechnungsfaktor nach Gleichung (50) wurde ebenfalls mit CONCEPT II überprüft. Diese Überprüfung ergab keine nennenswerten Abweichungen.

3.4.5 Weitere Messeinrichtungen an der Feldmesskabine

3.4.5.1 Induzierte Spannung auf einer Freileitung

Zur Auslösung der Messung in der Feldmesskabine wird das Triggersignal vom Fernmeldeturm zur Feldmesskabine über einen Lichtwellenleiter übertragen. Die etwa 250 m lange Strecke zwischen den beiden Messkabinen wird, beginnend vom Untergeschoss des Turmes, zunächst auf einer Strecke von etwa 60 m unterirdisch in einem Kabelschutzrohr zurückgelegt. Daran anschließend wird der Lichtwellenleiter an einem 0,4 kV-Kabelaufführungsmast der öffentlichen Energieversorgung auf die Höhe der Freileitungsseile geführt. Unterhalb der vier üblichen Leiterseile wurde durch den Netzbetreiber Lechwerke AG ein weiteres Leiterseil als Tragseil auf freiem Potential installiert. Der Lichtwellenleiter wurde mit Kabelbindern an diesem Tragseil befestigt und zur Feldmesskabine gezogen. Die mechanische Abspannung des Tragseils an der Messkabine wurde genutzt, um einen Abschlusswiderstand einzubauen. An diesem Abschlusswiderstand wird die im Tragseil induzierte Spannung gemessen.

Entscheidend für die Dimensionierung des Messwiderstandes ist die Größe des Erdungswiderstandes der Messkabine. Wie in Abschnitt 3.4.2 beschrieben, ist die Kabine durch vier an den Kabinenecken befestigte, 150 cm lange Staberder geer-

det. Die experimentelle Bestimmung des Erdungswiderstandes ist aufwendig und zeigt starke örtliche Schwankungen. Theoretische Betrachtungen zeigen jedoch, dass der Erdungswiderstand zu maximal etwa 100Ω angenommen werden kann. Um die Messung möglichst wenig zu verfälschen, sollte der Messwiderstand groß gegenüber dem Erdungswiderstand sein. Dem steht entgegen, dass der Strom über den Messwiderstand im Hinblick auf das Messsignal hinreichend hoch sein soll, was einen kleinen Messwiderstand erfordert. Als Kompromiss ist der Messwiderstand zu $R_{m,ind} = 1000 \Omega$ gewählt.

Um die Größenordnung der zu erwartenden induzierten Spannung abzuschätzen, wurde die Anordnung bestehend aus dem Trageisil, der Erde und der Messkabine mit dem Programm CONCEPT II simuliert. Dazu wurde ein Blitzeinschlag in 200 m Entfernung angenommen. Die Simulation ergab im ungünstigsten Fall eine induzierte Spannung bis etwa 100 kV. Um den Messwiderstand für diese Spannung auszulegen, wurde er aus 37 auf einer Kunststoff-Platte montierten 2 W-Kohlemasse-Widerstände mit je 27Ω aufgebaut. Der gemessene Widerstandswert ergab sich zu 999Ω . Zum Schutz gegen Umwelteinflüsse ist der Widerstand mit einem Schrumpfschlauch umgeben und abgedichtet.

Die Strommessung erfolgt durch einen Strommonitor vom Typ Pearson 410 (technische Daten gemäß Tabelle 6). Dazu wird ein Messdraht vom Messwiderstand durch die Öffnung des Strommonitors geführt und an der Kabinenwand geerdet. Bild 3.17 zeigt ein Foto dieser Anordnung.



Bild 3.17: Messwiderstand und Strommonitor

3.4.5.2 Wetterstation

Zur kontinuierlichen Aufzeichnung des Wettergeschehens in der näheren Umgebung des Fernmeldeturmes wurde am Dach der Feldmesskabine eine Wetterstation vom Typ Davis Vantage Pro installiert. Die aufgezeichneten Messgrößen sind Temperatur, Luftdruck, Luftfeuchte, Niederschlagsmenge sowie Windgeschwindigkeit und -richtung. Die Steuereinheit der Wetterstation liest die Daten der Wettersensoren ein Mal pro Minute aus und überträgt diese zur Speicherung an einen Rechner. Mittels eines dafür vorgesehenen Software-Paketes lassen sich die gewünschten Wetterdaten dann bei einer zeitlichen Abtastung von 1 Minute darstellen.

3.4.5.3 Videoaufzeichnung

Zur Aufzeichnung von Videodaten eines Blitzeinschlags wurde die Feldmesskabine mit einer Aufzeichnungseinrichtung ausgerüstet, welche aus zwei Teilen besteht. Die Außeneinheit stellt ein thermoisoliertes Gehäuse dar, welches eine Hochgeschwindigkeitskamera, eine Standard-Videokamera sowie ein Heiz- und ein Lüftungsmodul enthält.

Bei der Hochgeschwindigkeitskamera handelt es sich um ein Gerät des Typs Olympus i-Speed 2, welches in der Lage ist, bis zu 33000 Bilder pro Sekunde aufzuzeichnen. Bei dieser Bildrate ist allerdings eine Auflösung von lediglich 96 x 72 Bildpunkten erreichbar. Zur Erzielung einer besseren Bildqualität ist die Kamera deshalb auf eine Bildrate von 5000 Bilder pro Sekunde eingestellt, wobei sich eine Auflösung von 320 x 240 Bildpunkten ergibt. Die Kamera läuft im Pretrigger-Betrieb und erhält zum Start der Abspeicherung das allgemeine Triggersignal der Messkabine. Nach dem Abschluss der Aufzeichnung werden die Daten über ein Netzkabel an den Steuerrechner übertragen, welcher sie in eine Videodatei vom Typ „AVI“ konvertiert. Die Hochgeschwindigkeitskamera ist in der Lage, bei einem Blitzeinschlag eine Videoaufzeichnung über eine Dauer von 1,4 s zu erstellen.

Die Daten der Standard-Videokamera werden auf einem Rechner mit Ringspeicher abgelegt, der insgesamt 360 Stunden kontinuierlich aufzeichnet und immer die ältesten Daten löscht. Die Videodaten auf diesem Rechner dienen dem Überblick über die gesamten Videoaufzeichnungen und dem leichteren zeitlichen Auffinden der Hochgeschwindigkeitsmessungen.

3.4.6 Zusammenfassung der Kenndaten der Feldsensoren

Zur besseren Übersicht sind die wichtigsten Kenndaten der Feldsensoren in Tabelle 7 zusammengefasst. Die wichtigsten Kenndaten sind hierbei die Bandbreite mit Angabe der oberen und unteren Grenzfrequenz sowie die Umrechnungsfaktoren zwischen den Messgrößen und der Messspannung.

Sensortyp	$f_{g,u,x}$	$f_{g,o,x}$	k_x
E	0,08 Hz	12 MHz	18800 m^{-1}
dE/dt	1...5 Hz	15 MHz	$1,54 \cdot 10^9 \text{ (ms)}^{-1}$
E_{stat}	0 Hz	5...10 Hz	10000 m^{-1}
H	150 Hz	20 MHz	$48,9 \text{ A} \cdot (\text{Vm})^{-1}$
dH/dt	1...5 Hz	25 MHz	$24,1 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot (\text{Vms})^{-1}$

Tabelle 7: Zusammenfassung der Kenndaten der Feldsensoren

3.4.7 Messwertaufzeichnung in der Feldmesskabine

Analog zur Strommessung in der Messkabine im Turm wird in der Feldmesskabine zur Aufzeichnung der Messsignale ein Industrierechner des Herstellers National Instruments verwendet. Dieser Rechner besteht aus einem Chassis vom Typ PXI-1042 und hat als Einschubkarten einen Controller vom Typ PXI-8106, drei Messwandlerkarten der Typen PXI-5122, PXI-5124 und PXI-5922 sowie eine GPS-Karte vom Typ PXI-6682. Die Übersichtsdarstellung zeigt Bild 3.18.

3.4.7.1 Controller und Messwandlerkarten

Der Controller vom Typ NI-PXI 8106 erfüllt im wesentlichen die gleichen Aufgaben wie der im Fernmeldeturm verwendete Controller vom Typ PXI-8187, verfügt aber aufgrund des späteren Baujahres über einige Unterschiede in Bezug auf die externen Schnittstellen sowie eine größere Festplatte und schnellere Prozessoren.

Die Messwandlerkarten der Typen PXI-5122 und PXI-5124 weisen die gleichen Kenndaten und Einstellungen auf wie die entsprechenden Karten in der Turmmesskabine. Die Zuordnung der Messsignale zu den Eingängen der Karten sowie die Messparameter gibt die Tabelle 8 wieder. Die zeitliche Änderung des elektrischen Feldes (dE/dt) und die zeitliche Änderung des magnetischen Feldes (dH/dt) werden mit den beiden Kanälen der Messwandlerkarte vom Typ PXI-5124 mit 12 Bit-Auflösung und einem Abtastintervall von 5 ns aufgezeichnet. Das elektrische

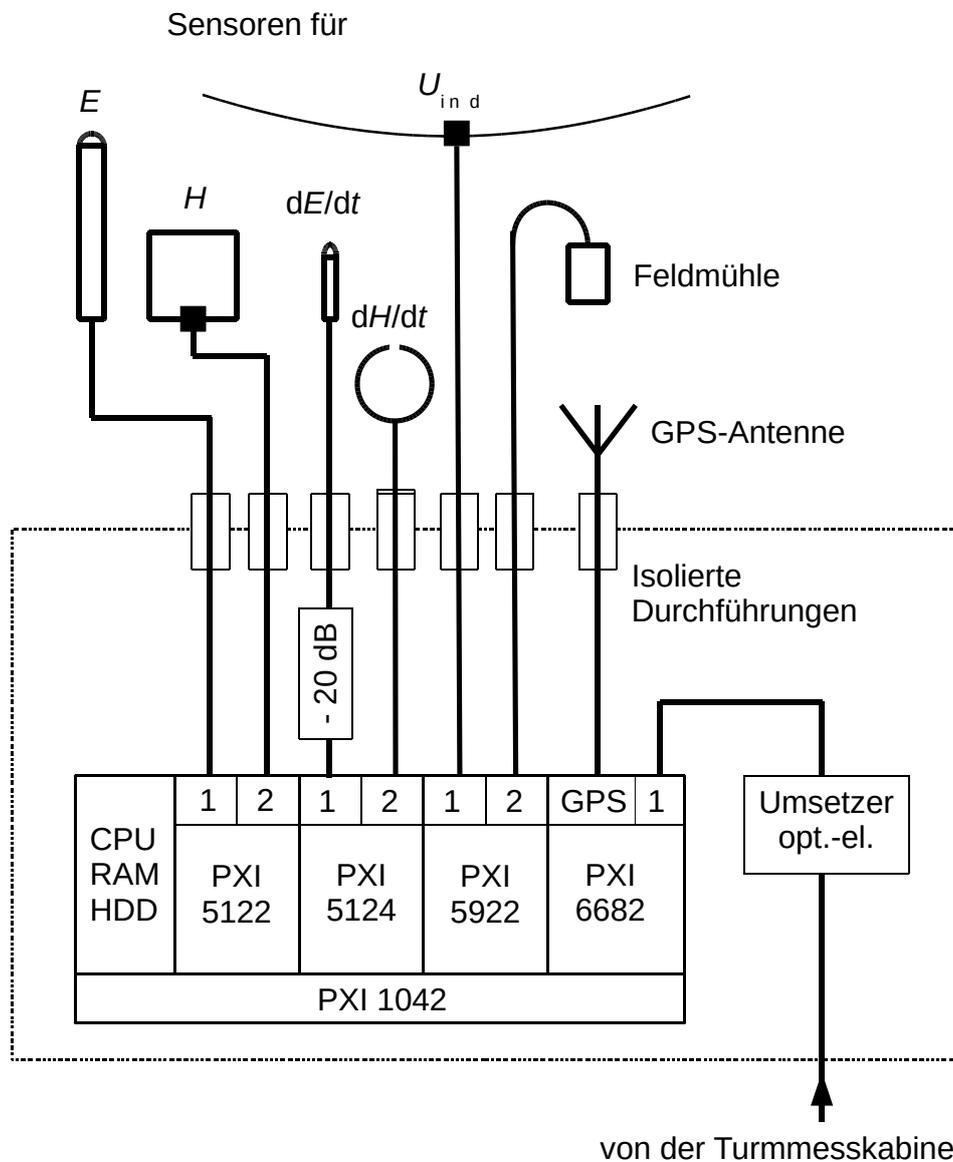


Bild 3.18: Blockschaltbild der Messeinrichtungen in der Feldmesskabine

Feld $E(t)$ und das magnetische Feld $H(t)$ werden mit den beiden Kanälen der Messwandlerkarte vom Typ PXI-5124 mit jeweils 14 Bit-Auflösung und einem Abtastintervall von 10 ns aufgenommen.

Zusätzlich wird eine Messwandlerkarte vom Typ PXI-5922 eingesetzt. Diese Karte weist 2 Kanäle mit jeweils 256 MB Speicher auf. Mit dieser Karte werden die Messsignale der Feldmühle und des Stromes über den Messwiderstand (siehe Bild

3.17) mit 16 Bit Auflösung und mit einer Abtastung von 15 MS/s aufgezeichnet. Damit wird das elektrostatische Feld sowie die an dem Tragseil induzierte Spannung über einen Zeitraum von 6,4 s aufgenommen. Die Parameter dieser Karte sind in Tabelle 9 zusammengefasst.

Typ	PXI-5122		PXI-5124	
Speicher je Kanal	512 MB		512 MB	
Abtastrate	100 MS/s		200 MS/s	
Horiz. Auflösung	10 ns		5 ns	
vertikale Auflösung	14 bit		12 bit	
Speicher je Messwert	2 Byte		2 Byte	
Anzahl Messwerte	256.000.000		256.000.000	
Aufzeichnungsdauer	2,56 s		1,28 s	
	Kanal 1	Kanal 2	Kanal 1	Kanal 2
Messgröße	$E(t)$	$H(t)$	$dE(t)/dt$	$dH(t)/dt$
Dämpfungsfaktor	1 (= 0 dB)	1 (= 0 dB)	10 (= - 20 dB)	1 (= 0 dB)
Umrechnung: 1 V je	$18,8 \frac{\text{kV}}{\text{m}}$	$48,9 \frac{\text{A}}{\text{m}}$	$15,4 \frac{\text{kV}}{\text{m} \cdot \mu\text{s}}$	$25,3 \frac{\text{A}}{\text{m} \cdot \mu\text{s}}$
Messbereich	$\pm 150 \frac{\text{kV}}{\text{m}}$	$\pm 100 \frac{\text{A}}{\text{m}}$	$\pm 100 \frac{\text{kV}}{\text{m} \cdot \mu\text{s}}$	$\pm 200 \frac{\text{A}}{\text{m} \cdot \mu\text{s}}$
Auflösung (gerundet)	$18 \frac{\text{V}}{\text{m}}$	$12 \frac{\text{mA}}{\text{m}}$	$49 \frac{\text{V}}{\text{m} \cdot \mu\text{s}}$	$98 \frac{\text{mA}}{\text{m} \cdot \mu\text{s}}$

Tabelle 8: Daten der Messwandlerkarten PXI-5122 und PXI-5124 in der Feld-Messkabine

3.4.7.2 Triggerung und Messsoftware

Die Triggerung der Messeinrichtung in der Feldmesskabine erfolgt durch einen externen Triggerimpuls aus der Turm-Messkabine. Analog zur Messeinrichtung im Fernmeldeturm zeichnen die Messwandlerkarten in der Feldmesskabine im Pretrigger-Betrieb kontinuierlich Messwerte auf und beginnen bei erfolgter Triggerung mit der Abspeicherung der Daten. Die Pretrigger-Zeit beträgt wiederum 0,5 s.

Die Messsoftware und die Programme sind mit denen im Turm identisch. Beim Start des Programms ist lediglich der abweichende Standort des Rechners einzu-

geben, woraufhin der Rechner auf externe Triggerung, die Konfiguration der zusätzlichen Messwandlerkarte PXI-5922 sowie die abweichenden Messparameter (Messgröße, Einheit, Skalierung gemäß Tabellen 8 und 9) konfiguriert wird. Zur einfacheren Auswertung werden die Messwerte der „schnellen“ Messwandlerkarten vom Typ PXI-5122 und PXI-5124 sowie die der „langsamen“ Karte vom Typ PXI-5922 in zwei getrennten Dateien abgespeichert.

Typ	PXI-5922	
Speicher je Kanal	256 MB	
Abtastrate	10 MS/s	
Horiz. Auflösung	100 ns	
Vertikale Auflösung	16 bit	
Speicher je Messwert	4 Byte	
Anzahl Messwerte	64.000.000	
Aufzeichnungsdauer	6,4 s	
	Kanal 1	Kanal 2
Messgröße	$E_{\text{stat}}(t)$	$u_{\text{ind}}(t)$
Dämpfungsfaktor	1 (= 0 dB)	1 (= 0 dB)
Umrechnung: 1 V je	$10 \frac{\text{kV}}{\text{m}}$	10 kV
Messbereich	$\pm 50 \frac{\text{kV}}{\text{m}}$	$\pm 50 \text{ kV}$
Auflösung (gerundet)	$6 \frac{\text{V}}{\text{m}}$	6 V

Tabelle 9: Daten der Messwandlerkarte PXI-5922 in der Feld-Messkabine

4 Auswertung der Messergebnisse

4.1 Statistische Grundlagen

4.1.1 Logarithmische Normalverteilung

Entgegen der weit verbreiteten Annahme liegt vielen Zufallsgrößen in der Natur nicht die Normalverteilung zugrunde. Insbesondere für Größen, bei denen Wachstumsvorgänge eine entscheidende Rolle spielen, liegt meist die logarithmische Normalverteilung vor. Der Grund hierfür ist die Tatsache, dass das Produkt von unabhängigen Zufallsvariablen gegen eine logarithmische Normalverteilung strebt. In diesem Abschnitt werden daher die wichtigsten Eigenschaften der in der Blitzforschung meist verwendeten dekadisch-logarithmischen Normalverteilung (im folgenden als Log-Normalverteilung bezeichnet) kurz zusammengefasst.

Eine stetige Zufallsvariable X wird als log-normalverteilt bezeichnet, wenn sie die Dichtefunktion

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \cdot \exp\left(-\frac{(\lg(x) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (51)$$

besitzt. Dies ist genau dann der Fall, wenn $Y = \lg(X)$ eine normalverteilte Zufallsgröße ist. Die Verteilungsfunktion der logarithmischen Normalverteilung ergibt sich durch Integration zu

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^x \frac{1}{t} \cdot \exp\left(-\frac{(\lg(t) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) dt \quad (52)$$

und lässt sich nicht geschlossen angeben.

Wie für jede Wahrscheinlichkeitsverteilung sind Erwartungswert $E(X)$ und Standardabweichung $\sqrt{\text{Var}(X)}$ wichtige Kenngrößen. Sie berechnen sich in diesem Fall zu

$$E(X) = 10^{\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right)} \quad (53)$$

und

$$\sqrt{\text{Var}(X)} = \sqrt{10^{2\mu + \sigma^2} \cdot (10^{\sigma^2} - 1)} \quad (54)$$

wobei μ und σ die Parameter der beiden zusammenhängenden Verteilungen X und Y sind und insbesondere für die Verteilung Y Erwartungswert und Standardabweichung darstellen.

Die Maximum-Likelihood-Schätzwerte für die Parameter μ und σ in Abhängigkeit der Messwerte x_i sind gegeben durch:

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg(x_i) \quad (55)$$

und

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\lg(x_i) - \mu)^2 \quad (56)$$

Durch Transformation dieser Werte in die Verteilung $X = 10^Y$ berechnet man die Kennwerte

$$\bar{x}_{\log} = 10^\mu = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n x_i} \quad (57)$$

und

$$s_{\log} = 10^\sigma = 10^{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\lg(x_i) - \lg(\bar{x}_{\log}))^2}{n-1}}} \quad (58)$$

\bar{x}_{\log} ist dabei der geometrische Mittelwert der Messwerte x_i . Außerdem ist \bar{x}_{\log} der Median, also das 50%-Quantil, der Zufallsgröße X . Da die log-normalverteilte Zufallsgröße X nicht symmetrisch verteilt ist, ergibt sich zwangsläufig, dass Medi-

an und Erwartungswert nicht übereinstimmen, wie auch der Vergleich der Gleichungen (53) und (57) zeigt.

4.1.2 Korrelation

Für zwei integrierbare Zufallsvariablen X und Y lässt sich der Pearsonsche Korrelationskoeffizient $\text{Kor}(X, Y)$ angeben zu

$$\text{Kor}(X, Y) = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sigma(X) \sigma(Y)} \quad (59)$$

wobei $\text{Cov}(X, Y)$ die Kovarianz der Zufallsgrößen bezeichnet und über die Beziehung

$$\text{Cov}(X, Y) = E((X - E(X))(Y - E(Y))) \quad (60)$$

berechnet wird. Sind in Bezug auf die Zufallsgrößen nur Messwertpaare (x_i, y_i) vorhanden, so lässt sich der empirische Korrelationskoeffizient $\text{Kor}_e(x, y)$ berechnen gemäß

$$\text{Kor}_e(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (61)$$

Das Quadrat des (empirischen) Korrelationskoeffizienten wird als Bestimmtheitsmaß B bezeichnet.

4.2 Messungen des Blitzstroms

Da im Gegensatz zu früheren Messungen ([17], [54]) keine Trennung der aufgezeichneten Daten hinsichtlich der zeitlichen Auflösung und der Aufzeichnungsdauer mehr besteht, ist es nun möglich, jeden zeitlichen Abschnitt der gesamten Blitzenladung über eine Dauer von 2,56 s mit derselben zeitlichen Auflösung zu analysieren. Da aber bezüglich der betrachteten Parameter grundlegende Unterschiede zwischen den Langzeitströmen und den Stoßströmen bestehen, werden diese im folgenden getrennt ausgewertet. Im Zeitraum November 2008 bis Dezember 2012 wurden durch die Messeinrichtung insgesamt 53 Aufzeichnungen

durchgeführt, welche in Anlehnung an frühere Messungen mit „B300“ bis „B352“ bezeichnet sind. Da die Feldmesskabine erst im November 2009 in Betrieb genommen werden konnte und später vereinzelt Probleme durch zu geringe Speicherkapazität auftraten, beinhaltet nicht jede Messung den vollständigen Datensatz.

4.2.1 Auswertung der Langzeitströme

4.2.1.1 Parameter der Langzeitströme

Ein Blitzstrom besitzt neben den im folgenden Abschnitt beschriebenen Stoßstromkomponenten meist auch eine oder mehrere Langzeitstromkomponenten, denen die Stoßströme überlagert sein können. Einen typischen Blitzstromverlauf zeigt Bild 4.1. Der Blitzstrom beginnt, wie für Aufwärtsblitze charakteristisch, mit einem Langzeitstrom, dem im vorliegenden Fall ein einzelner Stoßstrom überlagert ist.

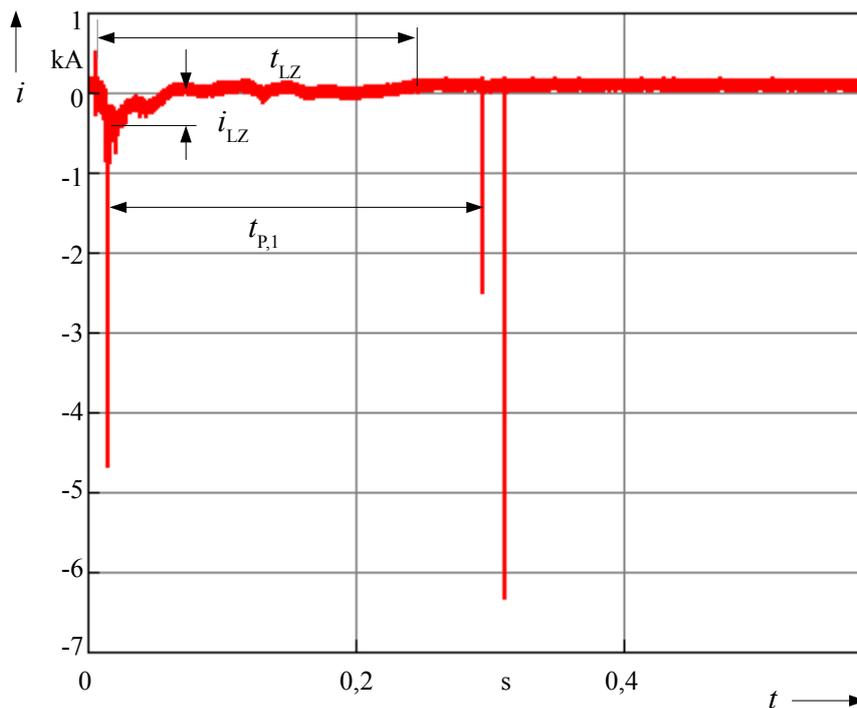


Bild 4.1: Ausschnitt aus dem Stromverlauf des Blitzeinschlags B343 mit Auswerteparametern

Wichtige Parameter des Langzeitstroms sind sein Maximalwert i_{LZ} , seine zeitliche Dauer t_{LZ} sowie die während des Stromflusses transportierte Ladung Q_{LZ} . Da die Ladung eines Langzeitstroms groß ist gegenüber der Ladung eines Stoßstroms,

werden die Ladungen von überlagerten Stoßströmen in den folgenden Auswertungen nicht von der Ladung des jeweiligen Langzeitstroms abgezogen.

Bezüglich des gesamten Blitzstroms einer Messung sind wichtige Parameter die Dauer des Blitzstroms t_i , das Vorhandensein bzw. die Anzahl n_{st} von Stoßströmen, die Verteilung der Art der Stoßströme gemäß Abschnitt 4.2.2.1 sowie die Pausendauer t_p zwischen den Stoßströmen.

Bei 33 Messungen konnten 35 Langzeitströme aufgezeichnet werden, wobei diese bis auf einen positiven Langzeitstrom von negativer Polarität waren. Bei zwei Messungen wurden jeweils zwei Langzeitströme erfasst. Dabei handelt es sich bei einer Messung um einen bipolaren Stromverlauf mit einem positiven und einem negativen Langzeitstrom und zum anderen um einen negativen Aufwärtsblitz, der von einem Langzeitstrom eingeleitet wird und von einem weiteren Langzeitstrom gefolgt wird. Die gesamten Messwerte der Langzeitströme sind in Tabelle A1.1 im Anhang aufgelistet.

Aufgrund der geringen Anzahl der positiven Stromkomponenten bzw. der bipolaren Blitzstromverläufe ist eine Einbeziehung in die statistische Auswertung nicht angebracht. Die entsprechenden Werte werden daher im jeweiligen Abschnitt der Vollständigkeit halber aufgeführt und den Werten der negativen Ströme gegenübergestellt.

4.2.1.2 Dauer der Langzeitströme

Das Histogramm in Bild 4.2 zeigt die statistische Verteilung der Dauer der Langzeitströme. Der positive Langzeitstrom B303-1 wurde hierbei aufgrund seiner Polarität und seiner sonstigen abweichenden Parameter nicht berücksichtigt. Er weist eine Dauer von lediglich 9,5 ms auf und kann daher als untypischer Langzeitstrom betrachtet werden.

Die durchschnittliche Dauer der Langzeitströme beträgt 284,4 ms im arithmetischen Mittel bzw. 232,9 ms im geometrischen Mittel. Die empirische Standardabweichung beträgt 156,9 ms.

Die Verteilung der Dauer der Langzeitströme ist im wesentlichen konzentriert auf den Bereich zwischen 100 ms und 400 ms, wobei die kürzeste Dauer eines Langzeitstromes zu 19 ms und die längste Dauer zu 672 ms gemessen wurde.

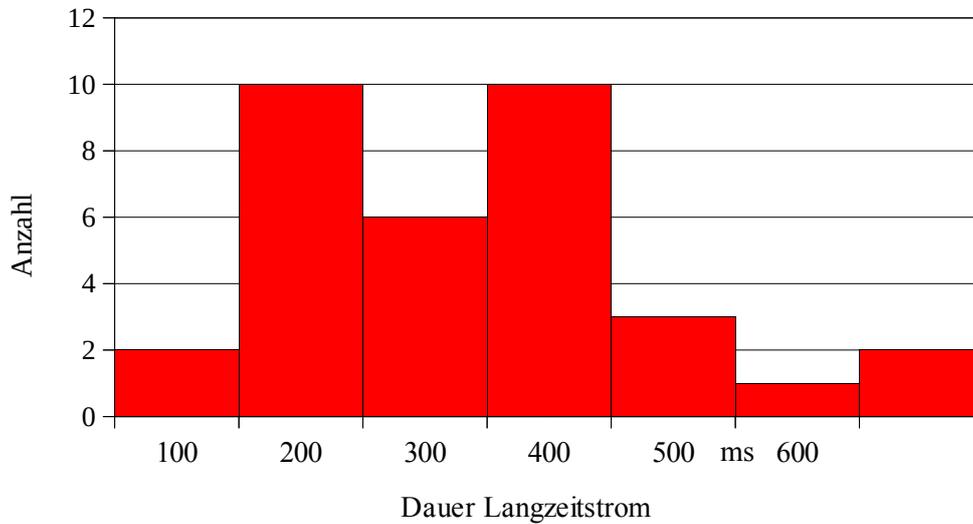


Bild 4.2: Histogramm für die Dauer der Langzeitströme

4.2.1.3 Ladung der Langzeitströme

Bild 4.3 zeigt die statistische Verteilung der durch die Langzeitströme transportierten Ladungen. Da die Ladungen von den Langzeitströmen überlagerten Stoßströmen klein sind gegenüber den Ladungen der Langzeitströme selbst, wurden die Ladungen der Langzeitströme nicht um die Ladungen der Stoßströme korrigiert. Der dabei entstehende Fehler liegt in allen betrachteten Fällen unter 0,1%.

Da es sich – bis auf den wie schon im vorigen Abschnitt nicht berücksichtigten Langzeitstrom B303-1 – durchweg um negative Blitzströme handelt, ist das Vorzeichen der transportierten Ladung nach Konvention negativ. Zur einfacheren Darstellung und Auswertung sind alle Ladungen im folgenden positiv dargestellt und somit als Beträge der tatsächlichen Ladung zu sehen.

Der arithmetische Mittelwert der Ladungen der Langzeitströme beträgt 56,4 C, der geometrische Mittelwert 30,9 C. Aufgrund der relativ großen Streubreite zwischen Langzeitströmen mit hohem Ladungstransport und solchen mit geringem Ladungstransport beträgt die Standardabweichung 54,4 C.

Der positive Langzeitstrom B303-1 besitzt aufgrund seiner sehr kurzen Dauer von nur 9,5 ms nur eine Ladung von 3 C.

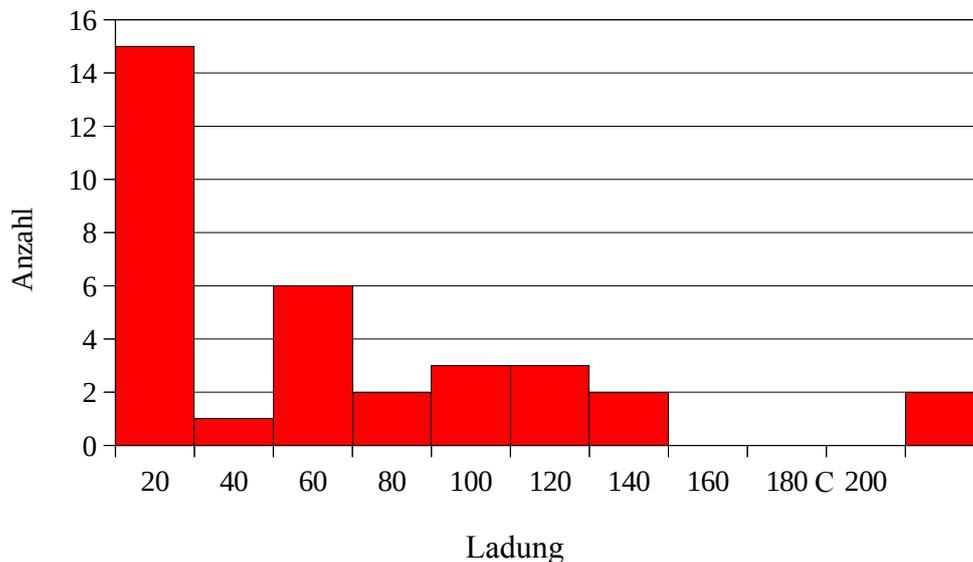


Bild 4.3: Histogramm für die Ladung der Langzeitströme

4.2.1.4 Maximalwert des Langzeitstroms

In Bild 4.4 ist die statistische Verteilung der Maximalwerte der Langzeitströme abgebildet. Wie im vorigen Abschnitt beschrieben, handelt es sich um negative Werte, wobei zur Auswertung nur die Beträge berücksichtigt werden. Insgesamt sind nur Langzeitströme berücksichtigt, deren Maximalwert 50 A übersteigt.

Der arithmetische Mittelwert der Maximalwerte der Langzeitströme beträgt 466,5 A, der geometrische Mittelwert 360,2 A. Ähnlich wie bei den Ladungen weisen auch die Maximalwerte der Langzeitströme eine starke Streuung auf, was in einer relativ großen Standardabweichung von 326,8 A resultiert.

Festzuhalten ist, dass die beiden Langzeitströme mit den höchsten Maximalwerten nicht identisch sind mit jenen, welche die größte transportierte Ladung aufweisen.

Der Maximalwert des positiven Langzeitstroms B303-1 beträgt 981 A.

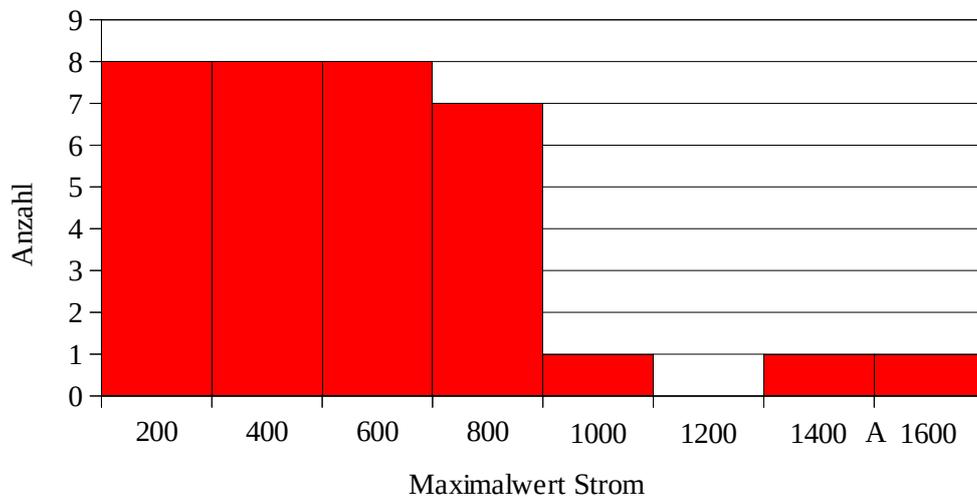


Bild 4.4: Histogramm für die Maximalwerte der Langzeitströme

4.2.2 Auswertung der Stoßströme

4.2.2.1 Parameter der Stoßströme

Gemäß Abschnitt 2.2.4 lassen sich bei einem Blitzereignis drei Typen von Stoßströmen unterscheiden:

- Typ IS: Die dem einleitenden Langzeitstrom eines Aufwärtsblitzes überlagerten Stoßströme werden als IS-Impulse (*initial stage*) oder auch als ICC-Impulse (*initial continuous current*) bezeichnet.
- Typ RS: Der Stoßstrom einer Hauptentladung (*return stroke*) schließt sich bei Aufwärtsblitzen an den einleitenden Langzeitstrom an, bei Abwärtsblitzen stellt der *return stroke* die erste Komponente des Blitzstroms dar.
- Typ M: Stoßströme, die einem auf eine Hauptentladung folgenden Langzeitstrom überlagert sind, werden als M-Komponenten bezeichnet.

Zur Vereinfachung der Auswertung wurde ein für alle drei Typen anpassbarer „Musterstoßstrom“ verwendet, welcher gemäß Bild 4.5 durch folgende Parameter beschrieben werden kann.

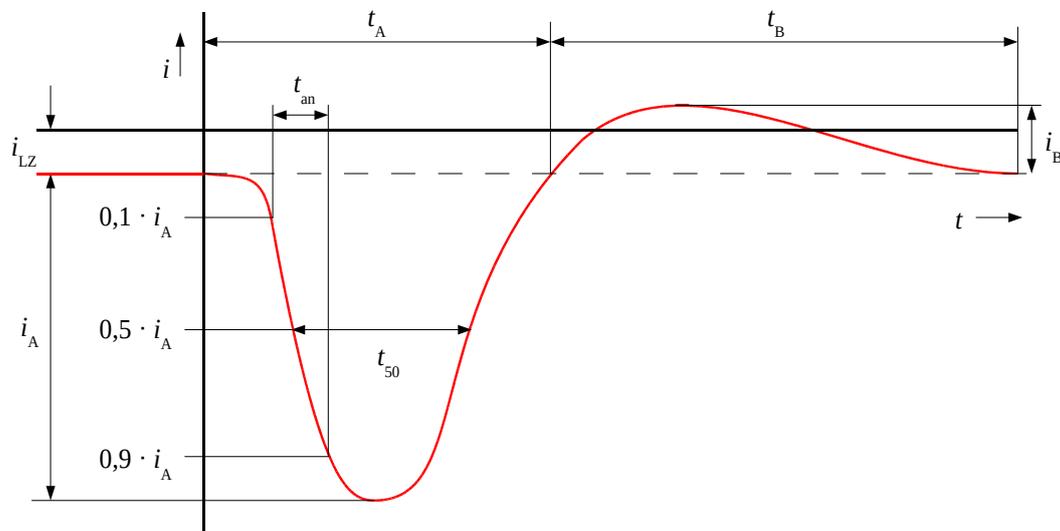


Bild 4.5: Musterstoßstrom mit Auswerteparametern

Der Stoßstrom ist in zwei Abschnitte A und B mit den Zeitdauern t_A und t_B unterteilt, wobei die Unterteilung dort stattfindet, wo der Stromverlauf wieder den Wert i_{LZ} seines Ausgangspunktes annimmt. In Fällen, in denen der Strom seinen Startwert nicht wieder überschreitet, ergibt sich somit, dass der Abschnitt B nicht vorhanden ist. Die Strombetragsmaxima der beiden Abschnitte werden mit i_A und i_B bezeichnet und auf den je nach Typ des Stoßstroms vorhandenen Langzeitstrom i_{LZ} bezogen. Die Anstiegszeit t_{an} wird durch die Zeitdifferenz zwischen dem 10%-Wert und dem 90%-Wert des Stromes i_A definiert, während sich aus dem 50%-Wert von i_A die Halbwertsbreite t_{50} des Stromimpulses ergibt. Die Ladungen Q_A und Q_B geben jeweils nur die durch den Stoßstrom transportierte Ladung an, d.h. die während des Zeitraums $t_A + t_B$ durch den Langzeitstrom transportierte Ladung wird hier nicht berücksichtigt.

Schwingungen im Stirnbereich der Stoßströme werden erst im Abschnitt 4.3 betrachtet. Da diese Schwingungen durch die bauliche Struktur des Turmes verursacht werden und an dieser Stelle nur die Parameter des Blitzstromes betrachtet werden, sind die dem folgenden Abschnitt zugrundeliegenden Messsignale durch Filterung mit einem digitalen Tiefpass mit einer Grenzfrequenz von 250 kHz bearbeitet. Dadurch werden die Schwingungen herausgefiltert, während die sonstigen Blitzstromparameter unverändert bleiben.

Insgesamt konnten bei 20 einzelnen Messungen 175 Stoßströme registriert werden. Dabei wurden nur Stoßströme berücksichtigt, welche einen Maximalwert i_A von mehr als 250 A aufweisen.

Eine Zusammenstellung der wichtigsten Parameter der aufgezeichneten Stoßströme befindet sich als Abschnitt A1.2 im Anhang.

4.2.2.2 Verteilung von Art und Anzahl der Stoßströme

Von den 175 Stoßströmen sind drei positive Stoßströme dem Typ M, 37 Stoßströme dem Typ RS und die übrigen 135 Stoßströme dem Typ IS zuzuordnen. Von fünf positiven Stromverläufen abgesehen, weist die Mehrzahl der Stoßströme ausschließlich negative Polarität auf.

Bild 4.6 stellt die Verteilung der Stoßströme nach Typ und Polarität der Stoßströme grafisch dar.

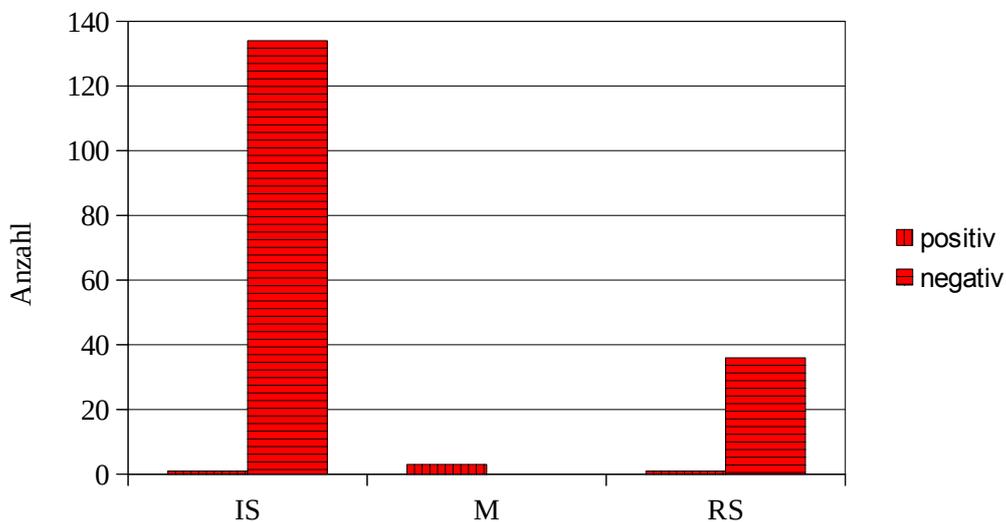


Bild 4.6: Verteilung von Typ und Polarität der Stoßströme

Stoßströme vom Typ IS treten nicht bei allen Aufwärtsblitzen auf. Falls einem Langzeitstrom derartige Stoßstromkomponenten überlagert sind, treten sie in der Regel gehäuft auf; die maximale Anzahl von Stoßströmen des Typs IS in einem Blitzstromverlauf beträgt 40.

Die Stoßströme des Typs RS treten in der Regel nur wenige Male in einer Blitzstromaufzeichnung auf; es konnte lediglich ein Blitzstrom aufgezeichnet werden, in welchem 14 Stoßströme vom Typ RS auftraten. Bei den gemessenen Stoßströmen des Typs RS-n handelt es sich bis auf den Blitzstrom B331 ausschließlich um Aufwärtsblitze.

Die zahlenmäßig kleinste Gruppe stellen die drei Stoßströme vom Typ M dar, diese traten nur in einer einzigen Blitzstrommessung auf.

Die Stoßströme werden in den nachfolgenden Auswertungen anhand einer Abkürzung, die ihren Typ und ihre Polarität angibt, bezeichnet. Negative Stoßströme erhalten beispielsweise die Bezeichnung „IS-n“. Eine vollständige statistische Auswertung ist aufgrund des Stichprobenumfangs nur für die Typen IS-n und RS-n sinnvoll. Die jeweils entsprechenden Werte der anderen Stoßstromtypen werden anschließend der Vollständigkeit halber aufgeführt.

4.2.2.3 Stärke des Langzeitstroms bei Einsatz des Stoßstroms

Die Auswertung der Stromstärke des Langzeitstroms zum Startzeitpunkt eines Stoßstroms ist nur für die Stoßströme des Typs IS sinnvoll, da Stoßströme des Typs RS definitionsgemäß keinem Langzeitstrom überlagert sind.

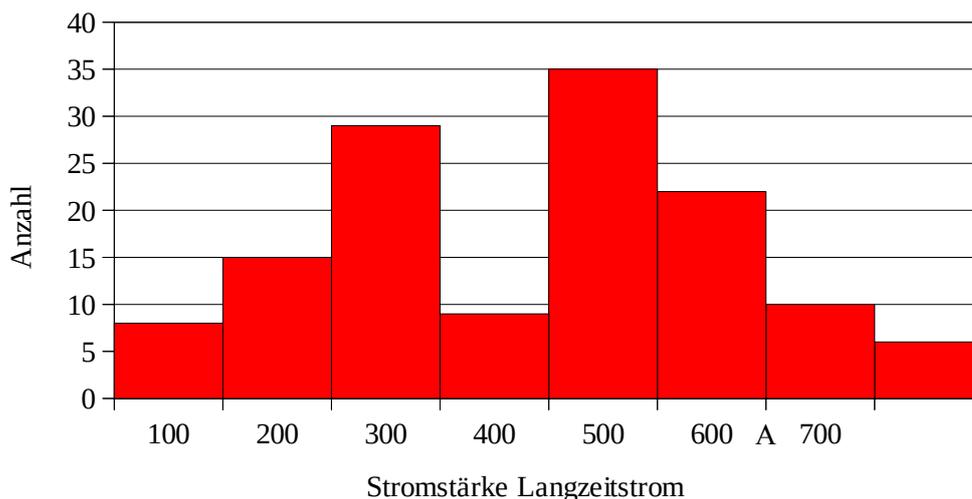


Bild 4.7: Histogramm der Stromstärken des Langzeitstroms beim Einsatz des Stoßstroms

Die Verteilung der Stromstärken des Langzeitstroms zum Startzeitpunkt eines Stoßstroms stellt das Histogramm in Bild 4.7 dar. Deutlich ist zu erkennen, dass eine Gruppe mit niedrigeren und eine Gruppe mit höheren Langzeitströmen existiert. Dies liegt darin begründet, dass kurz aufeinander folgende Stoßströme in einer Blitzstrommessung ähnliche Werte für den zugrundeliegenden Langzeitstrom aufweisen und somit scheinbare „Gruppen“ bilden. Das arithmetische Mittel der Stromstärken beträgt 387 A, das geometrische Mittel 329 A; die empirische Standardabweichung beträgt 185 A. Der größte Wert des Langzeitstroms beim Einsatz eines Stoßstroms wurde mit 758 A gemessen.

4.2.2.4 Maximalwerte der Stoßströme im Abschnitt A

Stoßströme vom Typ IS

Das Histogramm in Bild 4.8 zeigt die Verteilung der Maximalwerte der 117 Stoßströme vom Typ IS-n im Abschnitt A. Analog zum Vorgehen bei der Auswertung der Langzeitströme werden auch hier nur die Beträge der Ströme dargestellt.

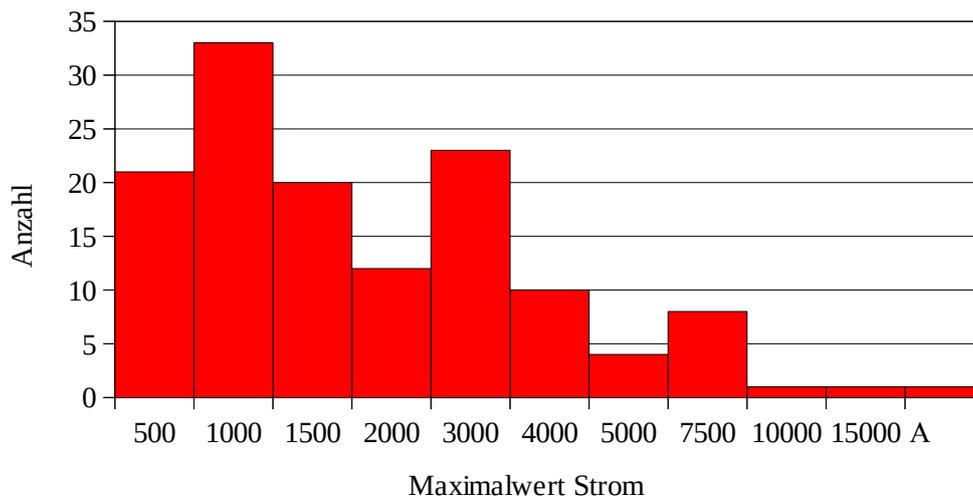


Bild 4.8: Histogramm der Strommaxima im Abschnitt A der Stoßströme vom Typ IS-n

Das arithmetische Mittel der Strommaxima der Stoßströme vom Typ IS-n im Abschnitt A beträgt 2,02 kA, der geometrische Mittelwert liegt bei 1,34 kA. Die empirische Standardabweichung beträgt 2,20 kA. Die Verteilung zeigt eine deutliche Häufung der Stromstärken im Bereich bis 1,5 kA. Das größte gemessene Strommaximum beträgt 15,8 kA.

Der einzige Stoßstrom vom Typ IS-p hat im Abschnitt A ein Maximum von 561 A.

Stoßströme vom Typ RS

Die Stoßströme vom Typ RS weisen durch ihren Charakter als Hauptentladung durchweg höhere Stromstärken als die anderen Stoßstromtypen auf. Die Verteilung der Strommaximalwerte im Abschnitt A zeigt das Histogramm in Bild 4.9.

Der arithmetische Mittelwert der Strommaxima beträgt 10,65 kA, der geometrische Mittelwert beträgt 8,07 kA, die Standardabweichung liegt bei 8,59 kA. Es

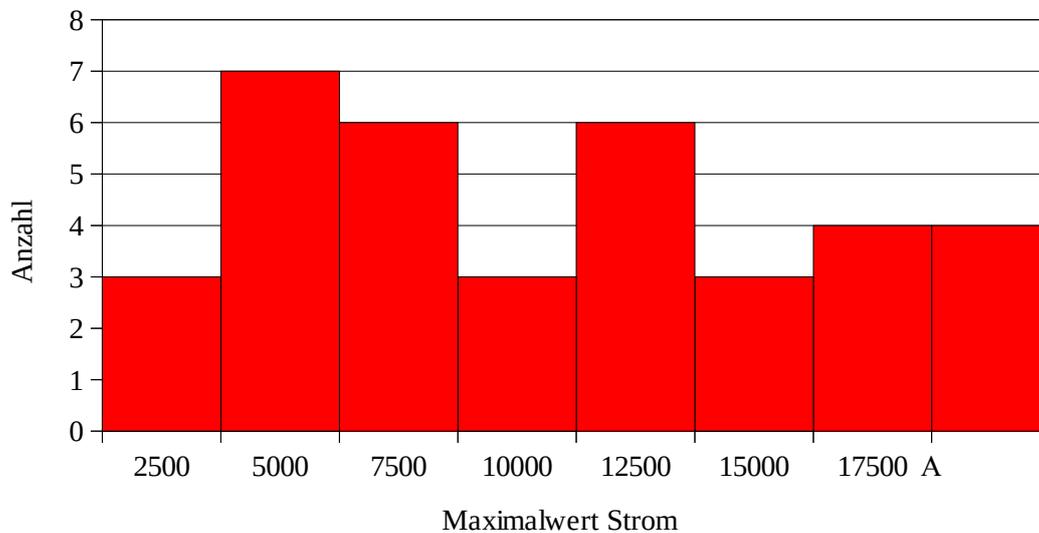


Bild 4.9: Histogramm der Strommaxima im Abschnitt A der Stoßströme vom Typ RS-n

zeigt sich eine relativ gleichmäßige Verteilung der Strommaxima; der stärkste gemessene Stoßstrom weist ein Strommaximum von 40,8 kA auf. Aufgrund der relativ geringen Anzahl an Stoßströmen dieses Typs ist aus diesen Messwerten keine Tendenz zu einer statistischen Verteilung erkennbar.

Vom Typ RS-p konnte lediglich ein Stoßstrom mit einem Maximum von 875 A aufgezeichnet werden. Die Einordnung in diese Kategorie erfolgte aufgrund der während des Stoßstromverlaufs nicht vorhandenen Langzeitstromkomponente und soll im Zuge der Auswertung des zugehörigen elektrischen Feldes nochmals überprüft werden.

4.2.2.5 Anstiegszeit der Stoßströme

Stoßströme vom Typ IS-n

Entsprechend der Darstellung in Bild 4.5 wird die Anstiegszeit eines Stoßstromes definiert als die Zeitdifferenz t_{an} zwischen dem 10%-Wert und dem 90%-Wert des Strommaximums i_A . Das Histogramm in Bild 4.10 zeigt die Verteilung der Anstiegszeiten der Stoßströme vom Typ IS-n. Deutlich sind zwei Häufungen erkennbar und zwar zum einen im Bereich zwischen 2 μ s und 5 μ s und zum anderen im Bereich zwischen 20 μ s und 50 μ s. Aufgrund dieser Tatsache ist es sinnvoll, die Stoßströme des Typs IS-n in eine Gruppe „schneller“ Impulse mit einer Anstiegs-

zeit von weniger als $10 \mu\text{s}$ und eine Gruppe „langsamer“ Impulse mit einer Anstiegszeit von mehr als $10 \mu\text{s}$ einzuteilen. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit früheren Messungen am Hohen Peißenberg [15] und an anderen Standorten [34].

Der arithmetische Mittelwert der Anstiegszeiten beträgt $24,76 \mu\text{s}$, der geometrische Mittelwert beträgt $10,69 \mu\text{s}$. Aufgrund der starken Streuung der Anstiegszeiten ist die Standardabweichung relativ hoch; sie beträgt $30,55 \mu\text{s}$. Die maximale gemessene Anstiegszeit beträgt $157 \mu\text{s}$.

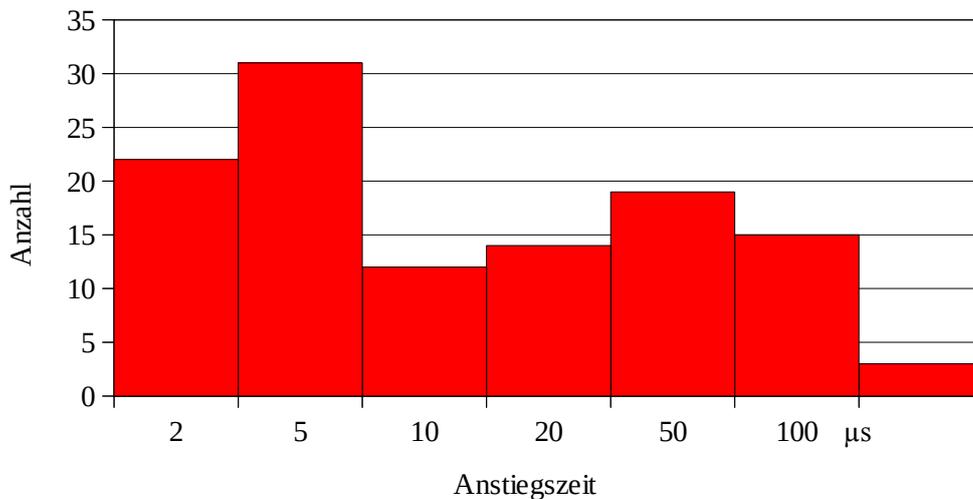


Bild 4.10: Histogramm der Anstiegszeiten der Stoßströme vom Typ IS-n

Das Vorhandensein der zwei Häufungsbereiche legt eine Abhängigkeit der Anstiegszeit von anderen Größen nahe. Insbesondere zum Strommaximum scheint eine Abhängigkeit gegeben, derart, dass bei größerem Strommaximum eine geringe Anstiegszeit zu beobachten ist. Zur Feststellung einer eventuell bestehenden derartigen Abhängigkeit, ist es sinnvoll, den Kehrwert des Strommaximums gegen die Anstiegszeit in einem Streudiagramm aufzutragen. Dieses Streudiagramm ist in Bild 4.11 dargestellt.

Anhand des Streudiagramms lässt sich bereits ablesen, dass die gegenseitige Abhängigkeit zwischen dem Strommaximum und der Anstiegszeit nicht sehr stark ausgeprägt ist. Die statistische Behandlung des Zusammenhangs erfolgt durch Berechnung des Bestimmtheitsmaßes, welches sich zu dem sehr geringen Wert $B(t_{\text{an}}, i_{\text{max}}) = 0,31$ ergibt.

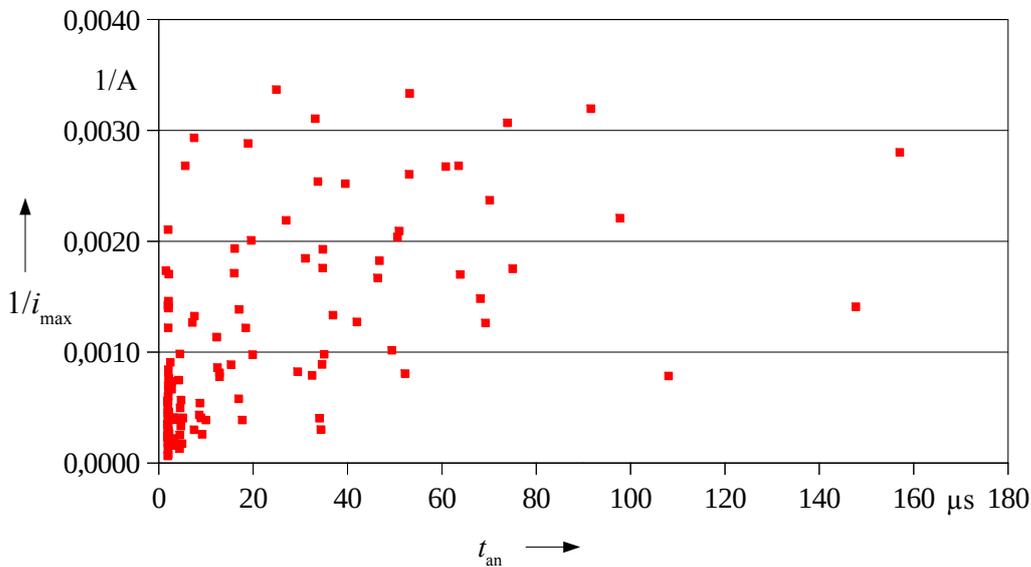


Bild 4.11: Streudiagramm für den Kehrwert des Strommaximums gegen die Anstiegszeit

Stoßströme vom Typ RS-n

Die Stoßströme vom Typ RS-n weisen im arithmetischen Mittel eine Anstiegszeit von $4,92 \mu\text{s}$ auf; der geometrische Mittelwert beträgt $2,88 \mu\text{s}$. Die Standardabweichung der Anstiegszeit der Stoßströme beträgt $6,91 \mu\text{s}$. Die statistische Verteilung der Anstiegszeiten zeigt das Histogramm in Bild 4.12.

Der Großteil der Stoßströme des Typs RS-n weist Anstiegszeiten zwischen $1 \mu\text{s}$ und $2 \mu\text{s}$ auf. Diese Werte liegen somit im gleichen Bereich wie jene der „schnellen“ Impulse des Typs IS-n. Dies legt einen ähnlichen Entladungsmechanismus bei diesen beiden Typen nahe. Die größte gemessene Anstiegszeit beträgt $31 \mu\text{s}$, wobei nur insgesamt drei Stoßströme Anstiegszeiten größer als $20 \mu\text{s}$ haben.

Stoßströme der anderen Typen

Für die Stoßströme der Typen RS-p und M wurden Anstiegszeiten zwischen $20 \mu\text{s}$ und $80 \mu\text{s}$ gemessen. Diese Werte haben damit die gleiche Größenordnung wie jene der „langsamen“ Stoßströme des Typs IS-n.

Davon abweichend beträgt die Anstiegszeit des einzigen gemessenen Stoßstroms vom Typ IS-p $323 \mu\text{s}$.

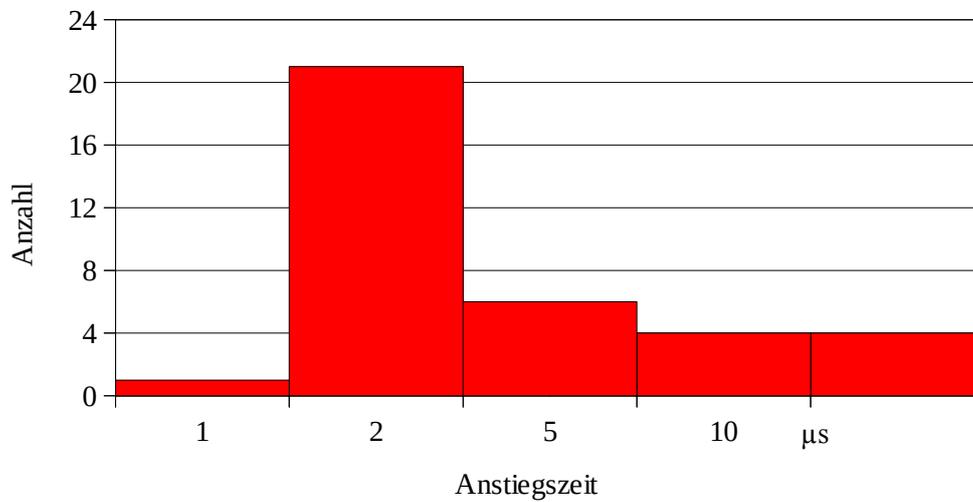


Bild 4.12: Histogramm der Anstiegszeiten der Stoßströme vom Typ RS-n

4.2.2.6 Steilheit der Stoßströme

Für die Steilheit der Stoßströme lassen sich grundsätzlich zwei Werte unterscheiden:

- Die maximale Stromsteilheit S_{\max} gibt den größten Wert an, den die zeitliche Änderung des Stromes im Anstiegsbereich annimmt. Dieser Wert ergibt sich am einfachsten aus der Messung der zeitlichen Änderung des Blitzstromes di/dt .
- Die mittlere Stromsteilheit S_{10-90} im Zeitbereich zwischen dem 10%- und dem 90%-Wert wird aus den $i(t)$ -Messungen gemäß folgender Gleichung entsprechend Bild 4.5 errechnet und für die nachfolgenden Auswertungen verwendet:

$$S_{10-90} = \frac{0,8 \cdot i_{\max}}{t_{\text{an}}} \quad (62)$$

Stoßströme vom Typ IS-n

Für die Stoßströme des Typs IS-n gibt das Histogramm in Bild 4.13 die statistische Verteilung wieder.

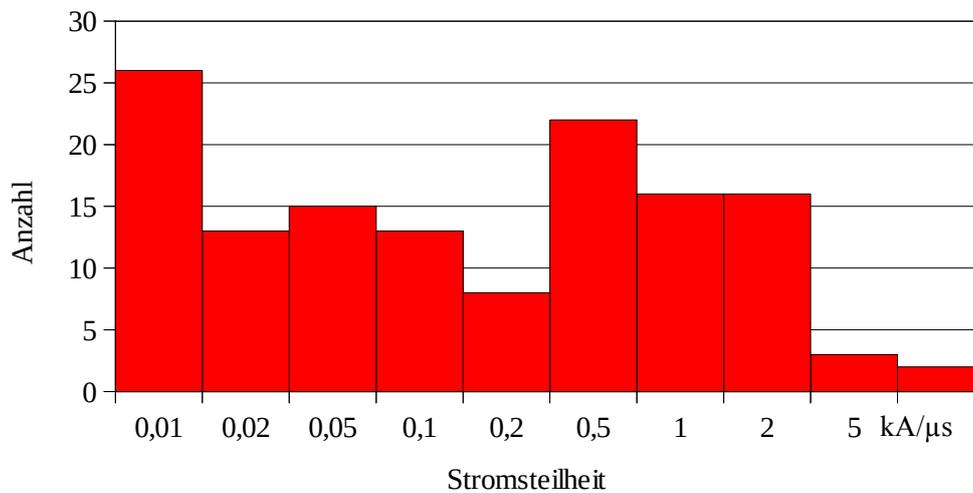


Bild 4.13: Histogramm der Stromsteilheit der Stoßströme vom Typ IS-n

Der arithmetische Mittelwert der Steilheit der Stoßströme vom Typ IS-n beträgt $0,486 \text{ kA}/\mu\text{s}$, der geometrische Mittelwert $0,099 \text{ kA}/\mu\text{s}$ und die Standardabweichung $0,898 \text{ kA}/\mu\text{s}$. Aufgrund der eher geringen Stromstärken der Ströme dieses Typs sowie der relativ großen Anstiegszeiten ergeben sich in der Mehrzahl sehr geringe Stromsteilheiten von teils unter $0,01 \text{ kA}/\mu\text{s}$. Die größte Stromsteilheit für Ströme des Typs IS-n wurde zu $6,7 \text{ kA}/\mu\text{s}$ gemessen.

Stoßströme vom Typ RS-n

Für die Stoßströme des Typs RS-n sind durch ihre geringeren Anstiegszeiten und die gleichzeitig höheren Strommaxima wesentlich höhere Stromsteilheiten zu erwarten. Die statistische Verteilung zeigt das Histogramm in Bild 4.14.

Es zeigt sich eine um etwa eine Größenordnung höhere Stromsteilheit gegenüber jener der Stoßströme vom Typ IS-n. Der arithmetische Mittelwert der Stromsteilheit beträgt $4,18 \text{ kA}/\mu\text{s}$, der geometrische Mittelwert $1,94 \text{ kA}/\mu\text{s}$ und die Standardabweichung $4,06 \text{ kA}/\mu\text{s}$.

4.2.2.7 Halbwertsbreite der Stoßströme

Stoßströme vom Typ IS-n

Die Halbwertsbreite eines Stoßstromes ist gemäß Bild 4.5 definiert als die Differenz zwischen den Zeitpunkten, zu denen der Strom den halben Maximalwert an-

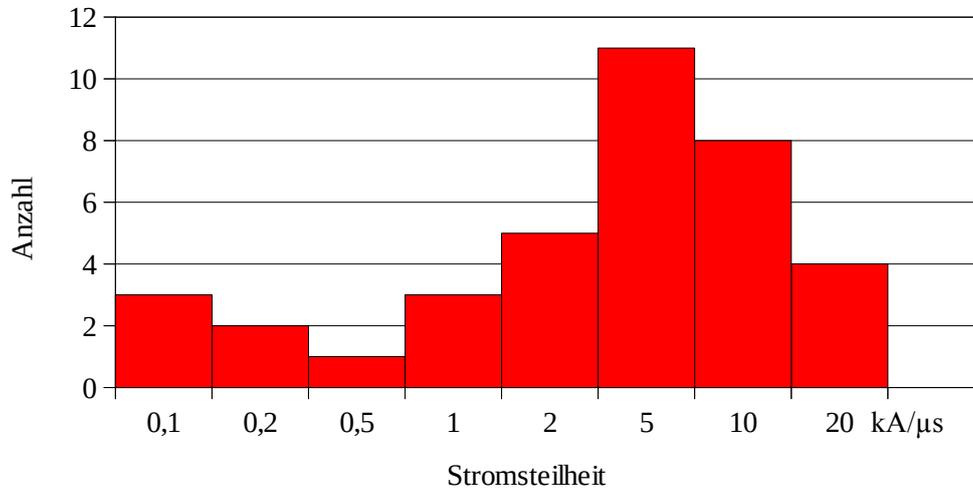


Bild 4.14: Histogramm der Stromsteilheit der Stoßströme vom Typ RS-n

nimmt. Der arithmetische Mittelwert der Halbwertsbreite beträgt $70,6 \mu\text{s}$, der geometrische Mittelwert beträgt $50,3 \mu\text{s}$, die Standardabweichung liegt bei $58,9 \mu\text{s}$. Die statistische Verteilung der Halbwertsbreiten zeigt das Histogramm in Bild 4.15.

Die Halbwertsbreite weist eine Streubreite von zwei Größenordnungen zwischen der zu $5,1 \mu\text{s}$ gemessenen kleinsten Halbwertsbreite und der zu $294,4 \mu\text{s}$ gemessenen größten Halbwertsbreite auf.

Die beiden, den zeitlichen Verlauf eines Stoßstromes charakterisierenden Parameter, die Anstiegszeit und die Halbwertsbreite, stehen verständlicherweise in einem gewissen Abhängigkeitsverhältnis. Es ist zu erwarten, dass ein Stoßstrom mit einer steilen Flanke und damit einer kurzen Anstiegszeit tendenziell eine kleinere Halbwertsbreite aufweist als ein langsam ansteigender Stoßstrom. Das Streudiagramm in Bild 4.16 zeigt einen grundsätzlich vorhandenen, aber nicht besonders stark ausgeprägten Zusammenhang zwischen den beiden Größen, was sich im Wert des Bestimmtheitsmaßes $B(t_{\text{an}}, t_{50}) = 0,51$ ausdrückt. Der Grund hierfür ist leicht aus dem Streudiagramm abzulesen: Für Ströme, deren Anstiegszeiten etwa $50 \mu\text{s}$ nicht überschreiten und entsprechend der Verteilung in Bild 4.10 die Mehrheit bilden, ist die Halbwertsbreite unabhängig von der Anstiegszeit annähernd konstant. Das bedeutet, dass bei Stoßströmen mit geringerer Anstiegszeit die Abfallzeit diese wesentlich übersteigt, während eine längere Anstiegszeit mit einer Abfallzeit in ähnlicher Größe einhergeht.

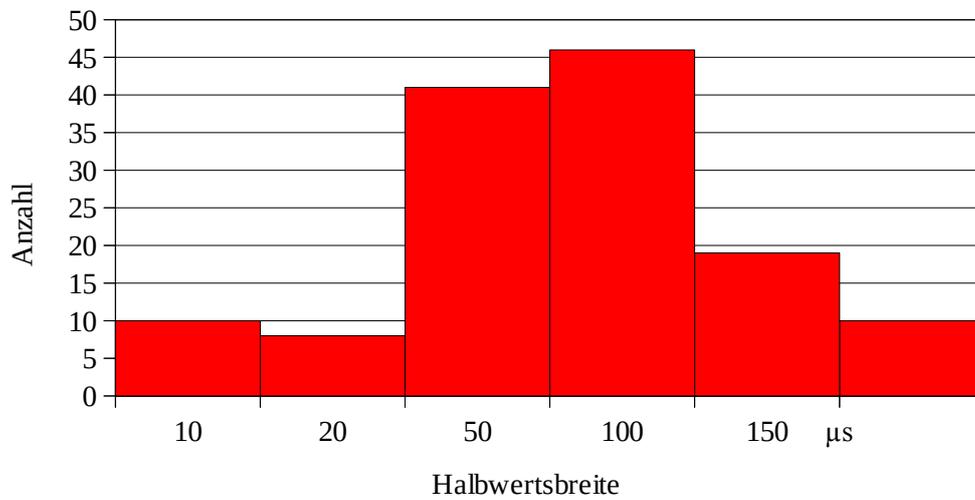


Bild 4.15: Histogramm der Halbwertsbreiten der Stoßströme vom Typ IS-n

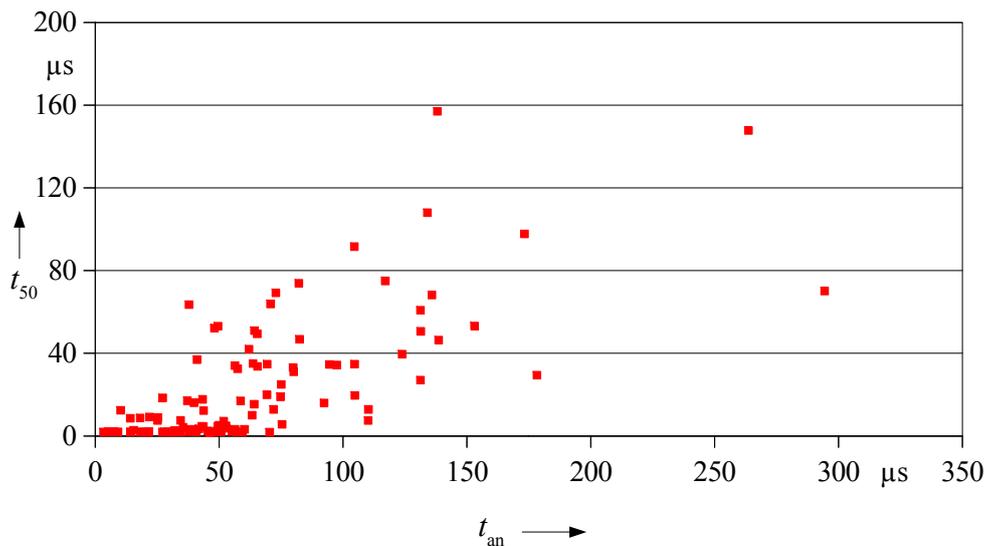


Bild 4.16: Streudiagramm für die Halbwertsbreite gegen die Anstiegszeit

Stoßströme vom Typ RS-n

Im Unterschied zu den Stoßströmen vom Typ IS-n weisen die Stoßströme vom Typ RS-n geringere Halbwertsbreiten auf. Der arithmetische Mittelwert dieser Halbwertsbreiten beträgt $36,8 \mu\text{s}$, der geometrische Mittelwert beträgt $27,8 \mu\text{s}$. Die Verteilung der Halbwertsbreiten weist eine Standardabweichung von $37,6 \mu\text{s}$

auf. Die grafische Darstellung zeigt das Histogramm in Bild 4.17. Wiederum ist zu beobachten, dass die Werte für die Halbwertsbreite der Stoßströme des Typs RS-n von derselben Größenordnung sind wie jene der „schnellen“ Impulse des Typs IS-n.

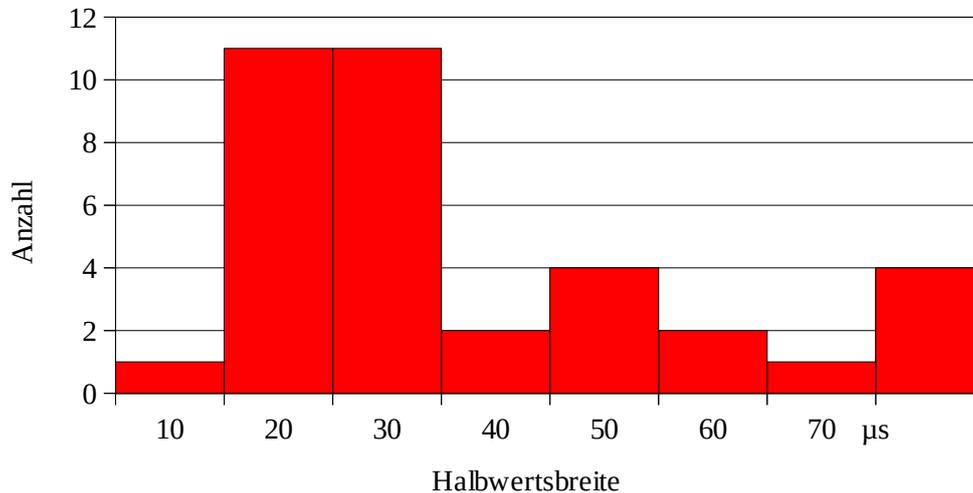


Bild 4.17: Histogramm der Halbwertsbreiten der Stoßströme vom Typ RS-n

Stoßströme der anderen Typen

Die Stoßströme vom Typ M weisen Anstiegszeiten zwischen 196 µs und 354 µs auf und liegen damit deutlich über den Werten der Anstiegszeit der anderen Stoßstromtypen. Die positiven Stoßströme der Typen IS-p und RS-p weisen mit 545,6 µs bzw. 254,7 µs ebenfalls relativ große Halbwertsbreiten auf.

4.2.2.8 Dauer des Abschnitts A der Stoßströme

Als Dauer des Abschnitts A wird gemäß Bild 4.5 die Differenz zwischen dem Zeitpunkt des ersten merklichen Stromflusses und dem Zeitpunkt des Wiedererreichens des Ausgangswertes definiert. Für Stoßströme, die keinen Abschnitt B besitzen, d.h. bei denen (für negative Ströme) kein größerer Wert als der Ausgangswert auftritt, ist die Dauer des Abschnitts A gleich der Dauer des gesamten Stoßstromes.

Stoßströme vom Typ IS-n

Im arithmetischen Mittel beträgt die Dauer des Abschnitts A bei Stoßströmen vom Typ IS-n 283,4 µs, der geometrische Mittelwert beträgt 184,2 µs und die Verteilung weist eine Standardabweichung von 413,5 µs auf. Für die Stoßströme des

Typs IS-n ist die statistische Verteilung der Zeitdauern als Histogramm in Bild 4.18 dargestellt. Neben einer Häufung im Bereich zwischen 50 μs und 150 μs zeigt sich, dass eine Gruppe von 15 Stoßströmen eine Dauer des Abschnitts A von mehr als 550 μs aufweist.

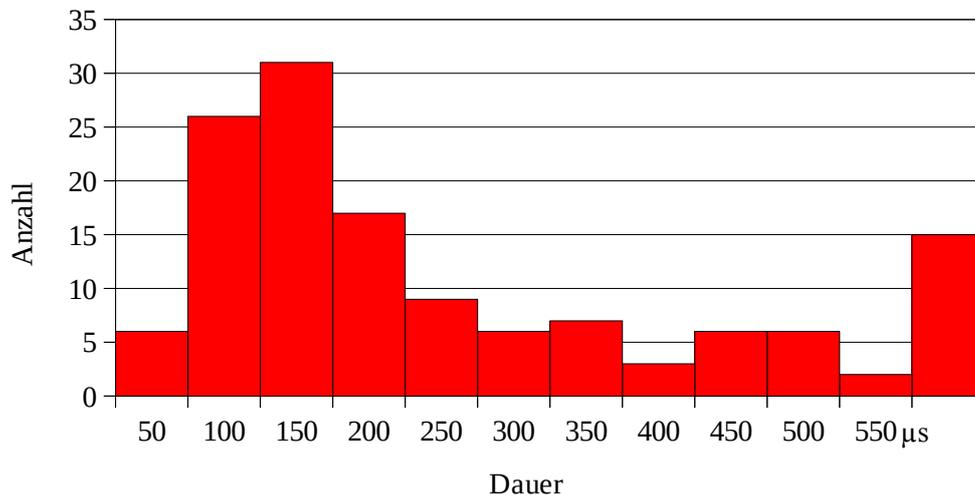


Bild 4.18: Histogramm der zeitlichen Dauer des Abschnitts A der Stoßströme vom Typ IS-n

Stoßströme vom Typ RS-n

Bei den 36 Stoßströmen des Typs RS-n ist zu unterscheiden zwischen Stoßströmen, die Teil eines Aufwärtsblitzes sind, sowie Stoßströmen als einziger Bestandteil eines Abwärtsblitzes. Dies äußert sich auch in den unterschiedlichen Werten für die zeitliche Dauer des Abschnitts A, welcher bei fast allen gemessenen Stoßströmen des Typs RS-n der Dauer des gesamten Stoßstromes entspricht.

Bild 4.19 zeigt das Histogramm der statistischen Verteilung der Zeitdauer des Abschnitts A für die Stoßströme des Typs RS-n. Der arithmetische Mittelwert beträgt 1304 μs , der geometrische Mittelwert 502 μs und die Standardabweichung 3263 μs . Bei den vier „Ausreißerwerten“ in Bild 4.19 mit einer zeitlichen Dauer von mehr als 1 ms handelt es sich um Abwärtsblitze, wobei diese eine maximale Dauer von 15,6 ms aufweisen.

Stoßströme der anderen Typen

Die Stoßströme der anderen Typen weisen gegenüber den oben aufgeführten Typen tendenziell eine größere zeitliche Dauer auf. Während für die positiven Stoßströme der Typen IS-p und RS-p Zeiten zwischen 900 μs und 1500 μs gemessen

wurden, ist für Stoßströme des Typs M keine allgemeingültige Aussage möglich, da sich Zeiten zwischen etwa 1 ms und maximal 22 ms feststellen ließen.

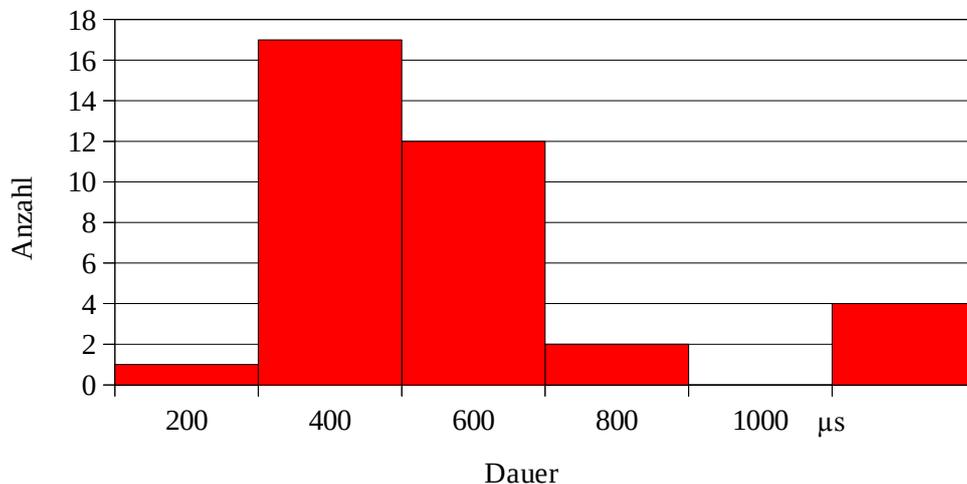


Bild 4.19: Histogramm der zeitlichen Dauer des Abschnitts A der Stoßströme vom Typ RS-n

4.2.2.9 Ladung der Stoßströme im Abschnitt A

Die Auswertung der Ladung der Stoßströme erfolgte entsprechend dem Vorgehen bei den Langzeitströmen, d.h. die gemäß Konvention negativen Ladungen bei den Stoßstromtypen IS-n und RS-n werden durch ihre Beträge ersetzt.

Stoßströme vom Typ IS-n

Da es sich bei den Stoßströmen vom Typ IS-n nur um eher stromschwache Entladungen handelt, sind auch die dabei transportierten Ladungen relativ gering. Der arithmetische Mittelwert der Ladungen beträgt 0,13 C, der geometrische Mittelwert 0,08 C und die Standardabweichung 0,15 C. Die statistische Verteilung ist durch das Histogramm in Bild 4.20 dargestellt.

Stoßströme vom Typ RS-n

Die Stoßströme vom Typ RS-n stellen die Hauptentladung des Blitzes dar und weisen dementsprechend gegenüber den Strömen des Typs IS-n wesentlich höhere Stromstärken und höhere Ladungen auf. Der arithmetische Mittelwert der Ladun-

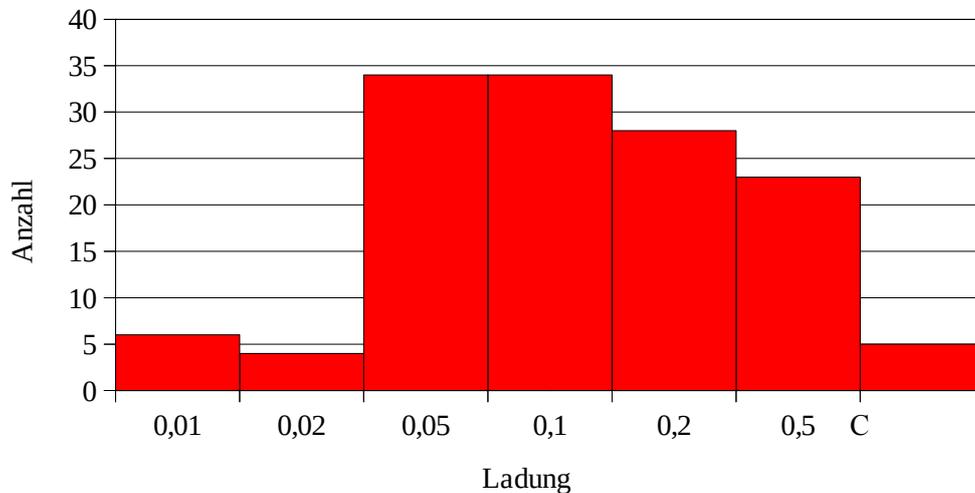


Bild 4.20: Histogramm der Ladung im Abschnitt A der Stoßströme vom Typ IS-n

gen beträgt 1,41 C, der geometrische Mittelwert 0,56 C und die Standardabweichung 2,73 C. Im Vergleich mit den Werten der Stoßströme vom Typ IS-n sind die Ladungen der Stoßströme vom Typ RS-n somit etwa eine Größenordnung höher. Das Histogramm der statistischen Verteilung der Messwerte zeigt Bild 4.21. Zu beobachten ist eine Zweiteilung in eine Gruppe von Stoßströmen mit tendenziell geringeren Ladungen bis etwa 1 C und eine Gruppe von Stoßströmen mit höheren Ladungsmengen von deutlich über 1 C, wobei die größte gemessene Ladung 11,1 C beträgt.

Das Streudiagramm in Bild 4.22 zeigt, dass sich die Stoßströme des Typs RS-n bezüglich ihrer Ladungsverhältnisse in drei Gruppen einteilen lassen.

Die Mehrheit der Ströme weist eine Stromstärke von weniger als 20 kA und Ladungen bis etwa 2 C auf. Die Anordnung der Messwerte im Streudiagramm zeigt einen annähernd linearen Zusammenhang zwischen Stromstärke und Ladung.

Eine zweite, kleinere Gruppe von Strömen mit einer Stromstärke von etwa 15 kA weist, verglichen mit Strömen der ersten Gruppe mit vergleichbarer Stromstärke, wesentlich höhere Ladungsmengen auf. Die um bis zu zehnmal größere Ladung ist bedingt durch die deutlich längere Dauer dieser Ströme, welche gemäß Abschnitt 4.2.2.8 Werte bis zu 15 ms erreicht.

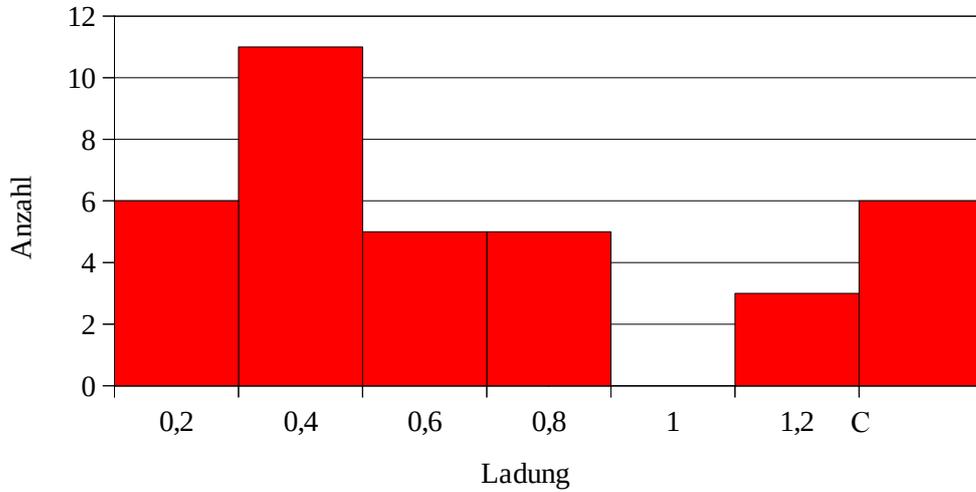


Bild 4.21: Histogramm der Ladung im Abschnitt A der Stoßströme vom Typ RS-n

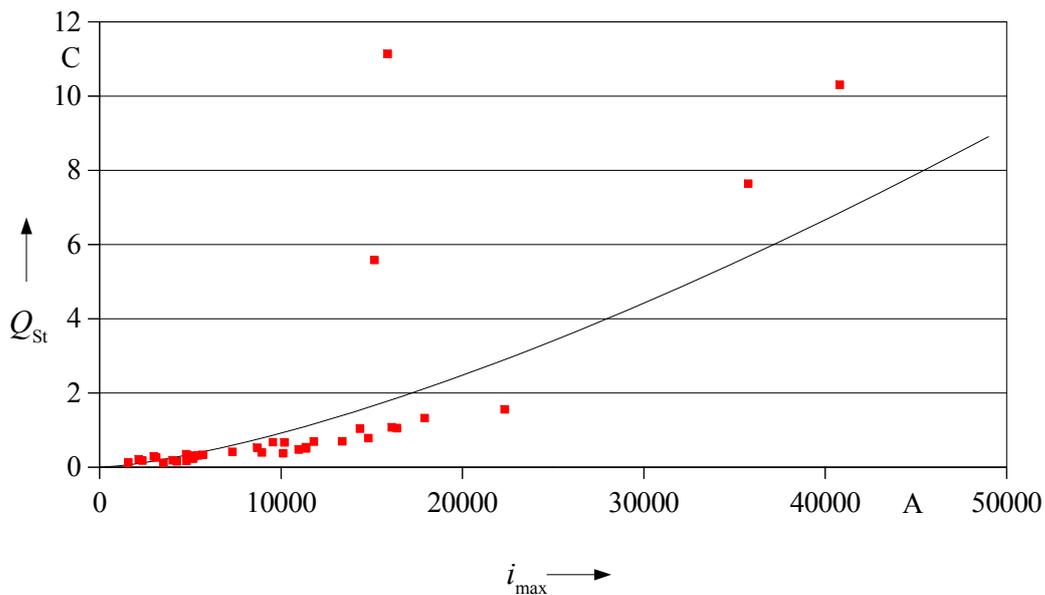


Bild 4.22: Streudiagramm des Strommaximums gegen die Ladung der Stoßströme des Typs RS-n und eingetragene „Normkurve“

Die dritte Gruppe von Stoßströmen zeigt sowohl hohe Strommaxima als auch große Ladungsmengen auf. Aufgrund der Tatsache, dass Ströme mit größeren Strommaxima insgesamt seltener auftreten, ist diese Gruppe ebenfalls relativ klein.

Für den Zusammenhang zwischen Strommaximum und Ladung wird nach VDE [12] folgende Gleichung angegeben:

$$i_{\max} = 10,6 \text{ kA} \cdot (Q/1 \text{ C})^{0,7} \quad (63)$$

Dieser Zusammenhang ist in Bild 4.22 als schwarze Kurve neben den Messwerten eingetragen. Die grafische Darstellung zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen den Messwerten und der „Normkurve“, insbesondere für kleine Werte von Strom und Ladung. Die Ströme der zweiten Gruppe mit hoher Ladung und geringeren Strommaxima fallen aus der Reihe, während die dritte Gruppe mit hohen Strommaxima und Ladungen eine ausreichend gute Übereinstimmung mit der in der Norm angegebenen Kurve zeigt. Für die bestehenden Abweichungen sind im wesentlichen zwei Gründe anzusehen: Zum einen gilt Gleichung (63) streng nur für Erstblitze, während in Bild 4.22 sowohl Erst- als auch Folgeblitze des Typs RS-n aufgeführt sind. Zum anderen stellen statistische Auswertungen von Blitzmessungen an anderen Standorten die Grundlage des in Gleichung (63) angegebenen Zusammenhangs dar, sodass sich durch die vorliegenden Messungen die Veranlassung zu Änderungen an der Gleichung (63) ergeben könnten.

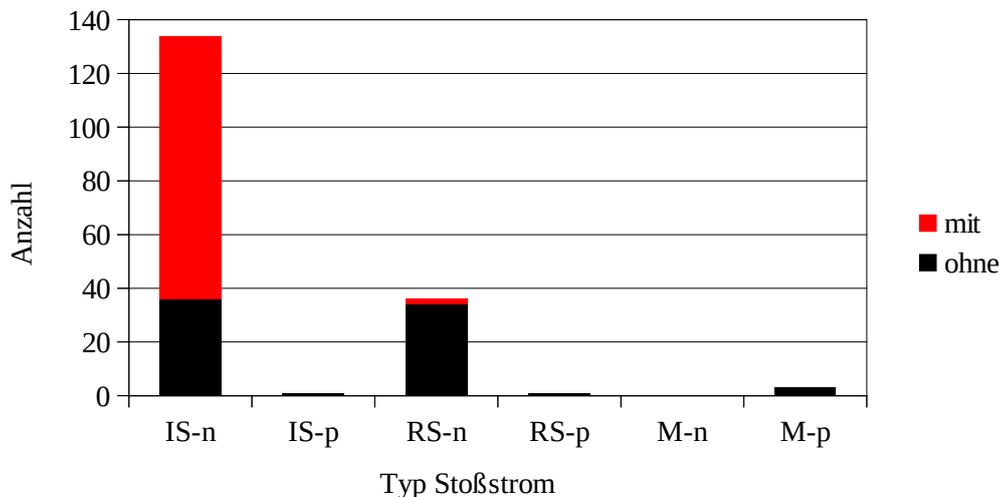


Bild 4.23: Statistische Verteilung des Vorhandenseins eines Abschnitts B

4.2.2.10 Vorhandensein des Abschnitts B der Stoßströme

Nicht bei allen gemessenen Stoßströmen tritt ein „Überschwingen“ des Stromes nach dem Ende des eigentlichen, den Typ bestimmenden Impulses gemäß Bild 4.5 auf. Fällt der Strom ohne einen derartigen Abschnitt entgegengesetzter Polarität auf seinen Anfangswert, so wird der Abschnitt B als nicht vorhanden gewertet.

Das Diagramm in Bild 4.23 zeigt die statistische Verteilung des Vorkommens des Abschnitts B. Von den 134 Stoßströmen des Typs IS-n weisen 98 einen Abschnitt B auf, dies entspricht einem Anteil von 73,1%. Dagegen ist nur bei zwei der 34 Stoßströme des Typs RS-n ein Abschnitt B vorhanden; der Anteil beträgt demnach 5,8%. Bei den positiven Stoßströmen der verbleibenden Typen ist durchweg kein, in diesen Fällen negativer, Abschnitt B vorhanden.

4.2.2.11 Maximalwert der Stoßströme im Abschnitt B

Stoßströme vom Typ IS-n

Wie in Abschnitt 4.2.2.10 ausgeführt, sind im Wesentlichen nur bei den Stoßströmen des Typs IS-n Stromverläufe im Abschnitt B zu beobachten. Diese Maximalwerte der Stoßströme im Abschnitt B weisen im arithmetischen Mittel einen Wert von lediglich 292 A auf. Der geometrische Mittelwert beträgt 229 A, die Standardabweichung 253 A. Die statistische Verteilung der gemessenen Maximalwerte zeigt das Histogramm in Bild 4.24.

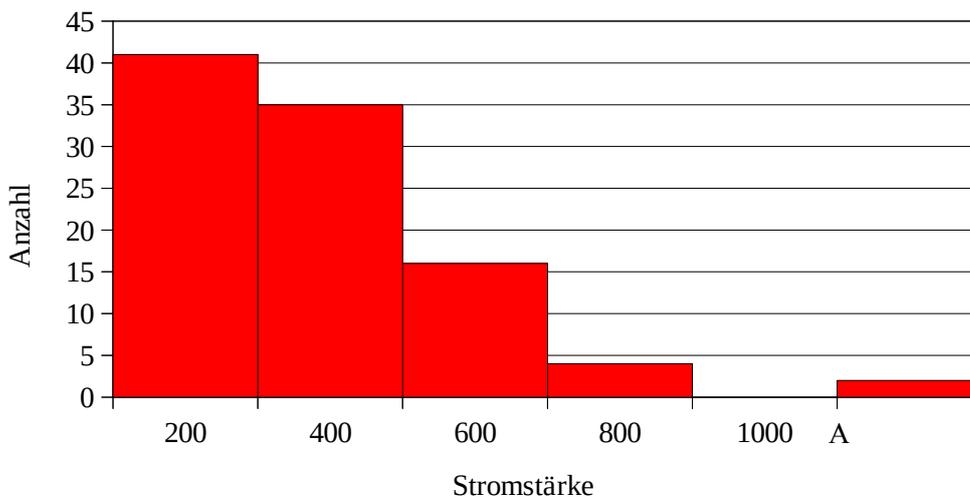


Bild 4.24: Histogramm der Strom-Maximalwerte im Abschnitt B

Die Mehrheit der Stoßströme weist im Abschnitt B Strommaxima von weniger als 400 A auf. Lediglich in zwei Fällen wurden Strommaxima von mehr als 1 kA gemessen; der größte Wert beträgt dabei 1,9 kA.

Stoßströme vom Typ RS-n

Die beiden Stoßströme des Typs RS-n, welche einen Abschnitt B aufweisen, zeigen Maximalwerte von 80 A bzw. 240 A und liegen damit in der gleichen Größenordnung wie jene des Typs IS-n.

Stoßströme der anderen Typen

Die Stoßströme der anderen Typen weisen durchweg keinen Abschnitt B auf. Dies ist im Zusammenhang damit zu sehen, dass der Abschnitt B, welcher eine zu Abschnitt A entgegengesetzte Polarität hat, auch Ausdruck der Schwingungen im Anstiegsbereich des jeweiligen Stoßstromes ist. Die Untersuchung dieser Schwingungen ist Gegenstand des Kapitels 4.3.

4.2.2.12 Ladung der Stoßströme im Abschnitt B

Aufgrund der Tatsache, dass der Abschnitt B eines Stoßstromes als „Gegenschwingung“ der eigentlichen Entladung im Abschnitt A betrachtet werden kann, sind die hierbei transportierten Ladungsmengen vergleichsweise gering. Bei dieser Auswertung sind die Ladungen im Abschnitt B der Konvention des Abschnitts A folgend durchgehend positiv. Wie in Kapitel 4.2.2.10 ausgeführt, ist ein Abschnitt B fast ausschließlich bei Stoßströmen des Typs IS-n vorhanden. In der folgenden Auswertung bleiben somit die Stoßströme der anderen Typen unberücksichtigt. Auch bei den Stoßströmen des Typs IS-n werden selbstverständlich nur die 98

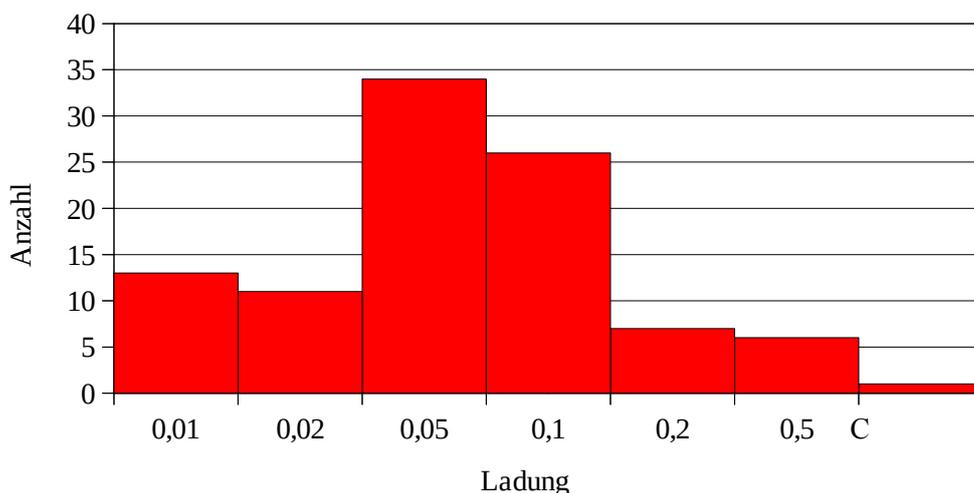


Bild 4.25: Histogramm der Ladungsverteilung im Abschnitt B

Stoßströme mit vorhandenem Abschnitt B in die statistische Auswertung einbezogen.

Der arithmetische Mittelwert der Ladungen liegt bei 0,07 C, der geometrische Mittelwert bei 0,04 C und die Standardabweichung bei 0,10 C und damit etwa eine halbe Größenordnung unter den entsprechenden Werten für den Abschnitt B. Die statistische Darstellung erfolgt durch das Histogramm in Bild 4.25.

Die Ladung der Stoßströme im Abschnitt B ist trotz der erheblich geringeren Strommaxima durchschnittlich nur etwa um den Faktor zwei geringer als die Ladung im Abschnitt A. Der Grund hierfür ist die im Vergleich zum Abschnitt A längere zeitliche Dauer des Abschnitts B.

4.2.2.13 Dauer des Abschnitts B der Stoßströme

Die Dauer des Abschnitts B ergibt sich aus der Definition der Dauer des Abschnitts A als die Zeitdifferenz zwischen dem Ende des Abschnitts A und dem Zeitpunkt, zu dem der Strom seinen Ausgangswert wieder annähernd angenommen hat. Durch die geringen vorkommenden Strommaximalwerte und die geringeren Anstiegszeiten hat der Abschnitt B im Mittel gegenüber dem Abschnitt A eine längere zeitliche Dauer, was sich mit 486 μs im arithmetischen und 395 μs im geometrischen Mittel ausdrückt. Die Standardabweichung der Verteilung beträgt 319 μs . Das Histogramm der Verteilung zeigt Bild 4.26.

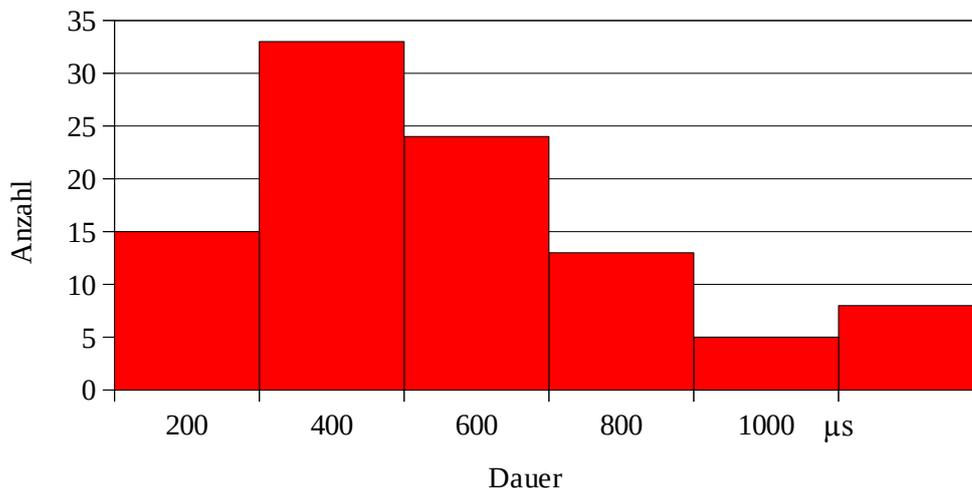


Bild 4.26: Histogramm der Dauer des Abschnitts B der Stoßströme vom Typ IS-n

4.2.2.14 Gesamte Ladung der Stoßströme

Die gesamte Ladung eines Stoßstromes ergibt sich aus der Summe der Ladungen in den Abschnitten A und B. Der Musterstoßstrom in Bild 4.5 vermittelt den Eindruck, dass die Ladung im Abschnitt A betragsmäßig größer ist, als jene im Abschnitt B und die vorzeichenrichtige Summe der Ladungen somit negativ ist. Aufgrund der im Mittel längeren Dauer des Abschnitts B gegenüber dem Abschnitt A ergeben sich jedoch Fälle, bei denen die positive Ladung des Abschnitts B höher als die negative Ladung des Abschnitts A ist und sich somit in Summe eine positive Gesamtladung ergibt. Die folgende statistische Auswertung kann sich daher nicht wie in den vorangegangenen Kapiteln auf die Beträge der Ladungen beschränken, wodurch auch eine Ermittlung des geometrischen Mittelwerts nicht möglich ist.

Die grafische Auswertung der gesamten Ladungen der Stoßströme vom Typ IS-n zeigt das Histogramm in Bild 4.27. Der arithmetische Mittelwert von $-0,082\text{ C}$ zeigt, dass die negative Ladung im Abschnitt A gegenüber der positiven Ladung im Abschnitt B im Mittel überwiegt. Die Standardabweichung der Verteilung der gesamten Ladung beträgt $0,17\text{ C}$.

Da die Stoßströme der anderen Typen keinen Abschnitt B aufweisen, entspricht in diesen Fällen die gesamte Ladung eines Stoßstromes jener des Abschnitts A.

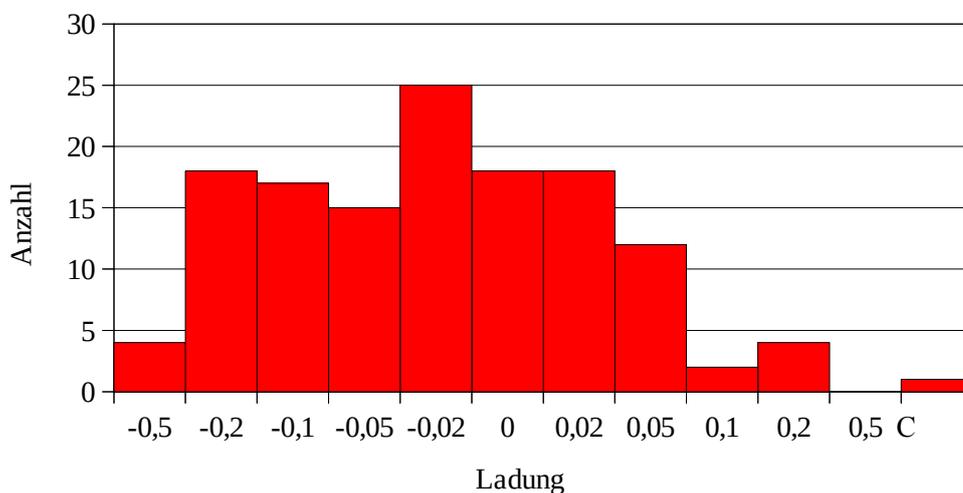


Bild 4.27: Histogramm der gesamten Ladung der Stoßströme vom Typ IS-n

4.2.2.15 Gesamte Dauer der Stoßströme

Ebenso wie die Gesamtladung ergibt sich die gesamte Dauer eines Stoßstromes aus der Addition der zeitlichen Dauer der Abschnitte A und B. Die gesamte Dauer eines Stoßstromes stellt somit die Zeitdifferenz zwischen dem ersten Anstieg des Stromes und dem Rückgang auf seinen Ausgangswert dar. Der arithmetische Mittelwert der gesamten Dauer der Stoßströme beträgt $640 \mu\text{s}$, der geometrische Mittelwert beträgt $525 \mu\text{s}$, wobei sich eine Standardabweichung von $445 \mu\text{s}$ ergibt. Das Histogramm der statistischen Verteilung zeigt Bild 4.28.

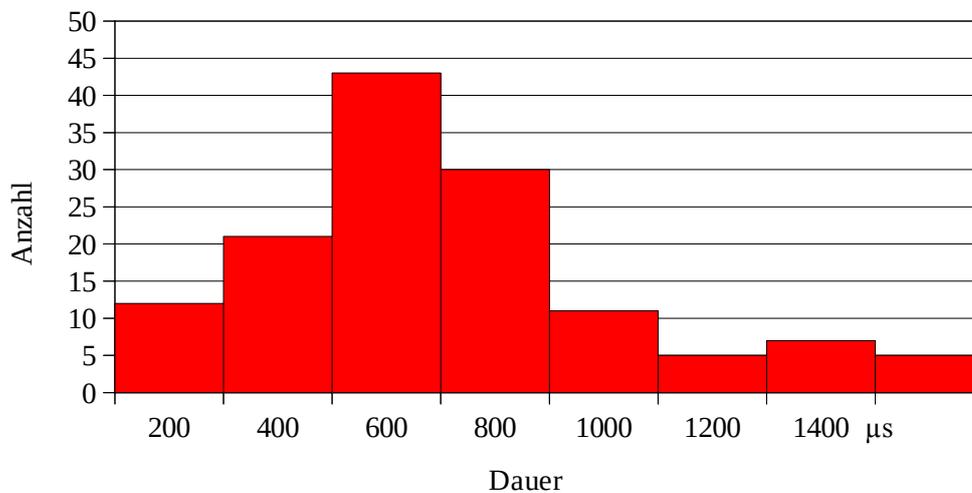


Bild 4.28: Histogramm für die gesamte Dauer der Stoßströme

4.2.3 Auswertungen des gesamten Blitzstromverlaufs

4.2.3.1 Anzahl der Stoßströme je Blitzentladung

Stoßströme vom Typ IS-n

Da die Zahl der Blitzentladungen, welche Stoßströme aufweisen, vergleichsweise gering ist, ist eine vollständige statistische Auswertung nicht statthaft. Die Zahl der Stoßströme vom Typ IS-n innerhalb einer Blitzentladung variiert zwischen einem Stoßstrom und 40 Stoßströmen.

Stoßströme vom Typ RS-n

Ebenso wie beim Typ IS-n ist auch die Anzahl Blitzstromaufzeichnungen mit Stoßströmen des Typs RS-n sehr gering, sodass eine statistische Auswertung keine brauchbaren Ergebnisse liefert. Es konnten Blitzströme mit einer Häufigkeit zwischen einem und 14 Stoßströmen dieses Typs gemessen werden.

Stoßströme der anderen Typen

Stoßströme der übrigen Typen IS-p, RS-p und M konnten nur in Einzelfällen gemessen werden. Hierbei traten in einer Blitzentladung drei Stoßströme vom Typ M-p und ein Stoßstrom vom Typ RS-p gemeinsam auf.

4.2.3.2 Pausenzeiten zwischen den Stoßströmen

Als Pausenzeit zwischen zwei Stoßströmen wird die Zeitdifferenz zwischen dem Ende eines Stoßstromes und dem Beginn des nächsten Stoßstromes definiert. Um ein aussagekräftiges Ergebnis zu erhalten, werden dabei nur jeweils zwei Stoßströme vom gleichen Typ betrachtet.

Stoßströme vom Typ IS-n

Der arithmetische Mittelwert der Pausenzeiten zwischen einzelnen Stoßströmen des Typs IS-n beträgt $697 \mu\text{s}$, der geometrische Mittelwert liegt bei $594 \mu\text{s}$. Die

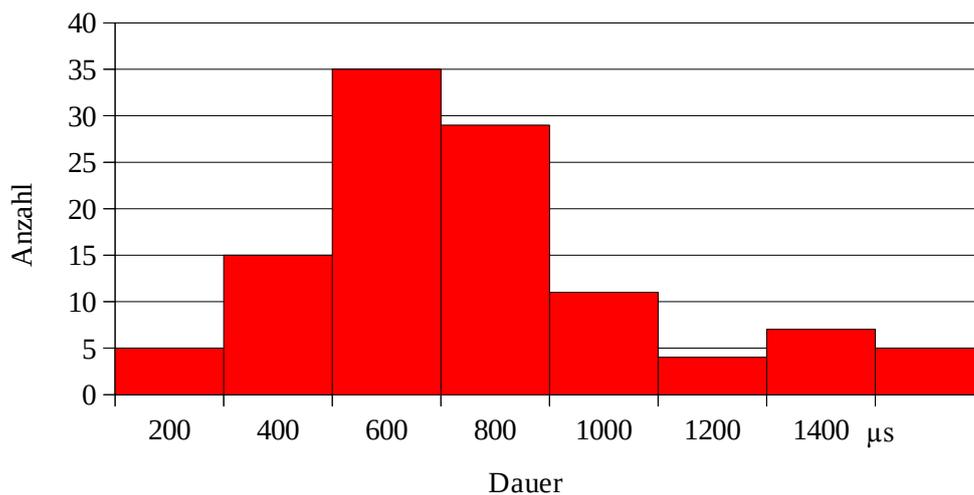


Bild 4.29: Histogramm für die Verteilung der Pausenzeiten zwischen den Stoßströmen des Typs IS-n

Verteilung, deren Histogramm in Bild 4.29 dargestellt ist, weist eine Standardabweichung von $459 \mu\text{s}$ auf.

Stoßströme vom Typ RS-n

Da die Stoßströme des Typs RS-n eine längere Dauer haben als die Stoßströme des Typs IS-n, erscheint auch eine längere Pausendauer zwischen den Stoßströmen logisch. Dies bestätigt sich durch den arithmetischen Mittelwert von $1318 \mu\text{s}$. Der geometrische Mittelwert beträgt $522 \mu\text{s}$, die Standardabweichung der Verteilung beträgt $3259 \mu\text{s}$. Das Histogramm der Verteilung zeigt Bild 4.30.

4.2.3.3 Dauer der gesamten Blitzentladung

Die Dauer der gesamten Blitzentladung ergibt sich als Differenz zwischen dem ersten Auftreten des Langzeit- oder des ersten Stoßstromes und dem Ende des letzten Langzeit- oder Stoßstromes. Für den arithmetischen Mittelwert der Pausenzeit ergibt sich ein Wert von $351 \mu\text{s}$, für den geometrischen Mittelwert $291 \mu\text{s}$. Die statistische Verteilung der Pausendauern weist eine Standardabweichung von $216 \mu\text{s}$ auf.

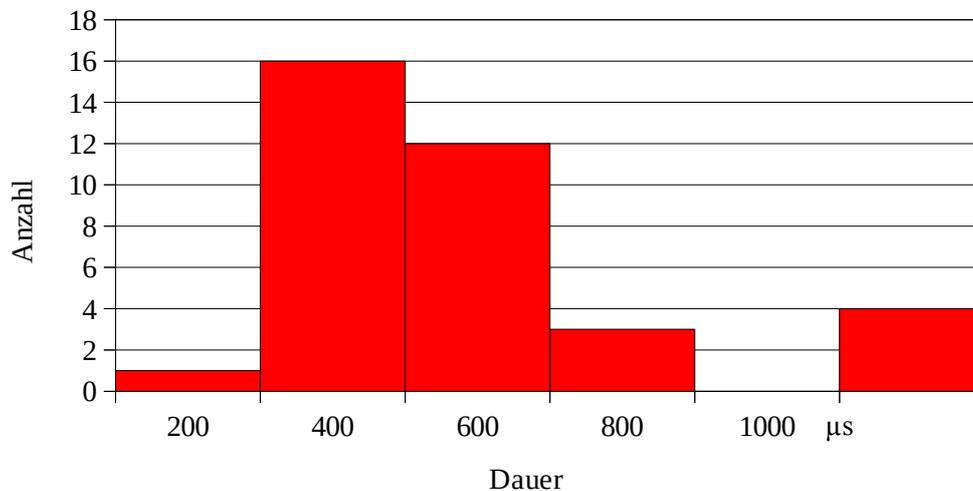


Bild 4.30: Histogramm für die Verteilung der Pausenzeiten zwischen den Stoßströmen des Typs RS-n

4.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die nachfolgenden Tabellen 10, 11 und 12 fassen die wichtigsten Parameter der Blitzströme zusammen.

Größe	Minimalwert	Maximalwert	Geom. Mittelwert
Dauer	18,8 ms	672,0 ms	232,9 ms
Ladung	1 C	205 C	30,9 C
Amplitude	77 A	1495 A	360 A

Tabelle 10: Parameter der Langzeitströme

Größe	Minimalwert	Maximalwert	Geom. Mittelwert
Anstiegszeit	1,8 μ s	157,1 μ s	10,7 μ s
Amplitude	-	15,8 kA	1,3 kA
Halbwertsbreite	5,1 μ s	294,4 μ s	50,3 μ s
Ladung	-0,84 C	0,72 C	-
Steilheit	0,001 kA/ μ s	6,675 kA/ μ s	1,000 kA/ μ s

Tabelle 11: Parameter der Stoßströme vom Typ IS-n

Größe	Minimalwert	Maximalwert	Geom. Mittelwert
Anstiegszeit	0,93 μs	30,87 μs	2,88 μs
Amplitude	1,6 kA	40,8 kA	8,1 kA
Halbwertsbreite	9,9 μs	222,5 μs	27,8 μs
Ladung	0,12 As	11,14 As	0,56 As
Steilheit	0,07 kA/ μs	16,83 kA/ μs	1,94 kA/ μs

Tabelle 12: Parameter der Stoßströme vom Typ RS-n

4.3 Schwingungen im Stirnbereich der Stoßströme

Wie im Abschnitt 4.2.2.1 ausgeführt, weist eine Teilmenge der Stoßströme Schwingungen in ihrem Stirnbereich auf. Diese Schwingungen konnten auch bei früheren Messungen am Hohen Peißenberg [17] sowie an anderen Türmen beobachtet werden, wurden jedoch Schwingungen des Messsystems aufgrund eines fehlerhaften Aufbaus zugeschrieben. Die Tatsache, dass auch im gegenüber vorangegangenen Messungen veränderten Messaufbau Schwingungen gemessen werden konnten und diese auch in den Messungen des magnetischen Feldes auftreten, weist darauf hin, dass es sich nicht um einen fehlerhaften Messaufbau sondern um tatsächlich vorhandene Resonanzschwingungen des Turmbauwerks handelt.

4.3.1 Parameter der Schwingungen

Bild 4.31 zeigt den typischen Verlauf der Schwingungen im Stirnbereich eines Stoßstromes vom Typ IS-n. Der gefilterte Blitzstromverlauf ist dabei in schwarz, der ungefilterte in rot dargestellt. Als wichtigster Parameter fungiert die Periodendauer $T_{p,s}$ der Schwingung bzw. deren Kehrwert, die Schwingungsfrequenz f . Die Größe $i_{ü,max}$ gibt die maximale Überhöhung gegenüber dem gefilterten Stromverlauf an. Die Dauer der Schwingung wird mit t_s bezeichnet und gibt die Zeitdifferenz zwischen dem Auftreten der ersten Schwingung und dem Abklingen der letzten Schwingung an.

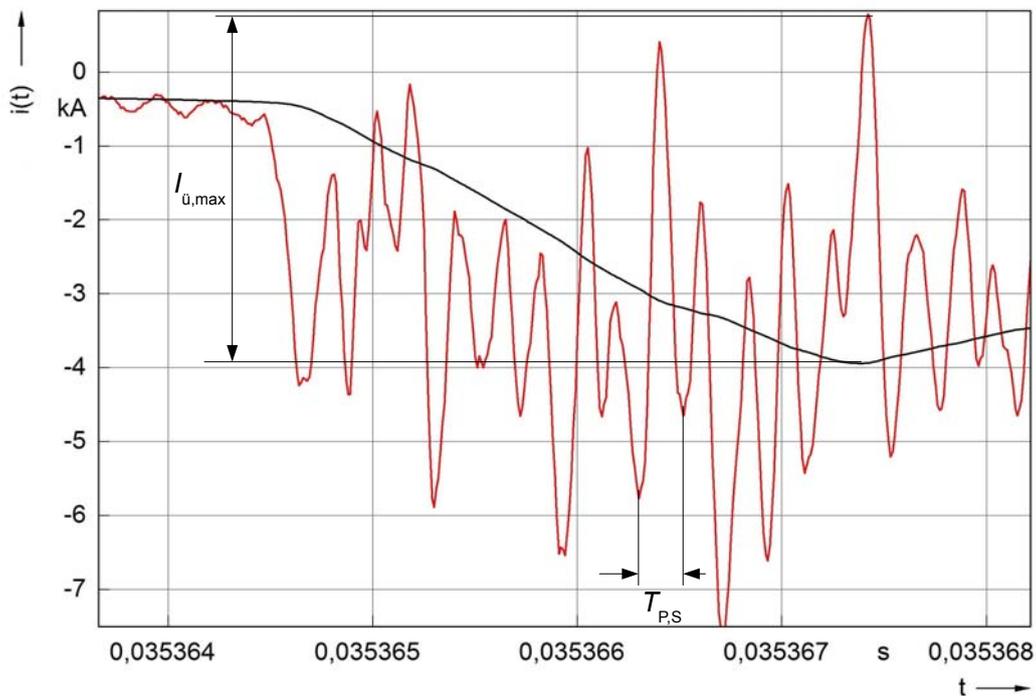


Bild 4.31: Parameter der Schwingungen der Stoßströme (B334)

4.3.2 Auftreten der Schwingungen

Für die folgenden Auswertungen wurden nur Stoßströme herangezogen, die eine maximale Überhöhung von mehr als 2 kA aufweisen. Des weiteren ist festzustellen, dass Schwingungen sowohl bei Stoßströmen gemäß den in Abschnitt 4.2.2.1 definierten Kategorien auftreten als auch bei Strommessungen mit dem zeitlichen Mittelwert 0 A. Wie im nachfolgenden Abschnitt 4.3.3 gezeigt wird, handelt es sich bei letzteren um Einschläge in eine Nebenfangstange des Turmes, wobei der Sensor lediglich die Resonanzerscheinungen aufzeichnet.

Für die Schwingungen kann keine einheitliche Frequenz angegeben werden, da es sich um eine Überlagerung von Schwingungen in einem ausgedehnten Frequenzbereich handelt. Die kleinste gemessene Frequenz beträgt 1,2 MHz, die größte gemessene Frequenz 6,0 MHz. Im arithmetischen Mittel ergibt sich dabei eine Frequenz von 3,25 MHz bei einer Standardabweichung von 1,46 MHz.

Für die Höhe der Schwingungen $i_{\bar{u},max}$ wurden Werte kleiner als 2 kA nicht betrachtet. Der größte Wert für $i_{\bar{u},max}$ konnte zu 19,6 kA gemessen werden, der arithmetische Mittelwert liegt bei 6,6 kA, mit einer Standardabweichung von 4,7 kA.

Aufgrund der Tatsache, dass die Schwingungen ausschließlich im schnell veränderlichen Stirnbereich von Strömen auftreten, ist davon auszugehen, dass Schwingungen nur bei Strömen mit hoher Steilheit auftreten, was gleichbedeutend mit einer geringen Anstiegszeit ist. Die Auswertung der Messdaten ergibt, dass 53 von 59 Stoßströmen mit Schwingungen eine Anstiegszeit von weniger als $3 \mu\text{s}$ aufweisen, was einem Anteil von 90% entspricht. Unter den Stoßströmen ohne Schwingungen haben nur 12 von 116, entsprechend einem Anteil von 10%, eine Anstiegszeit von weniger als $3 \mu\text{s}$. Dies ist als deutlicher Hinweis auf den engen Zusammenhang zwischen einer kleinen Anstiegszeit und dem Auftreten von Schwingungen im Stirnbereich des Stromes zu bewerten. Eine Abhängigkeit des Auftretens der Schwingungen von anderen Parametern der Ströme konnte nicht festgestellt werden.

4.3.3 Simulation der Resonanzen des Turmbauwerks

4.3.3.1 Simulationsmodell

Mit dem in Abschnitt 3.4.3.2 vorgestellten Simulationsprogramm CONCEPT II war es möglich, die in den Messdaten auftretenden Schwingungen auch in der Simulation nachzubilden. Hierzu wurde ein Modell des Turms in zwei unterschiedlichen Umfängen erstellt. Das erste Modell bildet den gesamten Turm vom Fuß bis zur Spitze einschließlich aller Plattformen vollständig nach. Es lassen sich somit alle Effekte des Turms berechnen, allerdings ergeben sich aufgrund der großen Anzahl von über 3000 Einzelementen Rechenzeiten von mehreren Stunden. Da die im vorliegenden Fall interessierenden Schwingungseffekte im Wesentlichen durch den oberen Abschnitt des Turms verursacht werden, wurde in einem zweiten Schritt ein weiteres Modell erstellt welches nur diesen Abschnitt nachbildet und eine erheblich geringere Anzahl an Einzelementen aufweist, sodass sich die Berechnungszeit deutlich verkürzt.

Die Modelle sind in Bild 4.32 dargestellt. In beiden Fällen wurde zur Vereinfachung der Berechnungen die Stahl- und Stahlbetonteile des Turms als ideal leitende Flächen modelliert, die aus glasfaserverstärktem Kunststoff bestehenden Teile im oberen Bereich des Turmes wurden aufgrund ihrer sehr geringen Leitfähigkeit nicht in das Modell miteinbezogen.

Die Einspeisung des simulierten Blitzstroms erfolgte als eingepprägter Strom an zwei verschiedenen Punkten. Bild 4.33 zeigt die Einspeisungspunkte an der Spitze der Hauptfangstange (A) und an der Spitze einer Nebenfangstange (B) sowie ein eingezeichnetes Modell des Sensorgehäuses, welches den in der Simulation verwendeten Strommesspunkt darstellt.

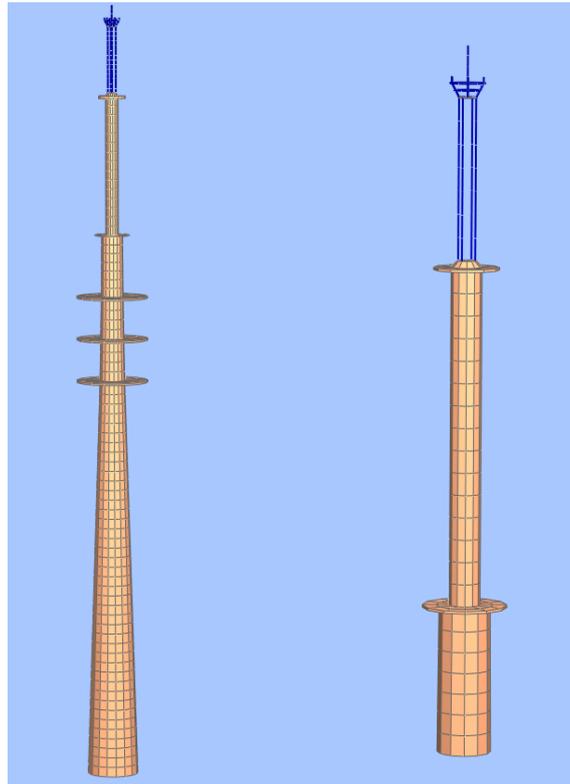


Bild 4.32: CONCEPT-Modell des gesamten Turms (links) und des oberen Abschnitts (rechts)

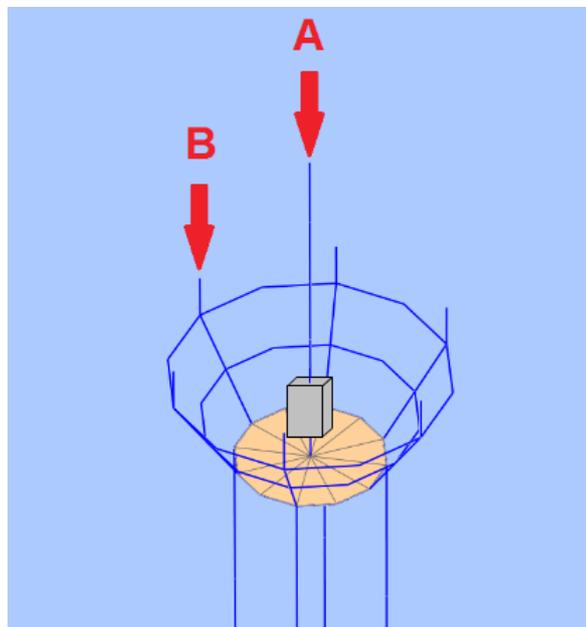


Bild 4.33: Simulationsmodell der Turmspitze mit Einschlagpunkten A und B sowie dem Messpunkt

4.3.3.2 Simulationsergebnisse

Als Anregungssignal wurde ein trapezförmiges Signal mit einer Anstiegszeit von 10 ns, einer Dauer von 1 μs und einer normierten Amplitude von 1 kA gewählt. Um die bei den Messungen verwendete Konvention bezüglich der Stromrichtung beizubehalten, wurde der Strom dabei als negativ angenommen.

Anregung im Punkt A

Eine Anregung im Punkt A simuliert einen direkten Blitzeinschlag in die Hauptfangstange. Der in Bild 4.34 dargestellte Zeitverlauf bei der Anregung im Punkt A zeigt deutlich die dem eingespeisten Stromsignal überlagerten Schwingungen, welche hier jedoch relativ schwach ausgeprägt sind. Die Frequenz der Schwingungen beträgt bei dieser Simulation abweichend von den Messergebnissen etwa 18,8 MHz, wie im Amplitudendichtespektrum in Bild 4.35 dargestellt.

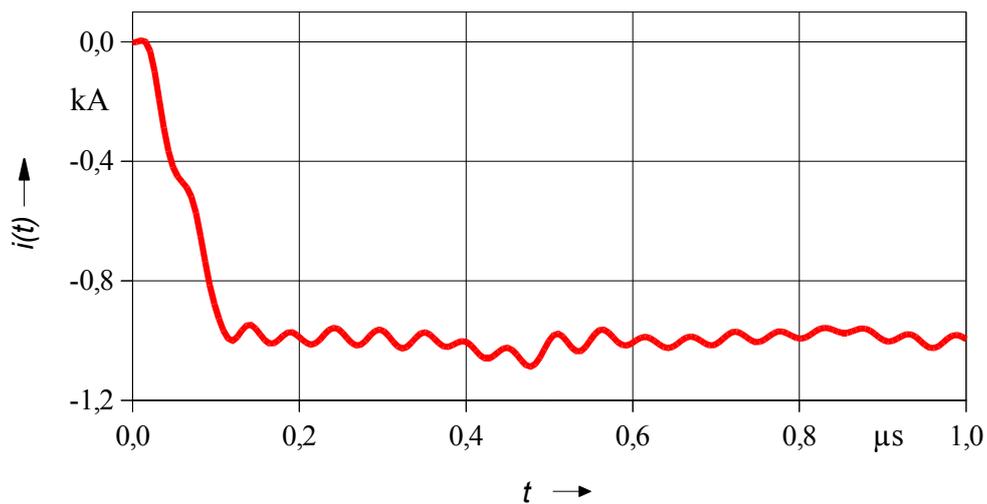


Bild 4.34: Zeitlicher Verlauf des Stroms bei simuliertem Einschlag in die Hauptfangstange

Zur Verbesserung der Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation wurde im nächsten Schritt die kapazitive Kopplung im Bereich des Fangkorbs berücksichtigt. Dazu wurden konzentrierte Kapazitäten unterschiedlicher Größen zwischen der Hauptfangstange und dem obersten Fangring eingefügt. Tabelle 13 zeigt den Zusammenhang zwischen den kapazitiven Kopplungen und der Resonanzfrequenz auf.

Kapazität in pF	Resonanzfrequenz in MHz
0	18,8
50	16,2
100	13,0
200	9,7
500	6,3

Tabelle 13: Abnahme der Resonanzfrequenz in Abhängigkeit von der Kapazität

Es zeigt sich deutlich, dass mit zunehmender Berücksichtigung der kapazitiven Effekte die Resonanzfrequenz sinkt und in die Größenordnung der gemessenen Resonanzfrequenz kommt. Da eine weitere Steigerung der konzentrierten Kapazität nicht der Realität entspricht, ergibt sich die tatsächlich gemessene Resonanzfrequenz durch mehrere, verteilte kapazitive Kopplungen, welche nicht vollständig im Simulationsmodell berücksichtigt werden können.

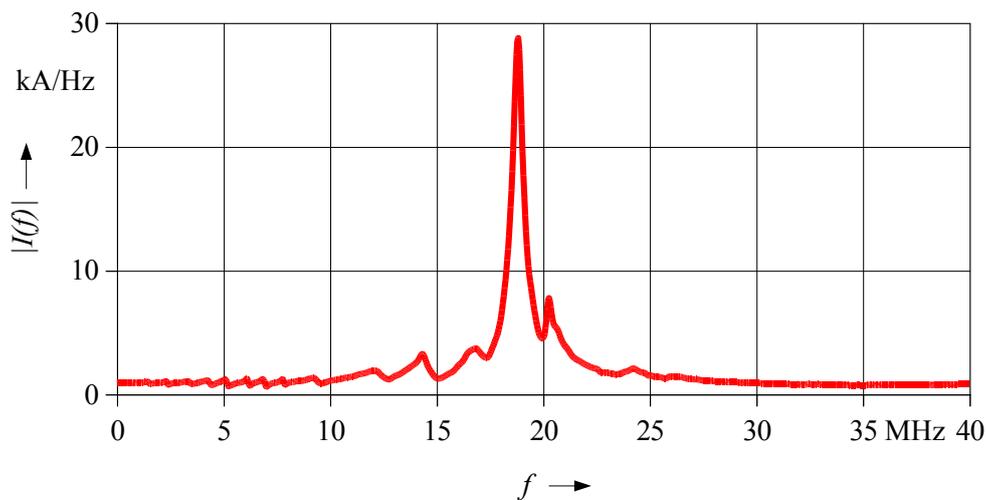


Bild 4.35: Amplitudendichtespektrum des Blitzstromes bei simuliertem Einschlag in die Hauptfangstange

Anregung im Punkt B

In einer zweiten Untersuchung wurde ein Einschlag im Punkt B (Bild 4.33) simuliert. Wie im folgenden Abschnitt 4.4 ausgeführt wird, stellt dies trotz der Lage des Punktes B ein tatsächlich auftretendes Ereignis dar.

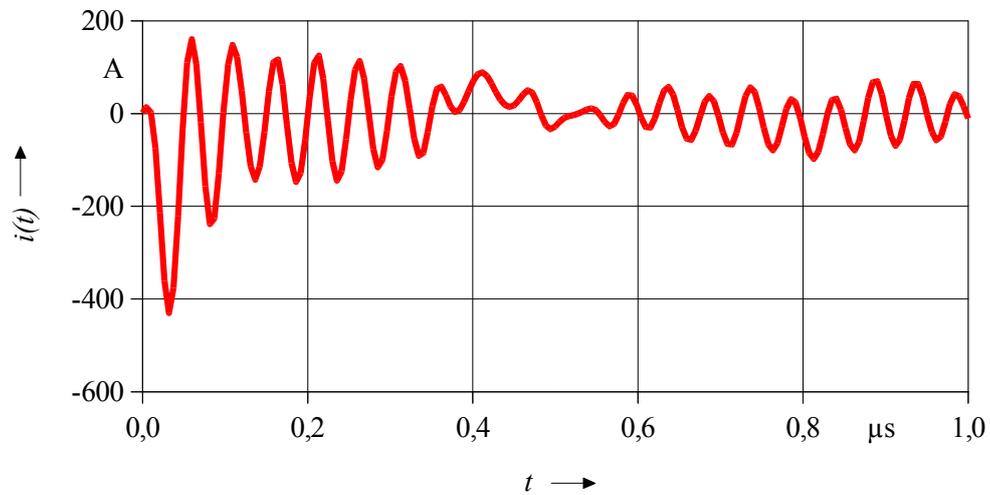


Bild 4.36: Zeitlicher Verlauf des Stroms bei simuliertem Einschlag in eine Nebenfangstange

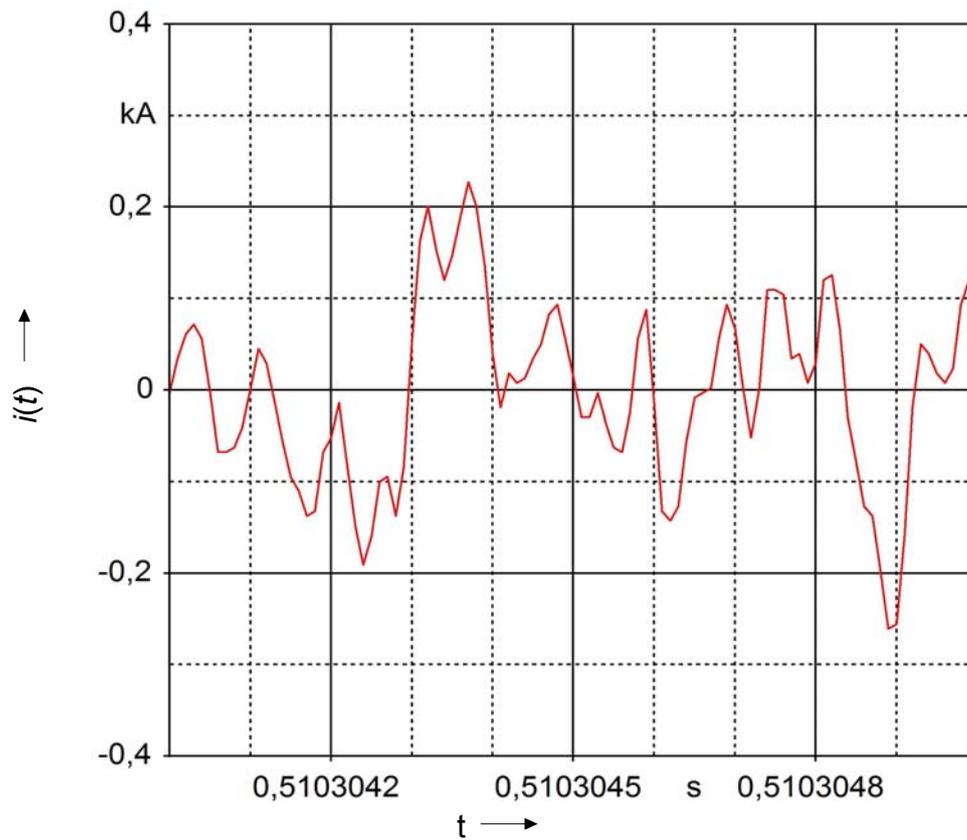


Bild 4.37: Zeitlicher Verlauf des Stroms bei einer Schwingung um die Nulllinie (B307)

Bild 4.36 zeigt den simulierten Verlauf des Stromes im Messpunkt bei Anregung im Punkt B. Aufgrund der Tatsache, dass der Hauptstrompfad in diesem Fall nicht durch den Messpunkt verläuft, sondern dieser nur Resonanzströmen durchflossen wird, ergibt sich ein zeitlicher Mittelwert von 0 A. Die Frequenz der Schwingungen ist, wie im vorigen Abschnitt ausgeführt, von der Berücksichtigung weiterer kapazitiver Effekte abhängig.

Die Übereinstimmung von Simulation und Messung zeigt Bild 4.37, welches einen typischen Verlauf einer Stromschwingung um die Nulllinie darstellt. Der Unterschied in der Schwingungsfrequenz ist dadurch bedingt, dass in der Simulation in Bild 4.36 keine kapazitiven Effekte berücksichtigt sind.

4.4 Fangstangen

Eine fotografische Untersuchung der Fangstangen an der Turmspitze ist aufgrund ihrer besonderen Lage nur eingeschränkt möglich. Insbesondere die Spitze der

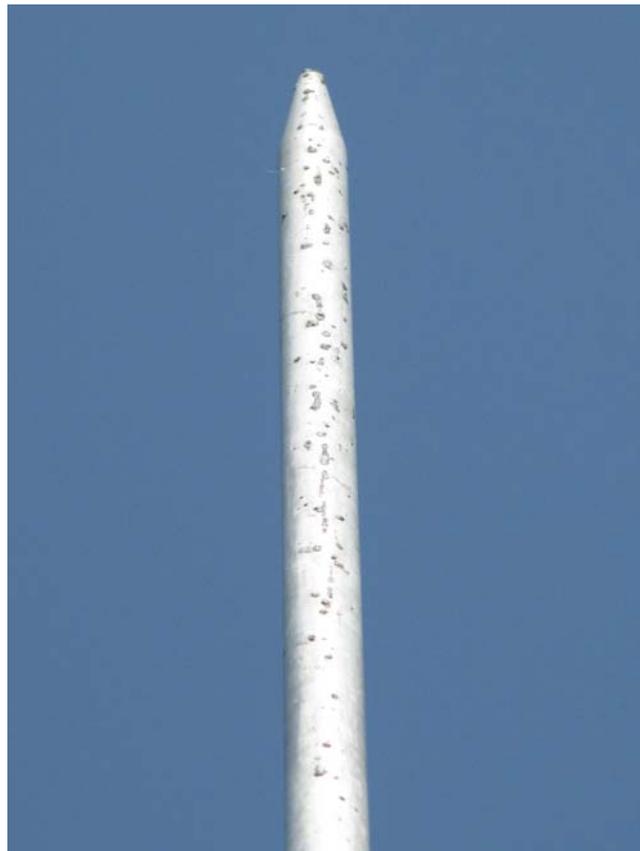


Bild 4.38: Einschlagspuren an der Hauptfangstange an der Turmspitze

Hauptfangstange ist im eingebauten Zustand nicht direkt erreichbar. Bild 4.38 vermittelt einen Eindruck der über die gesamte Länge der Fangstange verteilten Entladungsfußpunkte. Auch die durch Ausschmelzungen bedingte Abplattung der Fangstangenspitze ist erkennbar.

Die im Anhang A2.1 abgebildete Konstruktionszeichnung der Turmspitze sowie das Bild 3.3 zeigen die Anordnung der weiteren sechs am Fangkorb montierten Nebenfangstangen. Hierbei handelt es sich um 400 mm lange Stangen aus verzinktem Stahl mit einem Durchmesser von 20 mm, welche senkrecht auf dem obersten Rohr des Fangkorbes befestigt sind. Konstruktionsbedingt fließen Ströme, die auf Blitzentladungen an diesen Nebenfangstangen beruhen, nicht durch die Blitzstrommesseinrichtungen und werden somit nicht erfasst.

Die Anwendung des Blitzkugelverfahrens entsprechend der Blitzschutznormen [12] ergibt auch für den ungünstigsten Fall, dass die gesamte Turmspitze im Schutzbereich der Hauptfangstange liegt. Dies setzt natürlich voraus, dass das

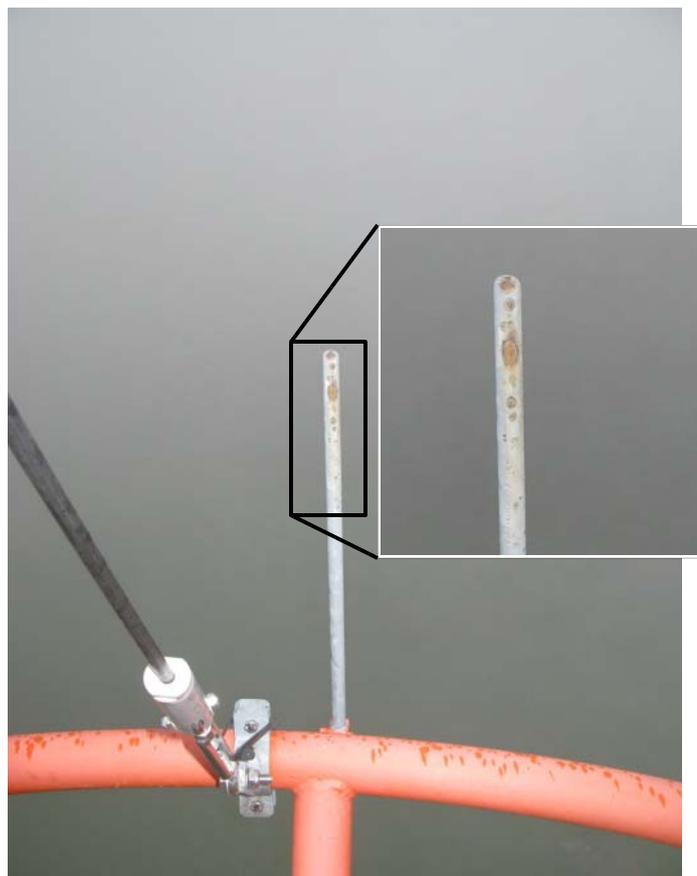


Bild 4.39: Entladungsspuren an einer Nebenfangstange mit Detailansicht der Spitze (Blickrichtung Norden)

Blitzkugelverfahren gleichermaßen für Aufwärts- wie für Abwärtsblitze gilt. Die Untersuchung der Nebenfangstangen zeigte, dass auch an diesen Fangstangen Einschlagsspuren zu finden sind. Beispielhaft zeigt Bild 4.39 die Entladungsspuren an einer Nebenfangstange.

Bemerkenswert ist neben der Tatsache, dass sich an den Nebenfangstangen überhaupt Entladungsspuren feststellen lassen, deren räumliche Verteilung. Alle Entladungsspuren befinden sich – unabhängig von der Position der Fangstange – bevorzugt auf deren südlicher Seite. Dies ist deshalb ungewöhnlich, da in vorangegangenen Arbeiten festgestellt werden konnte, dass bei Gewittern am Hohen Peißenberg der Wind meist aus westlichen Richtungen kommt. Die Ursache für die Anordnung der Entladungsspuren kann daher nicht ausschließlich in Verwehungen des Blitzkanals gesucht werden und lässt sich nur durch die Installation zusätzlicher Messinstrumente an der Turmspitze – etwa einer Kamera – herausfinden.

4.5 Videoaufzeichnung der Blitzströme

Für die Blitzentladung B353 konnte die erste und bislang einzige Videoaufzeichnung mit der Hochgeschwindigkeitskamera ausgeführt werden. Den Verlauf der gesamten Blitzentladung zeigt Bild 4.40. Nach einer einleitenden Phase mit einem sehr niedrigen Langzeitstrom mit positiven überlagerten Stromimpulsen, welcher in Bild 4.41 dargestellt ist, schließen sich fünf positive Stoßströme an.

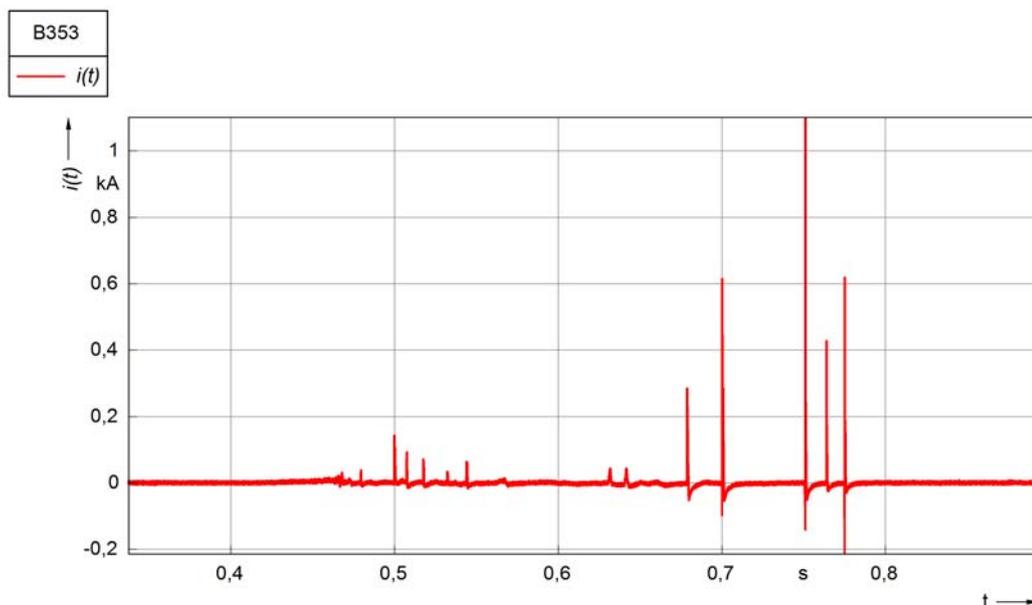


Bild 4.40: Blitzstrom B353 (Ausschnitt)

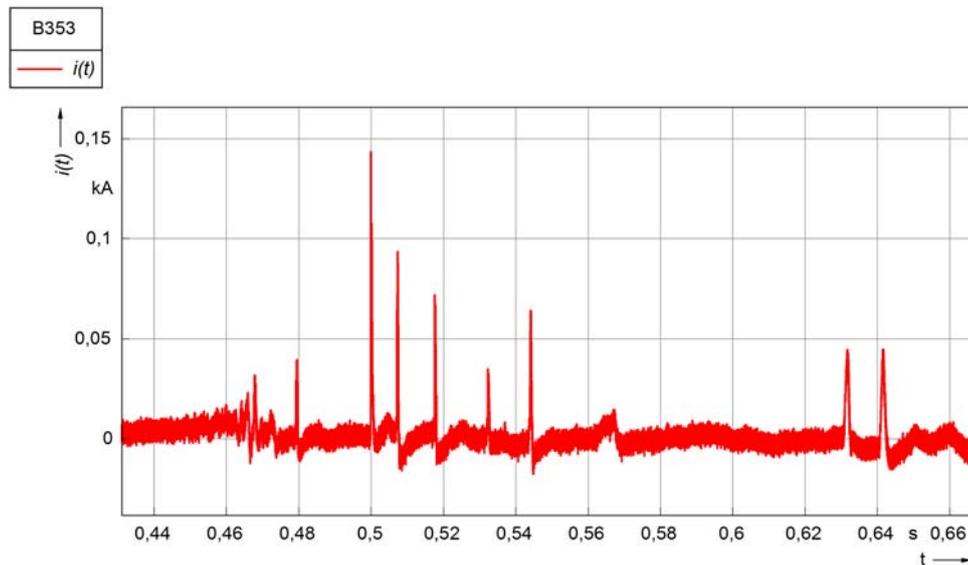


Bild 4.41: Langzeitstrom der Blitzmessung B353

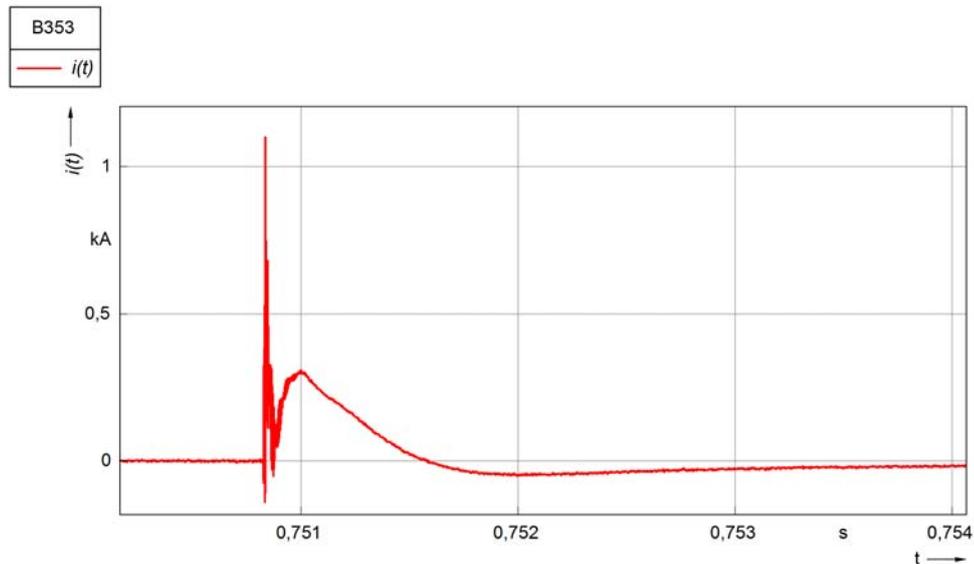


Bild 4.42: Struktur des dritten Stoßstromes der Blitzentladung B353

Die Struktur dieser Stoßströme zeigt Bild 4.42 beispielhaft anhand des dritten Stoßstromes. An einen positiven Stromimpuls mit einer Breite von etwa $25 \mu\text{s}$ schließt sich unmittelbar ein langsam ansteigender und schließlich exponentiell abfallender Stromverlauf mit einer Halbwertsbreite von etwa $500 \mu\text{s}$ an. Aufgrund ihres von den anderen Stoßströmen abweichenden Verlaufs lassen sich diese Stoßströme nicht in eine der im Abschnitt 4.2.2.1 definierten Kategorien einordnen.

Mit der im Abschnitt 3.4.5.3 beschriebenen Hochgeschwindigkeitskamera konnte eine Videoaufzeichnung des Blitzstroms B353 erstellt werden. Die folgenden Bilder zeigen als Abfolge von Einzelaufnahmen den Ablauf der Blitzentladung. In der rechten oberen Ecke jedes Einzelbildes ist dabei die Nummer des Bildes in Bezug auf das erste Bild der Videoaufzeichnung angegeben. Aus der Aufzeichnungsrate von 5000 Bildern je Sekunde ergibt sich eine Zeitdifferenz zwischen zwei Bildern von 200 μ s.

Bild 4.43 stellt eine Abfolge von Einzelbildern des Langzeitstromes dar. Der zeitliche Abstand zwischen zwei Einzelbildern beträgt hier 20 ms. Obwohl die maximale Stromstärke des Langzeitstroms nur wenige zehn Ampere beträgt, ist ein deutlicher, kontinuierlich leuchtender Blitzkanal erkennbar, welcher aufgrund der überlagerten Stromimpulse Schwankungen in seiner Helligkeit aufweist. Mit zunehmender Zeit wird die Helligkeit des Kanals immer geringer, um schließlich kurz nach Einzelbild 1200 unter die Schwelle der Wahrnehmbarkeit zu sinken.

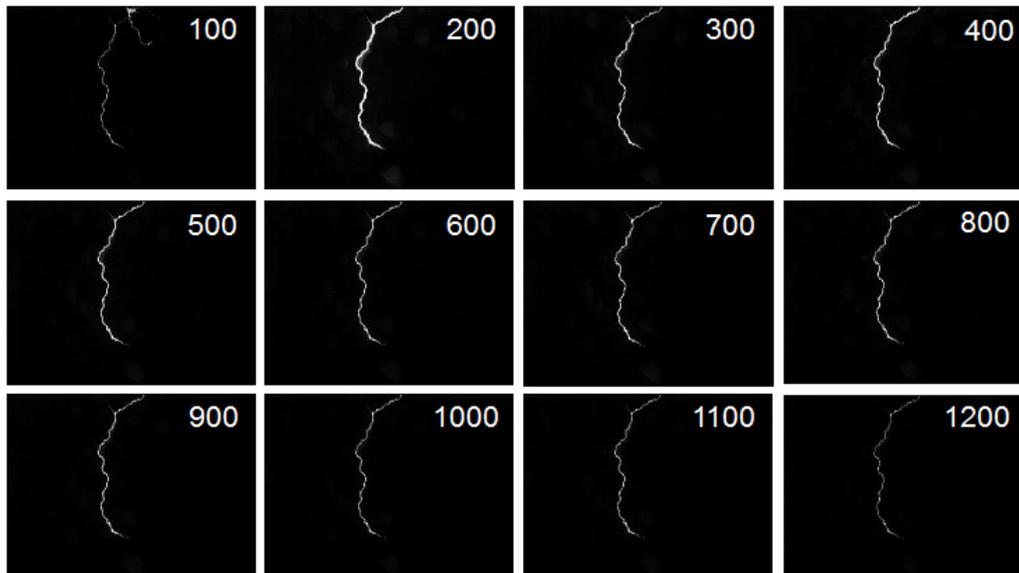


Bild 4.43: Einzelbildabfolge des Langzeitstroms von B353

Die Bildfolge des dritten Stoßstromes ist in Bild 4.44 dargestellt. Die acht aufeinanderfolgenden Einzelbilder zeigen den vollständigen Stoßstrom von seiner Entstehung bis zum Abklingen. Zum Zeitpunkt der maximalen Helligkeit (Einzelbilder 1606 und 1607) ergibt sich durch die auf der Schutzscheibe ablaufenden Regentropfen Überstrahlungseffekte, die die exakte Sichtbarkeit des Blitzkanals herabsetzen.

Während der Videoaufzeichnung des Einschlags in den Fernmeldeturm konnten auch in der näheren Umgebung Blitzentladungen registriert werden. Aufgrund des

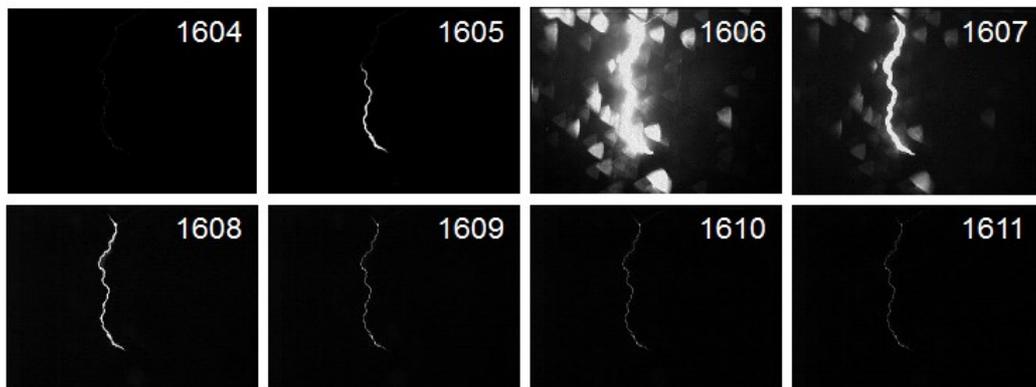


Bild 4.44: Einzelbildabfolge des Stoßstromes B353-3

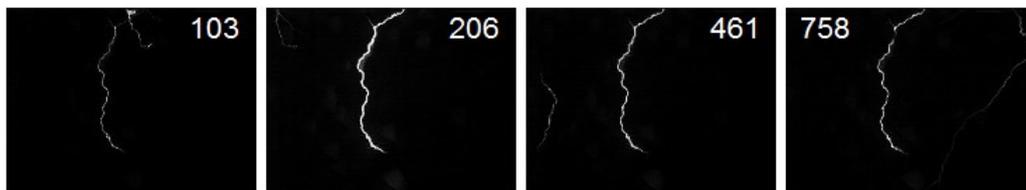


Bild 4.45: Nahe Blizentladungen während B353

Blickwinkels der Kamera ist davon auszugehen, dass es sich bei einem Großteil davon um Wolke-Wolke-Blitze handelt. Vier dieser nahen Blizentladungen sind in Bild 4.45 dargestellt.

4.6 Messung des elektrischen Feldes

Bei den Messergebnissen des elektrischen Feldes lassen sich die Daten des schnell veränderlichen elektrischen Feldes, welches mit der kapazitiven Feldsonde gemäß Abschnitt 3.4.3.2 gemessen wird, sowie die Daten des langsam veränderlichen elektrischen Feldes, welches mit der Feldmühle aufgenommen wird, unterscheiden.

4.6.1 Messung des schnell veränderlichen elektrischen Feldes

Bei der Messung des schnell veränderlichen elektrischen Feldes lassen sich bezüglich des grundlegenden zeitlichen Verlaufs die nachfolgend beschriebenen Gruppen unterscheiden.

4.6.1.1 Elektrische Felder vom Typ 1

Insgesamt konnten zwölf elektrische Felder vom Typ 1 aufgenommen werden, die anhand ihrer Feinstruktur noch in zwei Untergruppen aufgeteilt werden können.

Felder vom Typ 1a sind gekennzeichnet durch einen schnellen Anstieg des Feldes vom Ausgangswert von annähernd 0 kV/m auf einen positiven Wert und einen exponentiellen Abfall zurück auf den Ausgangswert. Als Beispiel für einen Feldverlauf vom Typ 1a ist in Bild 4.46 das elektrische Feld der Blitzmessung B342 dargestellt.

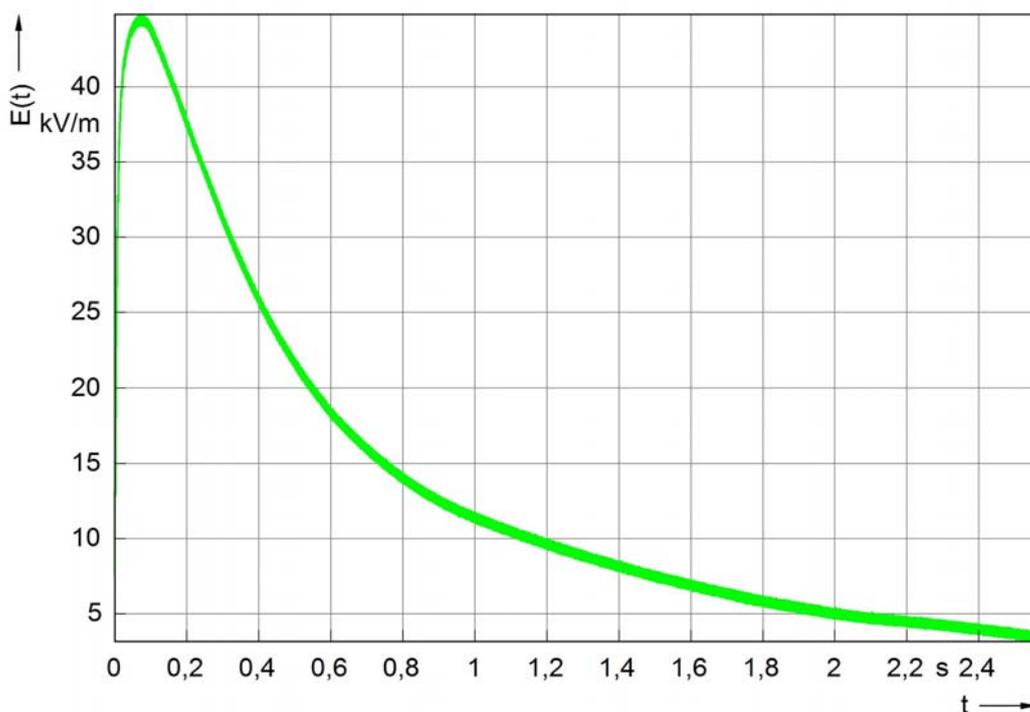


Bild 4.46: Verlauf eines elektrischen Feldes vom Typ 1a (Blitzmessung B342)

Elektrische Felder vom Typ 1a treten auf bei negativen Langzeitströmen auf. Der Grund hierfür ist, dass der negative Langzeitstrom sich physikalisch ergibt durch einen positiven, aufwärts gerichteten Leader, der von der Turmspitze in Richtung Wolke vorwächst. Dadurch bilden die Turmspitze und der Leader ein Gebiet positiver Ladung, was sich im Anstieg des elektrischen Feldes auf einen positiven Wert äußert.

Nach einem Vorschlag von Wang et al. [50] können Aufwärtsblitze eingeteilt werden in „self-initiated“ und „other-triggered“, also solche, die allein durch die Bedingungen an der Turmspitze ausgelöst werden, und andere, die durch in der Nähe stattfindende Entladungsvorgänge eingeleitet werden. Diese nahen Entladungen

können grundsätzlich beliebiger Natur sein, beispielsweise also auch Entladungen in oder zwischen Wolken. Die beiden Formen von Aufwärtsblitzen lassen sich besonders gut am Verlauf des zugehörigen elektrischen Feldes unterscheiden. Die elektrischen Felder des Typs 1 sind dabei den selbsteingeleiteten Aufwärtsblitzen zuzuordnen, da sich keine weiteren Entladungsaktivitäten im Verlauf des Feldes zeigen.

Elektrische Felder vom Typ 1b sind jenen des Typs 1a sehr ähnlich; der einzige Unterschied besteht im Verhältnis zwischen Ausgangs- und Endwert. Während diese beiden Werte bei Feldern vom Typ 1a gleich sind, beginnen Felder des Typs 1b bei etwa 50% des Maximalwertes. Es ist daher naheliegend, dass sich diese Feldform durch Überlagerung mehrerer Effekte ergibt. Eine Möglichkeit ist das Wachstum zweier annähernd paralleler, kurz aufeinanderfolgender Leader, wobei die Auswirkungen des einen Leaders beginnen, bevor die durch den ersten Leader verursachte Feldänderung abgeklungen ist.

Maximalwert des elektrischen Feldes

Als Maximalwert des elektrischen Feldes wird die Differenz zwischen dem niedrigsten Wert des elektrischen Feldes und dem höchsten gemessenen Wert definiert.

Bis auf eine Ausnahme haben die Maxima aller gemessenen elektrischen Felder vom Typ 1a Werte zwischen 18 kV/m und 27 kV/m, wobei der arithmetische Mittelwert 22,9 kV/m beträgt. Der Maximalwert des „Ausreißers“ liegt mit 42 kV/m um den Faktor zwei über den anderen Messwerten, was sich jedoch nicht aus den Parametern des Langzeitstromes erklären lässt.

Die Felder des Typs 1b weisen durchweg geringere elektrische Feldstärken von deutlich unter 10 kV/m auf.

Anstiegszeit des elektrischen Feldes

Die Anstiegszeit der elektrischen Felder vom Typ 1a unterscheiden sich, ebenso wie die Maximalwerte, von einer Ausnahme abgesehen, nur sehr wenig voneinander. Der kleinste Messwert für die Anstiegszeit beträgt 7,2 ms, der größte Wert 14,4 ms und der arithmetische Mittelwert beträgt 11,7 ms. Die Anstiegszeit des „Ausreißers“ ist mit 22,3 ms gut doppelt so groß wie jene der restlichen Messwerte. Aufgrund des doppelt so großen Maximalwertes weist diese Messung jedoch eine ebenso große Steilheit auf wie die übrigen Messungen.

Die Felder vom Typ 1b zeigen bezüglich der Anstiegszeit gegenüber den Feldern vom Typ 1a ein grundsätzlich anderes Verhalten. Der Flankenbereich des elektri-

schen Feldes, welcher lediglich etwa 50% der gesamten Amplitude umfasst, hat eine Dauer von deutlich unter 1 ms.

Rückenhalfwertszeit des elektrischen Feldes

Für die Rückenhalfwertszeit der elektrischen Felder vom Typ 1 gilt ähnliches wie für die Anstiegszeit. Die Rückenhalfwertszeiten haben Werte zwischen 89 ms und

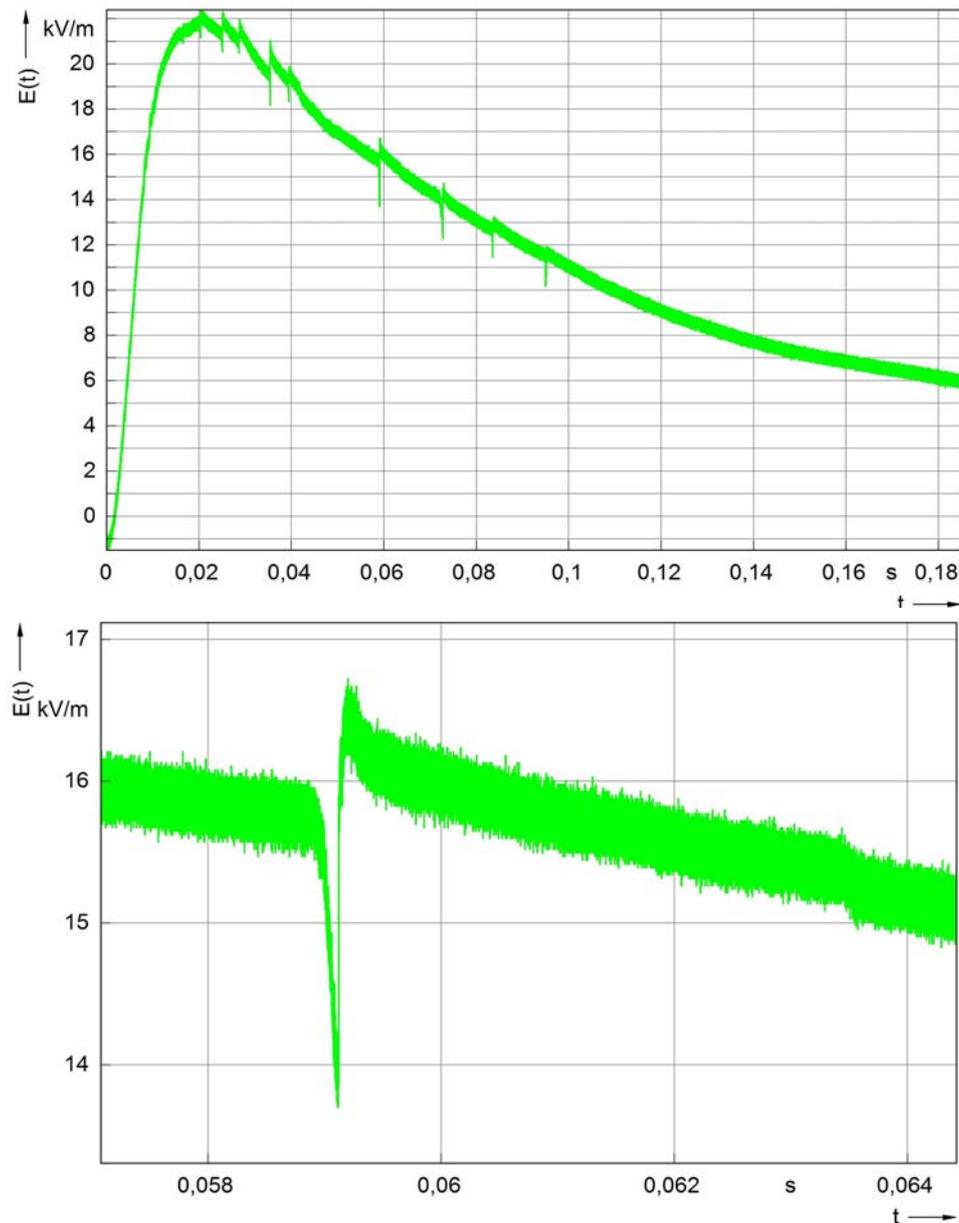


Bild 4.47: Dem elektrischen Feld vom Typ 1 überlagerte Impulse

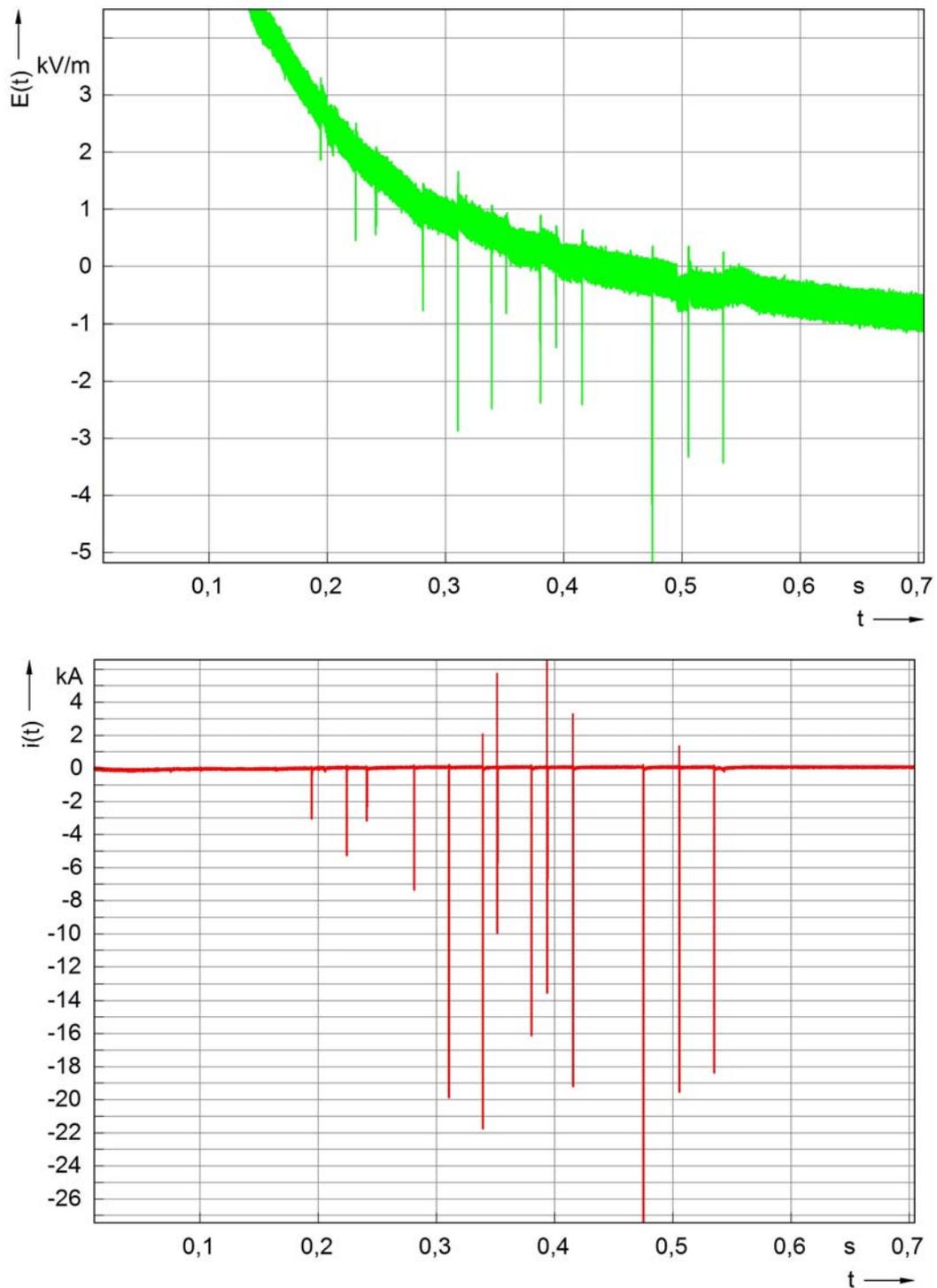


Bild 4.48: Zeitlich koordinierte Darstellung von elektrischem Feld (oben, Ausschnitt) und Blitzstrom (unten)

294 ms, wobei der arithmetische Mittelwert 172 ms beträgt. Die Rückenhalbwertszeit des Ausreißerwertes ist mit 400 ms wiederum etwa doppelt so groß.

Die Rückenhalbwertszeiten der Felder vom Typ 1b sind mit einem arithmetischen Mittelwert von 184 ms jenen des Typs 1a ähnlich. Zur besseren Vergleichbarkeit der beiden Typen wurde, trotz der unterschiedlichen Startwerte, als Rückenhalbwertszeit auch bei den Feldern des Typs 1b die Zeitdifferenz zwischen den beiden Punkten, an denen 50% des Maximalwertes erreicht werden, definiert.

Überlagerte Impulse

Den Langzeitströmen, welche Ursache der elektrischen Felder des Typs 1 sind, können gemäß Abschnitt 4.2.2.2 Stoßströme des Typs IS überlagert sein. Bei einer hinreichenden Stärke dieser Ströme werden diese ebenfalls im Verlauf des elektrischen Feldes abgebildet. Bild 4.47 zeigt anhand des elektrischen Feldes von B334 das Auftreten sowie die Feinstruktur eines dieser Impulse.

Die dem Langzeitstrom überlagerten Impulse bewirken einen schnellen Einbruch des elektrischen Feldes um einige kV/m, gefolgt von einem schnellen Anstieg und einem anschließenden Rückgang auf den Wert des „ungestörten“ elektrischen Feldes.

Ein Vergleich der Messungen von elektrischem Feld (Bild 4.48 oben) und Strom (Bild 4.48 unten) zeigt, dass die Größe der dem elektrischen Feld überlagerten Impulse unabhängig ist von der Stärke des zugehörigen Stromimpulses.

4.6.1.2 Elektrische Felder vom Typ 2

Die elektrischen Felder vom Typ 2 sind gekennzeichnet durch einen Abfall der elektrischen Feldstärke von ihrem Ausgangswert auf einen negativen Minimalwert, einen schnellen Anstieg auf einen Maximalwert sowie anschließend einen langsamen Abfall zurück auf den Ausgangswert. Bild 4.49 zeigt einen typischen Verlauf der elektrischen Feldstärke eines elektrischen Feldes vom Typ 2 mit den charakteristischen Parametern. Der Wert E_{start} gibt die Feldstärke zu Beginn der Messung an, die Werte E_{max} und E_{min} jeweils den größten bzw. kleinsten Wert innerhalb der Messung. Die Halbwertsbreiten t_{h1} und t_{h2} geben die Zeitdifferenz zwischen dem Minimal- bzw. Maximalwert und dem 50%-Wert bezogen auf E_{start} an. Die Anstiegszeit des Polaritätswechsels t_{an} wird berechnet als 10%-90%-Anstiegszeit bezogen auf die gesamte Feldänderung $E_{\text{max}} - E_{\text{min}}$.

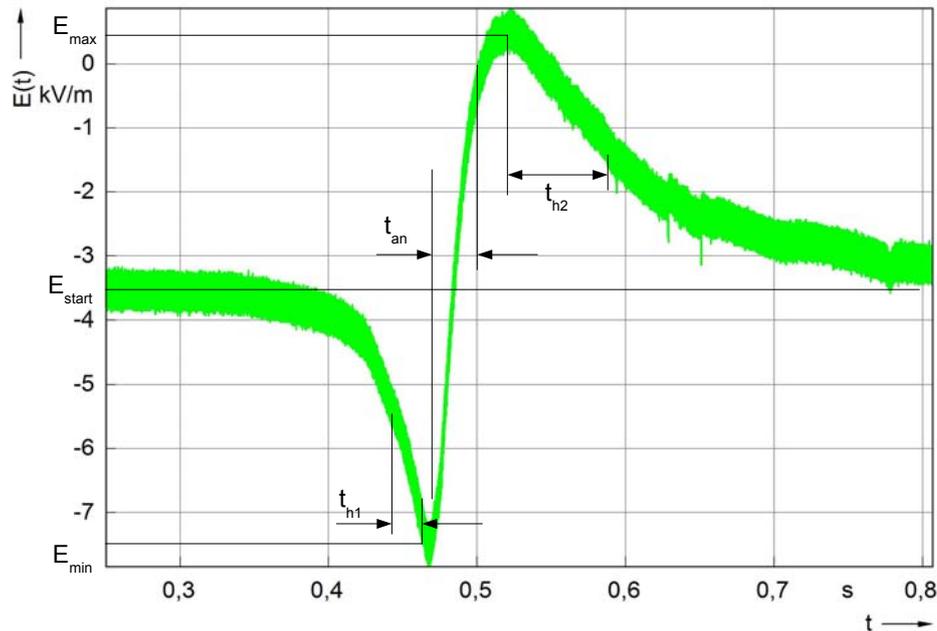


Bild 4.49: Elektrisches Feld vom Typ 2 mit Auswerteparametern

Insgesamt konnten neun Messungen des elektrischen Feldes dem Typ 2 zugeordnet werden. Im Gegensatz zu den Feldern des Typs 1 ist der Verlauf der elektrischen Felder vom Typ 2 typisch für in der Nähe des Turmes stattfindende Entladungsvorgänge, welche die sprunghafte Feldänderung bewirken. Die zugehörigen Blitzströme können somit dem Typ „other-triggered“ zugeordnet werden.

Startwert der elektrischen Feldstärke

Der Startwert der elektrischen Feldstärke ist, von einer Ausnahme abgesehen, durchweg negativ, wobei der Mittelwert $-2,1 \text{ kV/m}$ beträgt. Die Messwerte bewegen sich dabei in einem sehr kleinen Bereich zwischen $+0,8 \text{ kV/m}$ als größtem und $-3,5 \text{ kV/m}$ als kleinstem Startwert.

Maximal- und Minimalwerte, gesamte Feldänderung

Für die Minimalwerte der elektrischen Feldstärke ergaben sich Werte zwischen $-3,7 \text{ kV/m}$ und $-10,4 \text{ kV/m}$ mit einem arithmetischen Mittelwert von $-7,5 \text{ kV/m}$. Die Maximalwerte der elektrischen Feldstärke sind mit einem größten Messwert von $6,6 \text{ kV/m}$ und einem kleinsten Messwert von $-0,6 \text{ kV/m}$ ähnlich verteilt wie die Minimalwerte; der arithmetische Mittelwert beträgt hier $2,5 \text{ kV/m}$. Der Mittelwert der gesamten Änderung der elektrischen Feldstärke $E_{\max} - E_{\min}$ ergibt sich zu $10,0 \text{ kV/m}$, wobei die Einzelwerte zwischen $7,3 \text{ kV/m}$ und $13,8 \text{ kV/m}$ liegen.

Anstiegszeit der Feldänderung

Die Anstiegszeit der Feldänderung unterliegt einer deutlich größeren Streuung als die anderen Parameter. Es ergeben sich Messwerte zwischen 2,6 ms und 82,5 ms sowie ein Mittelwert von 39,8 ms. Die starke Streuung der Messwerte resultiert zum einen aus der Tatsache, dass grundsätzlich Felder mit unterschiedlichen Anstiegszeiten existieren sowie zum anderen daraus, dass einzelne Feldanstiege Abflachungen oder Einsattelungen aufweisen, welche die Anstiegszeit verlängern. Ein Zusammenhang der Anstiegszeit zu den anderen Größen, insbesondere zu der Feldänderung ist nicht feststellbar.

Halbwertsbreiten der Feldänderung

Die Halbwertsbreiten t_{h1} und t_{h2} geben die Dauer des Abfalls der elektrischen Feldstärke vor bzw. nach dem Polaritätswechsel des Feldes an. Für die erste Halbwertsbreite t_{h1} ergeben sich Werte zwischen 12,7 ms und 181,6 ms und ein Mittelwert von 53,0 ms, für die zweite Halbwertsbreite t_{h2} Werte zwischen 47,4 ms und 212,4 ms sowie ein Mittelwert von 139,6 ms. Wiederum ist ein Zusammenhang zu anderen Parametern nicht feststellbar.

Überlagerte Impulse

Ebenso wie bei den elektrischen Feldern des Typs 1 bilden sich Stromimpulse auch in den elektrischen Feldern des Typs 2 ab. Bild 4.50 zeigt am Beispiel von B350 zwei dem elektrischen Feld überlagerte Impulse. Obwohl der zum Zeitpunkt 1,2 s aufgezeichnete Impuls auf den stärksten gemessenen Stoßstrom vom Typ RS-n zurückzuführen ist, welcher eine Stromstärke von 40,8 kA aufweist, ergibt sich eine schnelle Feldänderung von lediglich etwa 10 kV/m.

4.6.1.3 Elektrische Felder vom Typ 3

Die elektrischen Felder vom Typ 3 zeigen in ihrer Grobstruktur ein dem Typ 1 ähnliches Verhalten; der wesentliche Unterschied besteht in der umgekehrten Polarität der Feldänderung. Eine genaue Betrachtung des Beginns der Messung zeigt jedoch, dass im Unterschied zu den elektrischen Feldern vom Typ 1 jene des Typs 3 vor der schnellen Feldänderung keinen konstanten, sondern einen ansteigenden Verlauf aufweisen. Einen für den Typ 3 charakteristischen Verlauf des elektrischen Feldes zeigt Bild 4.51. Da lediglich der zeitliche Verlauf von vier elektrischen Feldern dem Typ 3 zugeordnet werden kann, soll an dieser Stelle auf die Angabe statistischer Größen verzichtet werden. Die Startwerte der elektrischen Feldstärke liegen zwischen -2,3 kV/m und 7,7 kV/m, wobei ein Trend zu positiven Werten erkennbar ist. Die Abfallzeit des elektrischen Feldes ist mit Werten um 1 ms we-

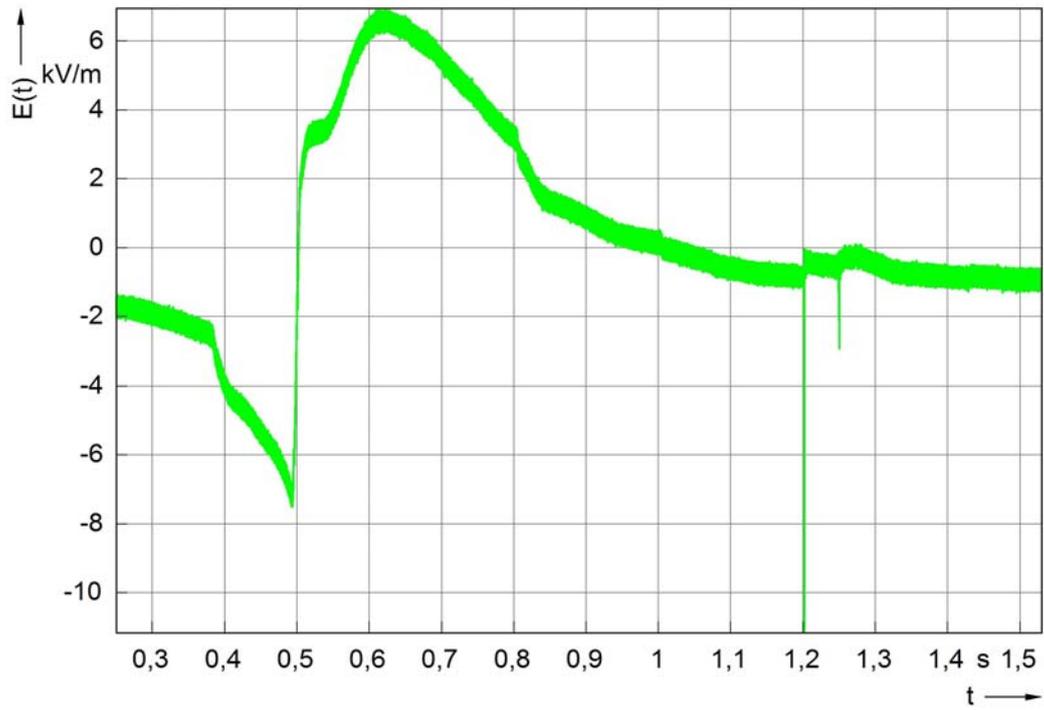


Bild 4.50: Dem elektrischen Feld vom Typ 2 überlagerte Impulse (B350)

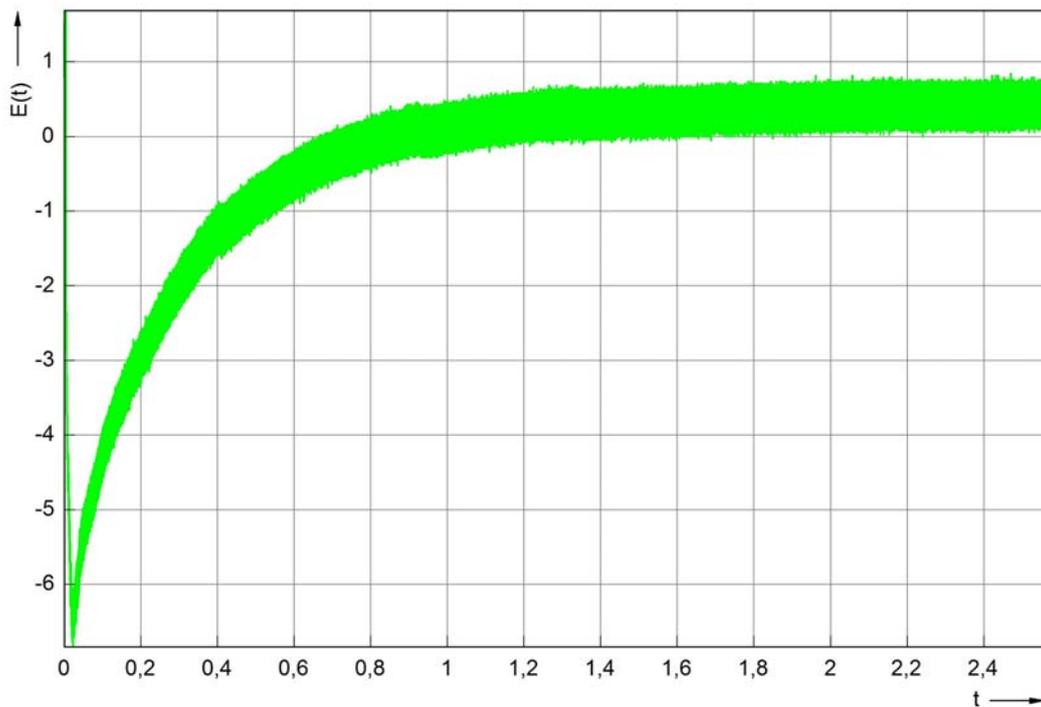


Bild 4.51: Elektrisches Feld vom Typ 3

sentlich kleiner als bei den elektrischen Feldern der Typen 1 und 2; die Rückenhalbwertszeit dagegen ist mit Werten zwischen 250 ms und mehr als 2500 ms deutlich größer. Die Feldänderung liegt mit Werten um 10 kV/m deutlich unter den Werten für elektrische Felder des Typs 1.

4.6.1.4 Elektrische Felder mit anderem Verlauf

Insgesamt sieben Messungen des elektrischen Feldes konnten keinem der drei zuvor aufgeführten Typen eindeutig zugeordnet werden. Sie weisen entweder einen grundsätzlich anderen Verlauf auf oder ergeben sich als teilweise Überlagerung verschiedener typisierter Feldverläufe.

4.6.2 Messung des langsam veränderlichen elektrischen Feldes

Die Messung des langsam veränderlichen elektrischen Feldes erfolgt entsprechend Abschnitt 3.4.3.5 mit einer Feldmühle. Aufgrund der niedrigen oberen Grenzfrequenz kann mit dieser Messeinrichtung das schnell veränderliche elektrische Feld nicht aufgezeichnet werden. Stattdessen ist es möglich, die langsam veränderlichen Komponenten des elektrischen Feldes über eine Dauer von 6,4 s aufzuzeichnen. Insgesamt konnten 34 Messungen des langsam veränderlichen elektrischen Feldes durchgeführt werden. Da die Messergebnisse, die aus den beiden Verfahren stammen, eine gute Übereinstimmung zeigen, soll an dieser Stelle auf eine weitere Auswertung verzichtet werden.

4.6.3 Zusammenfassung

In den folgenden Tabellen 14 bis 16 sind die Parameter aller Messungen des elektrischen Feldes zusammengestellt.

Größe	Minimalwert	Maximalwert	Geom. Mittelwert
Maximale Feldstärke	18,6 kV/m	41,6 kV/m	24,0 kV/m
Anstiegszeit	7,2 ms	22,3 ms	12,5 ms
Rückenhalbwertszeit	89,1 ms	400,5 ms	178,3 ms

Tabelle 14: Zusammenfassung der Parameter der elektrischen Felder vom Typ 1

Größe	Minimalwert	Maximalwert	Geom. Mittelwert
Startwert Feldstärke	- 3,4 kV/m	0,8 kV/m	-
1. Halbwertszeit	12,7 ms	181,6 ms	38,2 ms
Feldänderung	7,3 kV/m	13,8 kV/m	9,9 kV/m
Anstiegszeit	2,6 ms	82,6 ms	24,0 ms
2. Halbwertszeit	47,4 ms	212,4 ms	129,3 ms

Tabelle 15: Zusammenfassung der Parameter der elektrischen Felder vom Typ 2

Größe	Minimalwert	Maximalwert	Geom. Mittelwert
Startwert Feldstärke	-2,3 kV/m	7,7 kV/m	-
Feldänderung	5,6 kV/m	13,5 kV/m	7,9 kV/m
Abfallzeit	0,4 ms	14,2 ms	1,9 ms

Tabelle 16: Zusammenfassung der Parameter der elektrischen Felder vom Typ 3

4.7 Messung des magnetischen Feldes

4.7.1 Magnetisches Feld der Stoßströme vom Typ RS-n

Für die Stoßströme des Typs RS-n sind die zugehörigen magnetischen Felder über den gesamten Zeitraum der Messwertaufzeichnung den Strömen proportional. Beispielhaft zeigt Bild 4.52 den zeitlichen Verlauf von Strom und magnetischem Feld des Stoßstromes B331-1. Deutlich ist neben dem ersten Strommaximum ein

zweites (Neben-)Maximum im Abstand von 175 μs zu erkennen, welches aus der Entladung eines weiteren Ladungszentrums in der Wolke resultiert.

Aufgrund der zueinander proportionalen Verläufe von Strom und magnetischem Feld wurde versucht, den Wert des magnetischen Feldes H aus der Stromstärke i gemäß

$$H(t) = \frac{i(t)}{2\pi s_{\text{korr}}} \quad (64)$$

anstelle der Verwendung der vollständigen Gleichungen gemäß Abschnitt 2.3 zu berechnen.

Der Abstand s_{korr} ergibt sich dabei aus dem tatsächlichen Luftlinienabstand zwischen Fernmeldeturm und Messkabine, berichtigt um einen Faktor, welcher zwei Gegebenheiten beinhaltet.

Zum einen werden die Geländebeziehungen wie Erdaufschüttungen, Bäume und Bauwerke auf der Strecke zwischen Turm und Messkabine berücksichtigt, welche das magnetische Feld beeinflussen. Zum anderen gilt Gleichung (64) nur für einen unendlich langen, geraden Leiter. Der an der Turmspitze endende Blitzkanal hat jedoch eine endliche Leitfähigkeit und verläuft im Allgemeinen nicht gerade in Verlängerung des Turmes sondern ist verzweigt und kann in fast beliebige Richtungen weisen. Entsprechend der Richtung, welche der Blitzkanal über dem Turm und damit auch der Messkabine hat, ergibt sich an der Feldsonde eine Erhöhung oder eine Abschwächung des magnetischen Feldes.

Für die vorhandenen Blitzströme vom Typ RS-n ergibt sich ein Mittelwert \bar{s}_{korr} von 192 m. Vergleicht man diesen Wert mit der tatsächlichen Entfernung $s_{\text{Turm-Messkabine}} = 175$ m, so zeigt sich, dass eine gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung besteht und die vereinfachende Abschätzung zulässig ist.

4.7.2 Magnetisches Feld der Stoßströme vom Typ IS-n

Auch für die Stoßströme des Typs IS-n zeigt sich die exakte zeitliche Übereinstimmung des Verlaufs von Strom und magnetischem Feld. Die den Stoßströmen des Typs IS-n unterlagerten Langzeitströme liegen mit ihrer zeitlichen Dauer von einigen 100 ms unter der unteren Grenzfrequenz des $H(t)$ -Sensors und werden von diesem somit nicht erfasst.

Bild 4.53 zeigt beispielhaft die zeitlich koordinierte Darstellung des Verlaufs von Strom und magnetischem Feld anhand der Blitzmessung B341. Deutlich sind der Langzeitstrom, die überlagerten Impulse des Typs IS-n sowie der zugehörige Verlauf des magnetischen Feldes erkennbar.

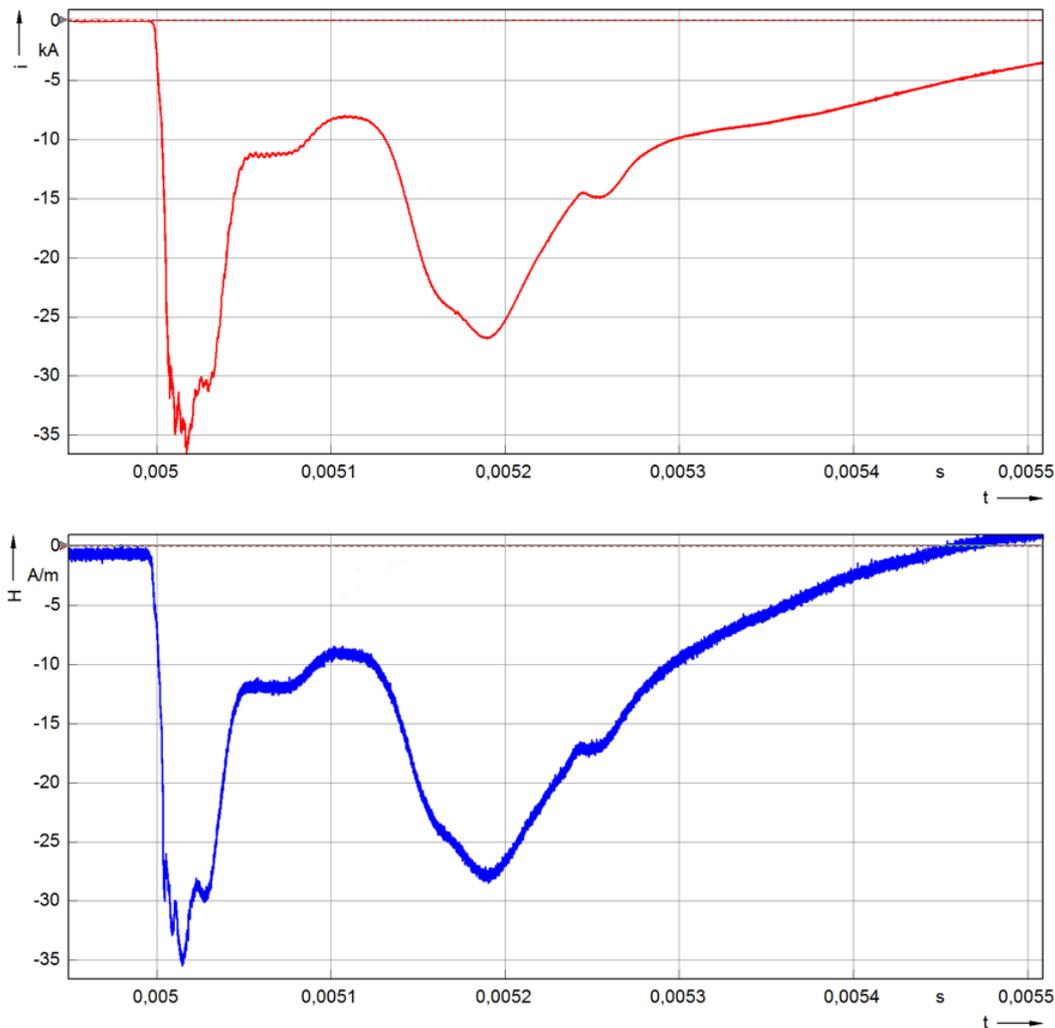


Bild 4.52: Zeitlicher Verlauf von Strom (oben) und magnetischem Feld (unten) der Blitzmessung B331-1

4.7.3 Zusammenfassung

Für alle Stoßstromkomponenten der Blitzströme konnte mit dem vorliegenden Messaufbau die direkte proportionale Abhängigkeit zwischen Strom und magnetischem Feld bestätigt werden. Aufgrund der Tatsache, dass auch der zeitliche Verlauf der magnetischen Felder übereinstimmt, können die in Abschnitt 4.2.2 aufgeführten Auswertungen direkt auf die magnetischen Felder übertragen werden.

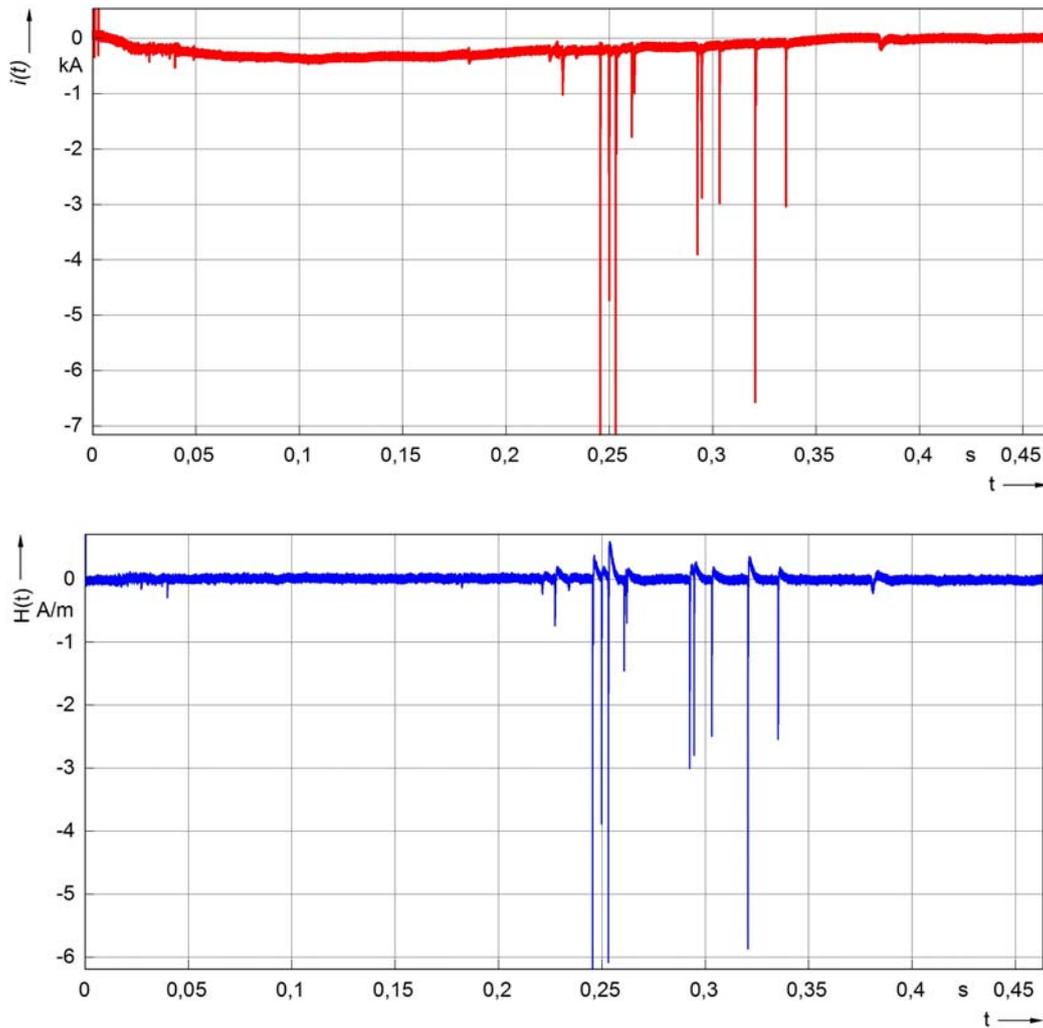


Bild 4.53: Zeitlicher Verlauf von Strom (oben) und magnetischem Feld (unten) der Blitzmessung B341

Die magnetischen Felder der Langzeitströme weisen eine zu große zeitliche Dauer auf, um mit der verwendeten magnetischen Feldsonde gemessen werden zu können. Auch eine Messung mit dem Sensor für die Änderung des magnetischen Feldes ist aufgrund der geringen Werte für die zeitliche Feldänderung dH/dt nicht möglich.

4.8 Messung der in einer Freileitung induzierten Spannung

Für die in eine Leiterschleife eingekoppelte Spannung gilt allgemein folgender Zusammenhang:

$$u_{\text{ind}} = -\frac{d}{dt} (\vec{B} \circ \vec{A}) \quad (65)$$

Die magnetische Flussdichte B ergibt sich dabei aus der magnetischen Feldstärke H zu:

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \quad (66)$$

Aus den beiden Gleichungen (65) und (66) ergibt sich die Abhängigkeit der induzierten Spannung von der zeitlichen Änderung der magnetischen Feldstärke sowie von der Fläche, welche zwischen der Freileitung und dem Erdboden aufgespannt wird. Bei einer Länge des Freileitungsseils von etwa 140 m und einer mittleren Höhe des Seils von 5 m ergibt sich für diese Fläche ein Näherungswert von 700 m². Zu berücksichtigen ist hierbei noch die Lage der Fläche im Bezug zum Turm und damit in erster Näherung zum Blitzkanal. Bild 3.1 zeigt die Leiterstrecke, welche in einer Entfernung von 60 m zum Turm beginnt und zu einer vom Turm aus gezogenen radialen Linie einen Winkel von 120° bildet. Somit ergibt sich eine effektive Fläche der Leiterschleife von etwa 350 m².

4.8.1 Stoßströme vom Typ IS-n

4.8.1.1 Zeitlicher Verlauf der eingekoppelten Spannung

Die Stoßströme des Typs IS-n weisen entsprechend Abschnitt 4.3 Schwingungen in ihrem Anfangsbereich auf. Diese hochfrequenten Stromanteile verursachen eine große zeitliche Änderung des magnetischen Feldes, was wiederum eine hohe eingekoppelte Spannung bewirkt.

Einen typischen Verlauf der durch einen Stoßstrom vom Typ IS-n eingekoppelten Spannung zeigt Bild 4.54. Durch die erste Schwingung im Stirnbereich ergibt sich für diesen Stoßstromtyp immer ein bipolarer Verlauf der eingekoppelten Spannung.

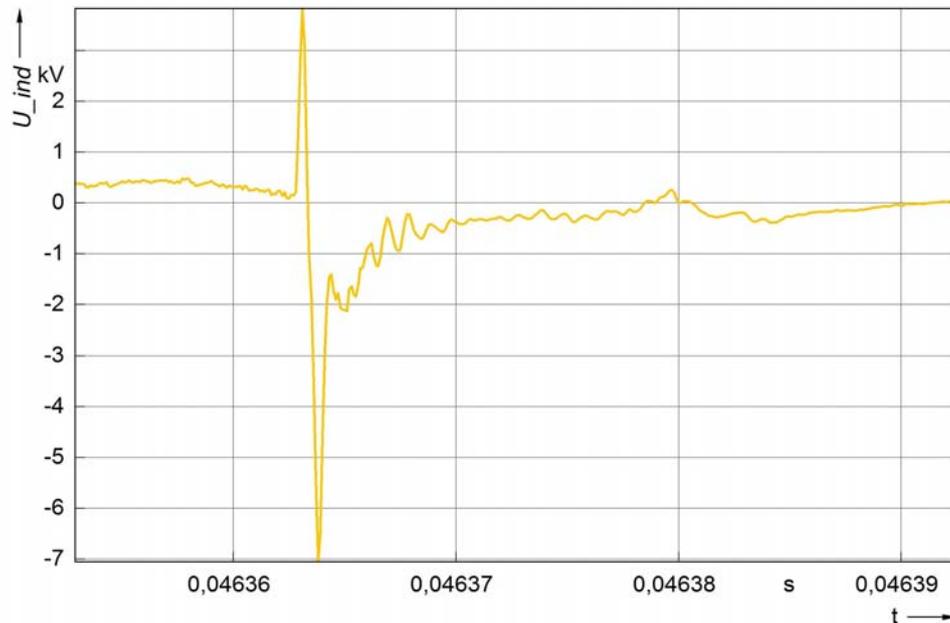


Bild 4.54: Zeitlicher Verlauf der eingekoppelten Spannung infolge eines Stoßstromes vom Typ IS-n (Blitzmessung B334)

4.8.1.2 Maximalwert der eingekoppelten Spannung

Das Histogramm in Bild 4.55 zeigt die Verteilung des Maximalwertes der eingekoppelten Spannung. Dabei wird bei den bipolaren Spannungsverläufen jeweils nur der größere der beiden (positiven bzw. negativen) Maximalwerte berücksichtigt. Außerdem werden induzierte Spannungen von weniger als 0,25 kV nicht in der statistischen Auswertung berücksichtigt.

Der arithmetische Mittelwert der 40 Spannungsmessungen beträgt 1,7 kV, der geometrische Mittelwert beträgt 1,2 kV. Aufgrund der vergleichsweise großen Streuung der Messwerte beträgt die Standardabweichung 1,6 kV.

4.8.2 Stoßströme vom Typ RS-n

4.8.2.1 Zeitlicher Verlauf der eingekoppelten Spannung

Bei den durch Stoßströme des Typs RS-n induzierten Spannungen lassen sich zwei Typen zeitlicher Verläufe unterscheiden.

Ströme des Typs RS-n, welche Aufwärtsblitzen zugeordnet werden können, weisen starke Schwingungen im Stirnbereich des Stromes auf. Diese bewirken einen

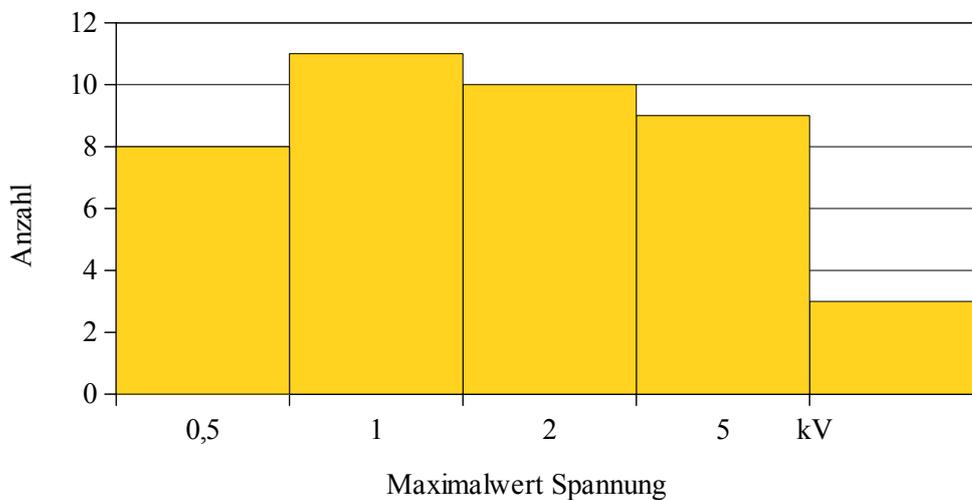


Bild 4.55: Histogramm für die Verteilung der Maximalwerte der induzierten Spannungen bei Stoßströmen des Typs IS-n

hohen Wert der magnetischen Feldänderung und somit hohe Werte der eingekoppelten Spannungen. Der grundsätzliche Verlauf dieser eingekoppelten Spannungen entspricht jenen bei Stoßströmen des Typs IS-n, also ein bipolarer Verlauf mit einem ersten positiven Maximum.

Bei Strömen ohne Schwingungen im Stirnbereich zeigt sich im Gegensatz dazu kein ausgeprägtes bipolares Verhalten. Dominierend ist hier der starke Anstieg im Stirnbereich des Stromes. Dieser Verlauf der eingekoppelten Spannung konnte in Übereinstimmung mit Abschnitt 4.3 bei Abwärtsblitzen, welche keine ausgeprägte Schwingung aufweisen, beobachtet werden. Bild 4.56 zeigt einen typischen Verlauf der eingekoppelten Spannung dieses Typs.

4.8.2.2 Maximalwert der eingekoppelten Spannung

Insgesamt konnten im Zusammenhang mit Stoßströmen des Typs RS-n 24 Datensätze für die eingekoppelte Spannung aufgezeichnet werden. Die Messwerte bewegen sich dabei zwischen 4,5 kV und 25,0 kV, der arithmetische Mittelwert beträgt 15,7 kV, der geometrische Mittelwert 14,0 kV und die Standardabweichung 6,7 kV. Im Vergleich mit den Stoßströmen des Typs IS-n ergeben sich Werte für die eingekoppelte Spannung, welche etwa eine Größenordnung darüber liegen. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit den im Abschnitt 4.2.2.6 angegebenen Messwerten für die Stromsteilheit, welche bei Stoßströmen des Typs RS-n ebenfalls eine Größenordnung über jenen des Typs IS-n liegt und die Höhe der eingekoppelten Spannung direkt beeinflusst.

4.8.3 Stoßströme vom Typ M

Da nur eine sehr geringe Anzahl an Messwerten für Stoßströme des Typs M aufgezeichnet werden konnte, ist eine vollständige statistische Auswertung nicht möglich. Es soll jedoch erwähnt werden, dass sich für die eingekoppelten Spannungen infolge eines Stoßstromes vom Typ M Messwerte in derselben Größenordnung ergaben, wie sie bei Stoßströmen vom Typ RS auftraten. Der Grund hierfür ist wiederum der steile Anstieg des Stromes bei den beiden Typen.

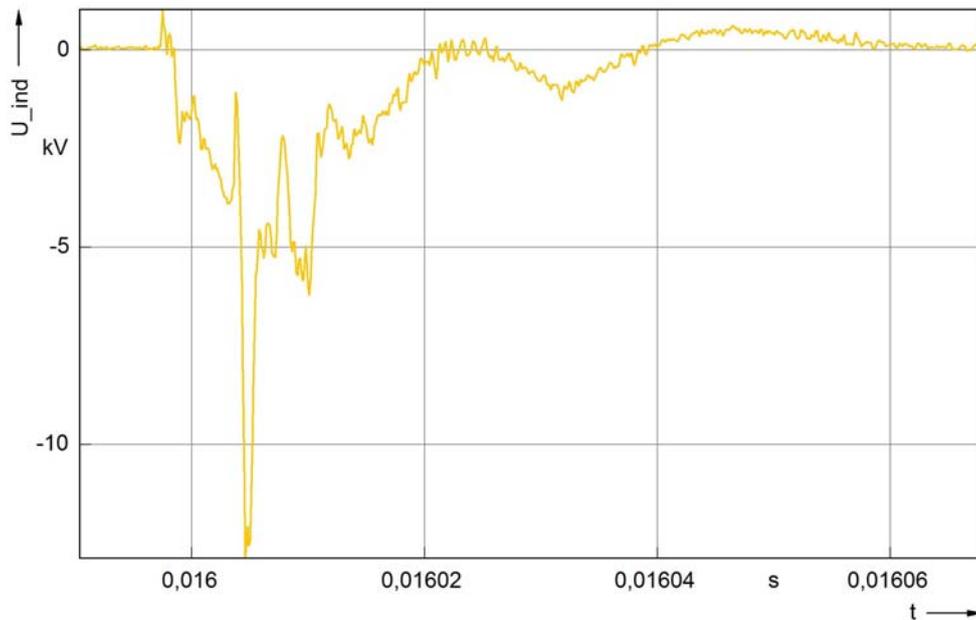


Bild 4.56: Zeitlicher Verlauf der eingekoppelten Spannung infolge eines Stoßstromes vom Typ RS-n (Abwärtsblitz B331)

4.8.4 Zusammenfassung

Aus den Messergebnissen für Strom und magnetisches Feld lassen sich die Messwerte für die eingekoppelte Spannung auf ihre grundsätzliche Richtigkeit überprüfen. Die Zusammenfassung der Gleichungen (64), (65) und (66) ergibt für die eingekoppelte Spannung

$$u_{ind} = \frac{d}{dt}(\vec{B} \circ \vec{A}) = \frac{\mu_0 A}{2 \pi s_{kor}} \cdot \frac{di}{dt} \quad (67)$$

Mit den geometrischen Werten $A = 350 \text{ m}^2$ und $s_{kor} = 192 \text{ m}$ sowie einer Stromsteilheit von $16 \text{ kA}/\mu\text{s}$ ergibt sich eine eingekoppelte Spannung $u_{ind} = 5,8 \text{ kV}$.

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass es sich bei der Stromsteilheit um den maximal gemessenen Wert der mittleren Stromsteilheit handelt, die maximale Stromsteilheit eines Blitzstromes aber deutlich darüber liegt.

Somit lassen sich aus den Messungen der eingekoppelten Spannung folgende Erkenntnisse gewinnen. Zum einen zeigt sich bei Betrachtung der Ergebnisse in Verbindung mit den Messungen des Blitzstromes, dass die Messmethode korrekt ist, die Messeinrichtung zufriedenstellende Ergebnisse liefert und diese mit den Strommessungen in Einklang stehen. Zum anderen zeigen die Werte die nicht zu vernachlässigende Bedrohung, welche nahe Blitzeinschläge für elektrische Einrichtungen bedeuten.

5 Zusammenfassung

Mit der vorliegenden Arbeit liegt eine umfassende Beschreibung des Aufbaus, der Funktion und der zugrunde liegenden Auslegungskriterien der Blitzmessstation auf dem Hohen Peißenberg vor. Bei der Ausstattung wurde Wert gelegt auf eine einfach zu wartende und leicht auf dem aktuellen Erkenntnisstand zu haltende Technik. Dadurch hat sich die Messstation auf dem Hohen Peißenberg zu einer Art Referenz für derartige Messungen entwickelt.

Die installierte Messtechnik erlaubt die Messung der Hauptgrößen Blitzstrom, elektrisches Feld und magnetisches Feld sowie deren jeweilige zeitliche Ableitungen mit einer Auflösung von 14 bzw. 12 bit und einem Abtastintervall von 10 ns bzw. 5 ns. Zusätzliche Messeinrichtungen ermöglichen die Messung des quasioelektrostatischen Feldes, die Messung der in einer Freileitung eingekoppelten Spannung sowie die schnelle Videoaufzeichnung des Blitzereignisses.

Vom Beginn der Messungen im Oktober 2008 bis zum 31.12.2012 konnten schließlich 53 einzelne Blitzereignisse mit insgesamt 35 Langzeitströmen und 175 Stoßströmen der verschiedenen Typen aufgezeichnet werden.

Die auch bei früheren Messungen im Stirnbereich der Stoßströme beobachteten Schwingungen ließen sich auch in den aktuellen Messungen wiederfinden. Bislang wurde davon ausgegangen, dass es sich hierbei um einen fehlerhaften Aufbau des Messsystems handelt. Es konnte gezeigt werden, dass die Schwingungen durch Resonanzen des Turmbauwerks entstehen, welche sich beim Einschlag sowohl in die Hauptfangstange als auch in die Nebenfangstangen ergeben. Dazu wurde ein dreidimensionales Computermodell des Fernmeldeturms erstellt und die Ergebnisse bei Beaufschlagung mit einem Blitzstrom mit den Messungen verglichen.

Die elektrischen Felder konnten anhand ihres Verlaufs in drei Haupttypen eingeteilt werden, denen unterschiedliche Arten der Einschlagmechanismen und -punkte zugewiesen werden konnten. Aufgrund der noch vergleichsweise geringen Anzahl von Feldmessungen ist eine vollständige statistische Auswertung noch nicht statthaft, was sich jedoch in den folgenden Betriebsjahren ändern wird.

Bei der Messung des magnetischen Feldes zeigte sich bei Vergleich mit der Messung des zugehörigen Blitzstromes, dass sich auch bei der Anwendung eines stark vereinfachten Zusammenhangs zwischen Feld und Strom eine sehr gute Überein-

stimmung zwischen Messung und Rechnung erzielt werden konnte.

Obwohl die Grundkonfiguration der Messstation nun im Produktivbetrieb läuft und sich keine nennenswerten Schwierigkeiten ergeben haben, lassen sich Ansatzpunkte für zukünftige Verbesserungen und Erweiterungen angeben. Neben einer mechanischen Anpassung des Kameragehäuses an der Feldmesskabine wäre etwa die Installation einer Kamera an der Turmspitze denkbar, welche die genaue Feststellung des Fußpunktes eines Blitzeinschlags ermöglicht. Der wesentliche Aufwand besteht jedoch in der Realisierung des täglichen Betriebs und der damit verbundenen kontinuierlichen Aktualisierung und Verbesserung, um die Blitzmessstation auf dem Hohen Peißenberg auch in Zukunft in der „ersten Liga“ derartiger Einrichtungen weltweit zu halten.

Anhang

A1 Tabellen der Messwerte

A1.1 Langzeitströme

B-Nr.	Maximalwert Strom	Polarität	Ladung	Dauer
	A		C	ms
B300	-584	negativ	-202	672,0
B301	-467	negativ	-117	376,2
B301	-659	negativ	-71	194,4
B302	-795	negativ	-205	486,4
B303	981	positiv	3	9,5
B303	-683	negativ	-107	321,1
B304	-706	negativ	-81	289,8
B305	-275	negativ	-17	145,4
B306	-269	negativ	-19	125,9
B308	-1291	negativ	-41	161,8
B309	-1495	negativ	-47	149,4
B313	-549	negativ	-2	18,8
B326	-494	negativ	-11	139,2
B327	-107	negativ	-10	109,9
B328	-159	negativ	-10	274,8
B330	-520	negativ	-39	210,3
B333	-442	negativ	-41	320,1
B334	-266	negativ	-20	302,8
B335	-756	negativ	-54	304,0
B336	-77	negativ	-1	135,4
B337	-694	negativ	-117	390,1
B338	-379	negativ	-48	270,2
B339	-386	negativ	-53	375,0

B-Nr.	Maximalwert Strom	Polarität	Ladung	Dauer
	A		C	
B340	-80	negativ	-6	363,0
B341	-374	negativ	-124	548,8
B342	-292	negativ	-14	106,6
B343	-172	negativ	-20	193,4
B344	-622	negativ	-3	38,6
B345	-110	negativ	-13	244,0
B346	-202	negativ	-95	384,8
B347	-445	negativ	-77	640,6
B348	-96	negativ	-18	327,8
B350	-847	negativ	-130	421,2
B351	-401	negativ	-88	407,7
B352	-170	negativ	-18	220,1

A1.2 Stoßströme

B-Nr.		Startwert	Typ	Polarität	Anstiegszeit	Maximalwert	Halbwertsbreite
		A			μs	A	μs
B300	1	-205	IS	negativ	2,07	-685	5,1
B300	2	-495	IS	negativ	1,98	-710	5,2
B300	3	-405	IS	negativ	2,05	-716	5,1
B300	4	-537	IS	negativ	1,99	-1672	5,4
B300	5	-560	IS	negativ	1,99	-703	6,0
B300	6	-510	IS	negativ	2,01	-1442	5,7
B300	7	-488	IS	negativ	1,96	-1780	5,9
B300	8	-480	IS	negativ	1,91	-2065	3,4
B300	9	-497	IS	negativ	2,00	-2884	21,5
B300	10	-445	IS	negativ	1,98	-5927	31,1
B300	11	-455	IS	negativ	2,04	-1190	9,2
B300	12	-410	IS	negativ	1,92	-2210	18,4
B300	13	-452	IS	negativ	52,21	-1240	48,1
B300	14	-413	IS	negativ	2,73	-1501	32,2

B-Nr.	Startwert	Typ	Polarität	Anstiegszeit	Maximalwert	Halbwertsbreite	
	A			μs	A	μs	
B300	15	-529	IS	negativ	42,00	-786	62,1
B300	16	-567	IS	negativ	17,01	-722	37,2
B300	17	-519	IS	negativ	2,46	-1100	45,5
B300	18	-525	IS	negativ	53,10	-384	49,6
B300	19	-577	IS	negativ	7,57	-755	34,5
B300	20	-563	IS	negativ	36,93	-750	41,1
B300	21	-487	IS	negativ	4,74	-1763	43,1
B300	22	-518	IS	negativ	4,48	-1017	43,6
B300	23	-459	IS	negativ	3,22	-4505	38,4
B300	24	-471	IS	negativ	3,46	-2554	41,9
B300	25	-510	IS	negativ	17,71	-2582	43,4
B300	26	-470	IS	negativ	2,08	-1312	46,8
B300	27	-495	IS	negativ	4,52	-2013	50,5
B300	28	-469	IS	negativ	7,12	-789	51,9
B300	29	-496	IS	negativ	33,70	-394	65,5
B300	30	-494	IS	negativ	1,99	-475	40,8
B300	31	-495	IS	negativ	63,90	-588	70,8
B300	32	-529	IS	negativ	73,89	-326	82,2
B300	33	-600	IS	negativ	1,53	-577	46,1
B300	34	-689	IS	negativ	4,44	-7708	49,8
B300	35	-468	IS	negativ	49,40	-984	65,4
B300	36	-462	IS	negativ	50,96	-478	64,3
B300	37	-432	IS	negativ	16,08	-517	39,9
B300	38	-211	IS	negativ	4,21	-1338	35,5
B300	39	-244	IS	negativ	1,88	-2876	29,3
B300	40	-223	IS	negativ	1,94	-3419	27,3
B301	1	-255	IS	negativ	63,55	-373	37,9
B301	2	-302	IS	negativ	7,49	-341	110,2
B301	3	-400	IS	negativ	1,91	-2378	14,3
B301	4	-429	IS	negativ	97,74	-453	173,3

B-Nr.		Startwert	Typ	Polarität	Anstiegszeit	Maximalwert	Halbwertsbreite
		A			μs	A	μs
B301	5	0	RS	negativ	2,14	-16110	65,1
B302	1	-202	IS	negativ	5,62	-373	75,4
B302	2	-507	IS	negativ	46,78	-548	82,5
B302	3	-733	IS	negativ	3,21	-2437	56,4
B302	4	-664	IS	negativ	46,41	-599	138,6
B302	5	-587	IS	negativ	34,06	-2479	56,4
B302	6	-594	IS	negativ	68,18	-675	135,9
B302	7	-600	IS	negativ	2,27	-5560	49,2
B302	8	-520	IS	negativ	34,60	-1125	94,6
B302	9	-460	IS	negativ	34,75	-569	104,7
B302	10	-495	IS	negativ	29,43	-1214	178,3
B302	11	-644	IS	negativ	60,83	-374	131,3
B302	12	-758	IS	negativ	2,02	-12743	49,5
B302	13	-668	IS	negativ	1,94	-7295	57,3
B302	14	-688	IS	negativ	1,95	-4436	47,4
B302	15	-727	IS	negativ	1,99	-5458	50,8
B302	16	-707	IS	negativ	32,50	-1266	57,5
B302	17	-615	IS	negativ	1,84	-1802	31,6
B302	18	-700	IS	negativ	2,02	-4585	59,4
B302	19	-617	IS	negativ	1,97	-3055	28,0
B302	20	-621	IS	negativ	2,15	-5352	55,2
B302	21	-743	IS	negativ	34,38	-3323	97,5
B302	22	-641	IS	negativ	1,89	-15769	70,4
B302	23	-312	IS	negativ	1,82	-4177	21,4
B302	24	-289	IS	negativ	2,02	-3474	29,5
B303	1	-545	IS	negativ	35,06	-1020	63,7
B303	2	-498	IS	negativ	24,92	-297	75,1
B303	3	-463	IS	negativ	33,15	-322	79,9
B303	4	-422	IS	negativ	18,94	-347	74,8
B303	5	-370	IS	negativ	12,86	-1229	72,0

B-Nr.	Startwert	Typ	Polarität	Anstiegszeit	Maximalwert	Halbwertsbreite	
	A			μs	A	μs	
B303	6	-383	IS	negativ	19,60	-498	104,8
B303	7	-378	IS	negativ	15,35	-1127	64,2
B303	8	-501	IS	negativ	75,01	-571	117,1
B303	9	-509	IS	negativ	31,04	-542	80,1
B303	10	-490	IS	negativ	69,24	-792	72,9
B303	11	-438	IS	negativ	12,87	-1285	110,3
B303	12	-433	IS	negativ	16,00	-584	92,4
B303	13	-457	IS	negativ	39,55	-397	123,9
B303	14	-463	IS	negativ	91,60	-313	104,6
B303	15	470	IS	positiv	322,56	561	545,6
B303	16	-413	IS	negativ	157,06	-357	138,1
B303	17	-318	IS	negativ	70,14	-422	294,4
B313	1	0	RS	positiv	50,50	666	254,7
B313	2	-20	M	positiv	18,18	302	354,9
B313	3	0	M	positiv	80,08	1148	196,2
B313	4	0	M	positiv	77,21	875	230,5
B326	1	0	RS	negativ	12,57	-1581	81,6
B327	1	-547	IS	negativ	7,48	-3338	25,2
B327	2	-718	IS	negativ	9,21	-3861	22,0
B327	3	0	RS	negativ	2,55	-2353	41,2
B327	4	0	RS	negativ	1,97	-4249	12,5
B330	1	-195	IS	negativ	27,00	-457	131,3
B330	2	-287	IS	negativ	53,19	-300	153,1
B331	1	0	RS	negativ	9,39	-35759	222,5
B334	1	-125	IS	negativ	2,12	-587	7,6
B334	2	-103	IS	negativ	2,74	-1357	15,6
B334	3	-119	IS	negativ	18,43	-821	27,3
B334	4	-183	IS	negativ	2,18	-3757	21,5
B334	5	-207	IS	negativ	2,00	-820	34,6
B334	6	-240	IS	negativ	1,94	-3929	14,3

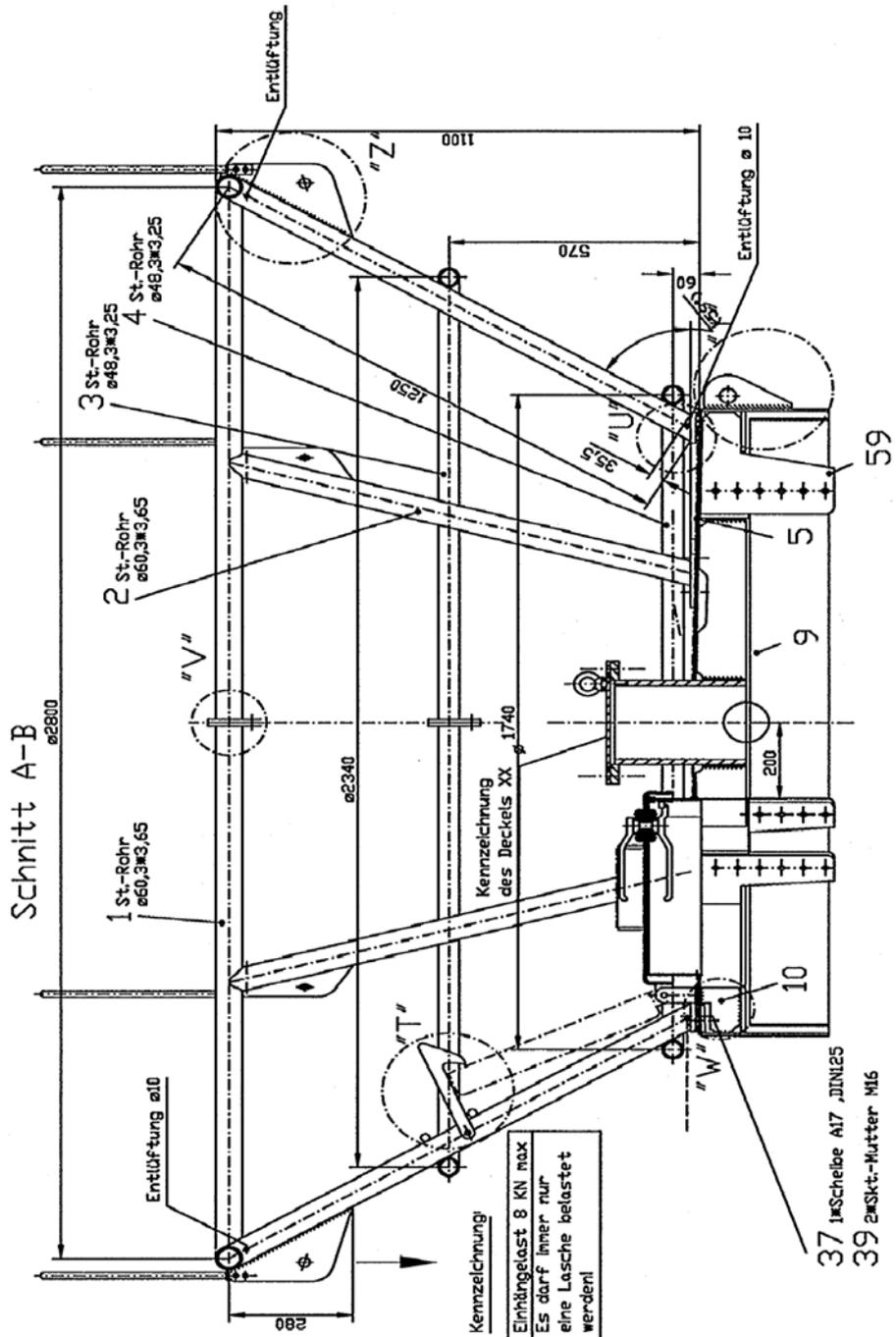
B-Nr.		Startwert	Typ	Polarität	Anstiegszeit	Maximalwert	Halbwertsbreite
		A			μs	A	μs
B334	7	-272	IS	negativ	2,05	-2345	38,0
B334	8	-265	IS	negativ	2,04	-1532	18,4
B334	9	-264	IS	negativ	2,15	-2161	21,7
B335	1	-95	IS	negativ	16,95	-1727	58,7
B339	1	-135	IS	negativ	12,45	-1162	10,3
B339	2	-155	IS	negativ	8,58	-2306	14,2
B339	3	-226	IS	negativ	8,74	-1850	18,2
B339	4	-264	IS	negativ	12,29	-881	43,8
B339	5	-361	IS	negativ	8,95	-2457	25,3
B339	6	-313	IS	negativ	34,76	-519	69,4
B339	7	-288	IS	negativ	19,90	-1024	69,3
B339	8	-258	IS	negativ	108,04	-1275	134,1
B339	9	-232	IS	negativ	50,60	-491	131,4
B341	1	-236	IS	negativ	147,75	-710	263,7
B341	2	-254	IS	negativ	3,70	-6318	53,0
B341	3	-231	IS	negativ	4,46	-3973	49,5
B341	4	-221	IS	negativ	3,25	-6063	60,3
B341	5	-203	IS	negativ	4,68	-3000	50,3
B341	6	-210	IS	negativ	10,00	-2579	63,4
B341	7	-149	IS	negativ	5,09	-2456	49,9
B341	8	-132	IS	negativ	4,94	-5742	52,8
B341	9	-113	IS	negativ	5,12	-2469	50,1
B343	1	0	RS	negativ	30,87	-2996	75,9
B343	2	0	RS	negativ	5,81	-5247	40,0
B343	3	0	RS	negativ	7,91	-3116	40,7
B343	4	0	RS	negativ	23,55	-2162	76,1
B343	5	0	RS	negativ	1,98	-5691	28,1
B343	6	0	RS	negativ	2,00	-14810	47,1
B343	7	0	RS	negativ	2,48	-10190	20,1
B343	8	0	RS	negativ	1,67	-3521	9,9

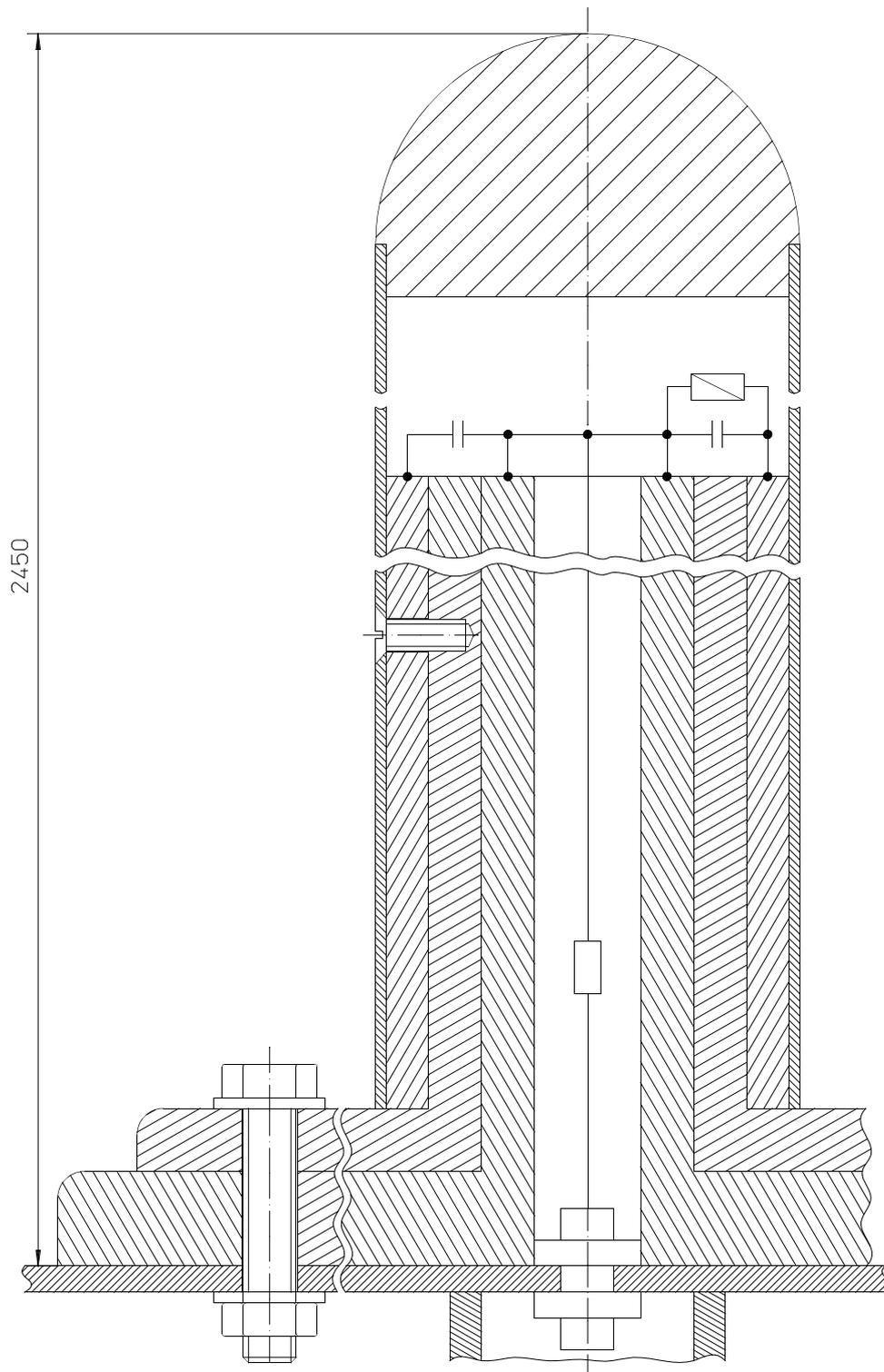
B-Nr.	Startwert	Typ	Polarität	Anstiegszeit	Maximalwert	Halbwertsbreite	
	A			μs	A	μs	
B343	9	0	RS	negativ	1,78	-9549	24,2
B343	10	0	RS	negativ	1,66	-4793	18,8
B343	11	0	RS	negativ	1,67	-8688	21,0
B343	12	0	RS	negativ	2,73	-17917	28,5
B343	13	0	RS	negativ	1,81	-11377	15,6
B343	14	0	RS	negativ	1,80	-10968	13,5
B345	1	-68	IS	negativ	36,82	-903	110,4
B345	2	-73	IS	negativ	34,30	-1966	145,8
B345	3	-46	IS	negativ	29,95	-1631	73,1
B345	4	-84	IS	negativ	27,62	-2091	65,7
B345	5	0	RS	negativ	4,91	-8941	12,3
B345	6	0	RS	negativ	4,88	-10121	11,3
B345	7	0	RS	negativ	8,62	-5425	15,8
B346	1	-203	IS	negativ	64,80	-571	188,2
B346	2	-214	IS	negativ	67,21	-601	192,6
B346	3	-155	IS	negativ	81,42	-691	252,0
B346	4	-176	IS	negativ	52,15	-859	184,9
B346	5	0	RS	negativ	22,02	-4779	56,2
B346	6	0	RS	negativ	1,13	-14355	24,4
B347	1	-176	IS	negativ	18,90	-3803	84,9
B347	2	-235	IS	negativ	23,11	-1551	105,3
B347	3	-230	IS	negativ	29,56	-1234	94,1
B347	4	-198	IS	negativ	19,19	-2988	114,1
B347	5	-209	IS	negativ	14,10	-2837	71,4
B347	6	-445	IS	negativ	14,20	-2794	79,4
B347	7	-181	IS	negativ	5,40	-1776	87,5
B347	8	0	RS	negativ	1,20	-16388	29,1
B347	9	0	RS	negativ	1,19	-13373	20,7
B347	10	0	RS	negativ	0,93	-15149	18,8
B347	11	0	RS	negativ	1,37	-15873	11,1

B-Nr.		Startwert	Typ	Polarität	Anstiegszeit	Maximalwert	Halbwertsbreite
		A				A	µs
B349	1	0	RS	negativ	1,87	-22330	53,6
B349	2	0	RS	negativ	1,76	-5162	15,6
B349	3	0	RS	negativ	1,71	-11372	23,1
B350	1	0	RS	negativ	1,94	-40807	47,9
B350	2	0	RS	negativ	1,61	-7322	13,9
B352	1	-64	IS	negativ	100,83	-1475	370,8
B352	2	-64	IS	negativ	50,03	-2199	96,1
B352	3	-32	IS	negativ	109,09	-767	140,6
B352	4	0	RS	negativ	1,90	-11808	39,5
B352	5	0	RS	negativ	1,88	-4042	24,7
B352	6	0	RS	negativ	1,86	-5134	24,8

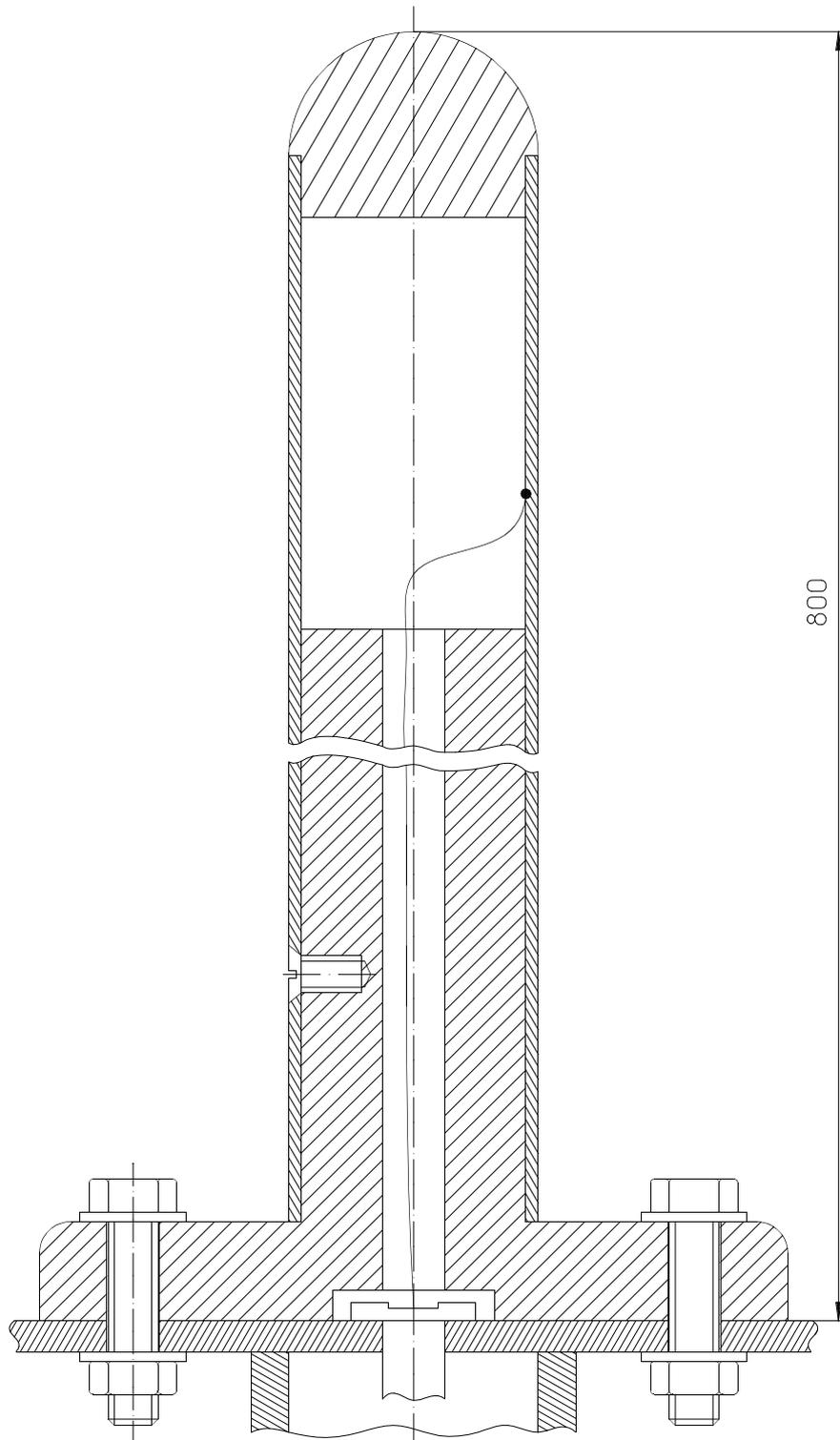
A2 Technische Zeichnungen

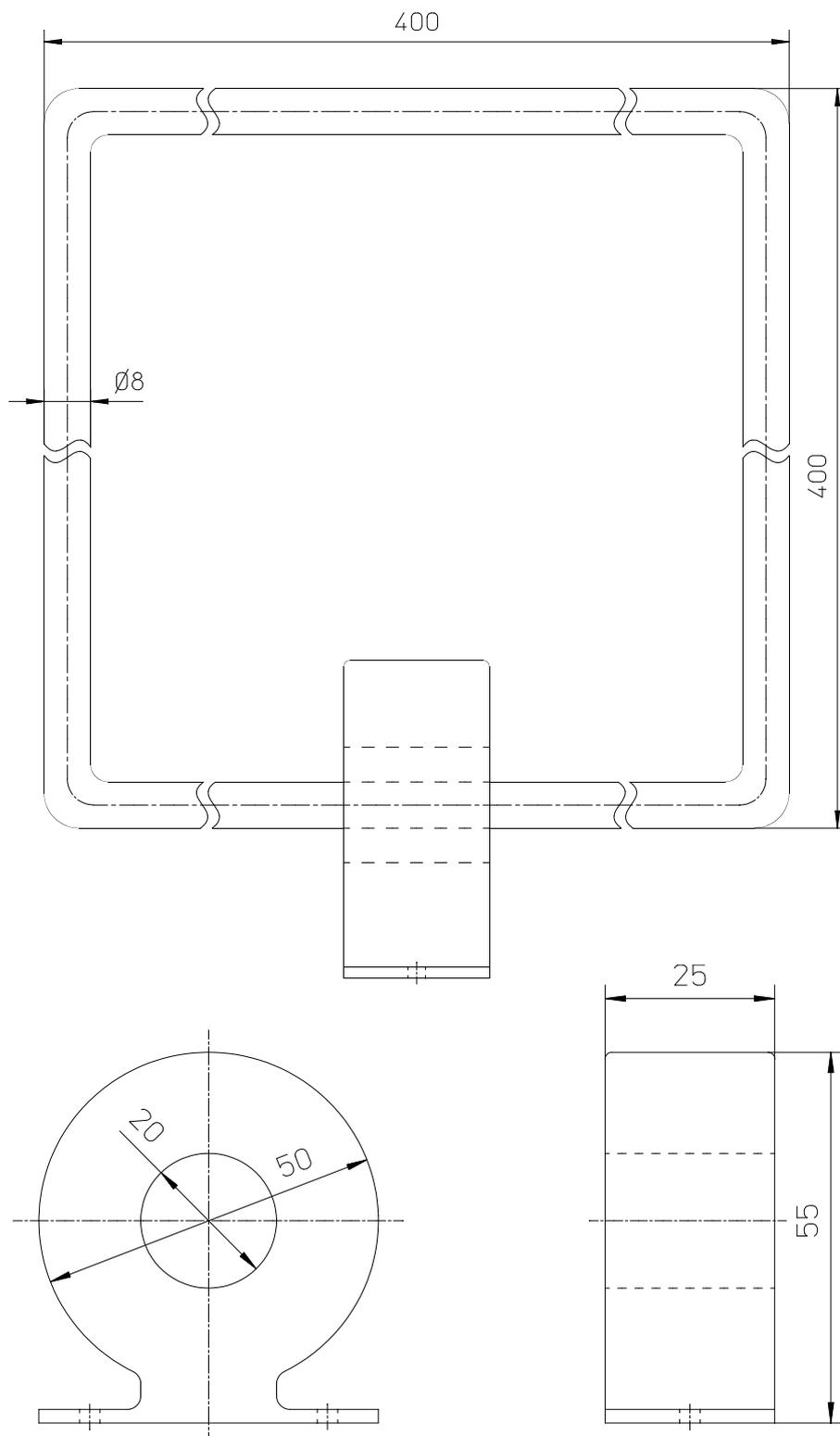
A2.1 Turmspitze



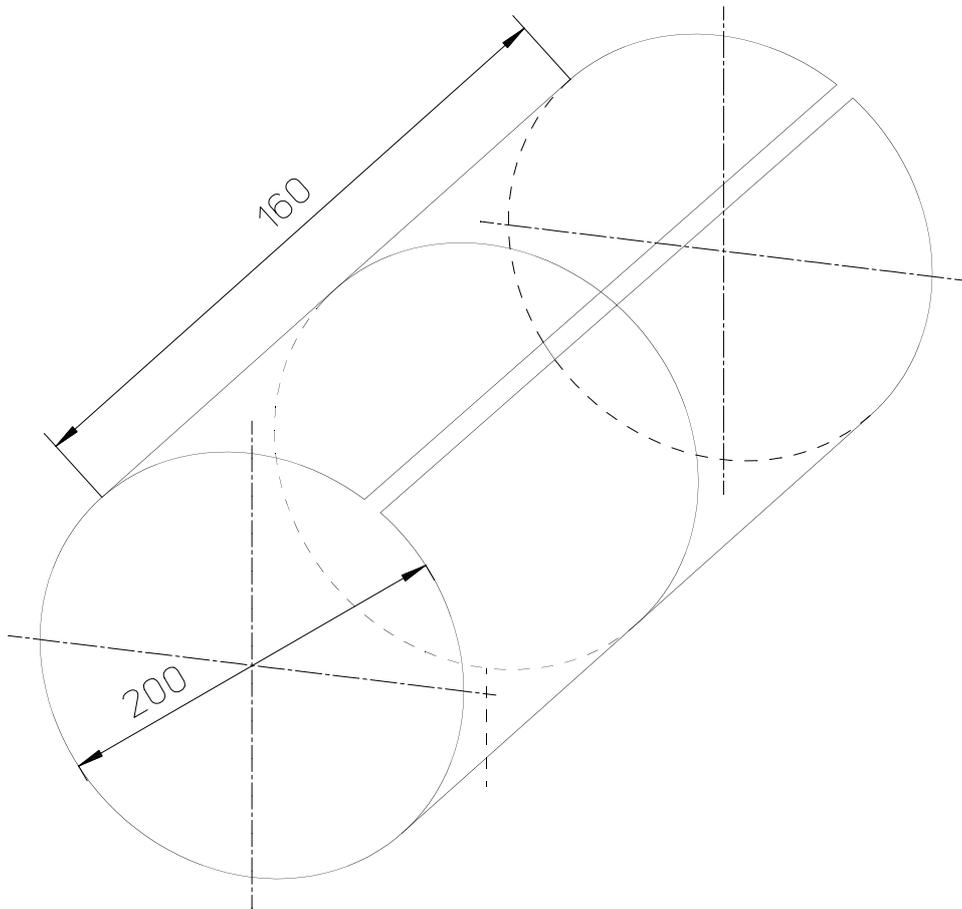
A2.2 $E(t)$ -Sensor

A2.3 dE/dt -Sensor



A2.4 $H(t)$ -Sensor

A2.5 dH/dt-Sensor



Literaturverzeichnis

- [1]: Baatz, H.: Mechanismus der Gewitter. VDE-Schriftenreihe, Bd. 34. Berlin und Offenbach, VDE-Verlag, 1985.
- [2]: Beierl, O.: Elektromagnetische Verträglichkeit beim Blitzeinschlag in ein Gebäude. Dissertation, Technische Universität München, München 1991.
- [3]: Beierl, O.: Lightning current measurements at the Peißenberg tower. 7th International Symposium on High Voltage Engineering ISH, Dresden, 1991, S. 19-22.
- [4]: Berger, K.: Novel observations on lightning discharges: Results of research on Mount San Salvatore. Journal of the Franklin Institute Bd. 283 (1967), Nr. 6, S. 478-525.
- [5]: Berger, K.: Methoden und Resultate der Blitzforschung auf dem Monte San Salvatore bei Lugano in den Jahren 1963 - 1971. Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins SEV Bd. 87 (1972), Nr. 24, S. 1403-1422.
- [6]: Berger, K.; Vogelsang, E.: Messungen und Resultate der Blitzforschung der Jahre 1955 ... 1963 auf dem Monte San Salvatore. Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins SEV Bd. 56 (1965), Nr. 1, S. 2-22.
- [7]: Boyle, J.; Malan, D.; Collens, H.: Return stroke velocity measurements in multistroke lightning flashes. Journal of Geophysical Research Bd. 81 (1976), Nr. 24, S. 4461-4466.
- [8]: Brüns, H.: Pulserregte elektromagnetische Vorgänge in dreidimensionalen Stabstrukturen. Dissertation, Universität der Bundeswehr Hamburg, Hamburg 1985.
- [9]: Brüns, H.; Königstein, D.: Calculation and measurements of transient electromagnetic fields in EMP simulators. Proc. of the 6th Symposium on Electromagnetic Compatibility, Zürich, 1985, S. 365-370.
- [10]: Diendorfer, G.; Mair, M.; Schulz, W.; Hadrian, W.: Lightning current measurements in Austria - Experimental setup and first results. 25. Internationale Blitzschutzkonferenz, Rhodos, 2000, S. 44-47.
- [11]: DIN EN 62305-1 (VDE 0185-1): Blitzschutz - Teil 1: Allgemeine Grundsätze. Berlin, VDE-Verlag, 2006.

- [12]: DIN EN 62305-3 (VDE 0185-3): Blitzschutz - Teil 3: Schutz von baulichen Anlagen und Personen. Berlin, VDE-Verlag, 2006.
- [13]: DIN EN 62305-4 (VDE 0185-4): Blitzschutz - Teil 4: Elektrische und elektronische Systeme in baulichen Anlagen. Berlin, VDE-Verlag, 2006.
- [14]: DIN IEC 60060-1 (VDE 0432-1): Hochspannungs-Prüftechnik. Berlin, VDE-Verlag, 1994.
- [15]: Flache, D.; Rakov, A.; Heidler, F.; Zischank, W.; Thottappillil, R.: Initial-stage pulses in upward lightning: Leader/return stroke versus M-component mode of charge transfer to ground. *Geophysical Research Letters* Bd. 35 (2008), Nr. 13, S. 3.
- [16]: Flache, D.; Rakov, A.; Heidler, F.; Zischank, W.; Thottappillil, R.: Different modes of charge transfer to ground in upward lightning observed at the Peissenberg tower. X. International Symposium on Lightning Protection, Curitiba, Brasilien, 2009, S. 445-450.
- [17]: Fuchs, F.: Ströme und Nahfelder von Blitzeinschlägen in hohe Bauwerke als Störquelle für elektronische Systeme. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg 1999.
- [18]: Golde, R.H.: *Lightning*. Band 1. London, Academic Press, 1977.
- [19]: Grünewald, H.: Die Messung von Blitzstromstärken an Blitzableitern und Freileitungsmasten. *Elektrotechnische Zeitschrift* Bd. 21 (1934), S. 505-509.
- [20]: Harrington, R.F.: *Field Calculations by Moment Methods*. New York, The MacMillan Company, 1968.
- [21]: Hasse, P.; Wiesinger, J.: *Handbuch für Blitzschutz und Erdung*. 4. Auflage. München, Pflaum Verlag, 1993.
- [22]: Heidler, F.: Analytische Blitzstromfunktion zur LEMP-Berechnung. 18. Internationale Blitzschutzkonferenz ICLP, München, 1985, S. 63-66.
- [23]: Heidler, F.: *Lightning electromagnetic impulse - Theorie und Messungen*. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg 1987.
- [24]: Heidler, F.: *Messung und Berechnung atmosphärischer Störungen*. Habilitation, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg 1999.
- [25]: Heidler, F.; Hopf, Ch.: A new method of lightning electric field measurement. 23. Internationale Blitzschutzkonferenz, Florenz, 1996, S. 91-96.

- [26]: Hopf, Ch.: Transiente elektrische Felder naher Blitzentladungen. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg 1995.
- [27]: Idone, V.; Orville, R.: Lightning return stroke velocity in the Thunderstorm Research International Program (TRIP). *Journal of Geophysical Research* Bd. 87 (1982), Nr. C7, S. 4903-4915.
- [28]: Israel, H.: *Meteorologie des Gewitters*. etz Bd. 82 (1961), Nr. 8, S. 225-231.
- [29]: Krider, P.; Weidman, C.; Noggle, R.: The electric fields produced by lightning stepped leaders. *Journal of Geophysical Research* Bd. 82 (1977), Nr. 6, S. 951-969.
- [30]: Liljequist, G.; Cihak, K.: *Allgemeine Meteorologie*. Braunschweig, Vieweg, 1984.
- [31]: Mach, D.; Rust, W.: Photoelectric return-stroke velocity and peak current estimates in natural and triggered lightning. *Journal of Geophysical Research* Bd. 94 (1989), Nr. D11, S. 13237-13247.
- [32]: Malan, D.J.; Schonland, F.R.S: Progressive lightning. VII – Directly-correlated photographic and electrical studies of lightning from near thunderstorms.. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A. Mathematical and Physical Sciences* Bd. 191 (1947), Nr. , S. 485-503.
- [33]: McEachron, K.B.: Lightning to the Empire State Building. *Journal of the Franklin Institute* Bd. 227 (1939), Nr. 2, S. 149-217.
- [34]: Miki, M.; Rakov, V.; Shindo, T.; Diendorfer, G.; Mair, M.; Heidler, F.; Zischank, W.; Uman, M.; Thottappillil, R.; Wang, D.: Initial stage in lightning initiated from tall objects and in rocket-triggered lightning. *Journal of Geophysical Research* Bd. 110 (2005), Nr. D2, S. 3.
- [35]: Miki, M.; Shindo, T.; Rakov, V.; Uman, M.; Diendorfer, G.; Mair, M.; Heidler, F.; Zischank, W.; Thottappillil, R.; Wang, D.: Characterization of current pulses superimposed on the continuous current in upward lightning initiated from tall objects and in rocket-triggered lightning. 28th International Conference on Lightning Protection, Kanazawa, 2006, S. 83-88.
- [36]: Mindel, J. N.: *DNA EMP awareness course notes*. 3. Auflage. Washington, Defense nuclear agency, 1977.
- [37]: Naumann, W.: *Gewitterentstehung*. *Elektrie* Bd. 35 (1981), Nr. 8, S. 395-399.

- [38]: Norinder, H.: Gewitterforschung in Schweden - Entwicklung und neuere Resultate. Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins SEV Bd. 38 (1947), Nr. 25, S. 799-813.
- [39]: Pichler, H.; Diendorfer, G.; Mair, M.: Statistics of Lightning Current Parameters Measured at the Gaisberg Tower. 18th International Lightning Detection Conference, Helsinki, 2004.
- [40]: Pockels, F.: Über die bei Blitzenentladungen erreichte Stromstärke. Physikalische Zeitschrift Bd. 2 (1900), Nr. 20, S. 306-307.
- [41]: Rakov, V.: Lightning Return Stroke Speed. Journal of Lightning Research Bd. 1 (2007), Nr. , S. 80-89.
- [42]: Romero, C.; Paolone, M.; Rubinstein, M.; Rachidi, F.; Pavanello, D.; Giri, D.: A Statistical Analysis on the Risetime of Lightning Current Pulses in Negative Upward Flashes Measured at Säntis Tower. 31st International Conference on Lightning Protection, Wien, 2012, S. 1-4.
- [43]: Romero, R.; Alberto, C.; Rubinstein, A.; Paolone, M.; Rachidi, F.: Instrumentation of the Säntis Tower in Switzerland for lightning current measurements. International Journal of Plasma Environmental Science & Technology Bd. 4 (2010), Nr. 1, S. 79-85.
- [44]: Singer, H.; Brüns, H.: Concept-II Theory. Technische Universität Hamburg-Harburg, 2007.
- [45]: Singer, H.; Brüns, H.; Mader, T.; Freiberg, A.: CONCEPT II - Manual of the program system. Technische Universität Hamburg-Harburg, 2005.
- [46]: Sommerfeld, A.: Über die Ausbreitung der Wellen in der drahtlosen Telegraphie. Annalen der Physik Bd. 28 (1909), Nr. 4, S. 665-736.
- [47]: Trapp, N.: Erfassung des zeitlichen Verlaufs und der Wirkungsparameter von Blitzströmen in automatisch arbeitenden Blitzmeß-Stationen. Dissertation, Technische Universität München, München 1985.
- [48]: Uman, M. A.: The Lightning Discharge. Orlando, Academic Press, 1987.
- [49]: Uman, M.A.; McLain, D.K.; Krider, E.P.: The electromagnetic radiation from a finite antenna. American Journal of Physics Bd. 43 (1975), S. 33-38.
- [50]: Wang, D.; Takagi, N.; Watanabe, T.; Sakurano, H.; Hashimoto, M.: Observed characteristics of upward leaders that are initiated from a windmill and its lightning protection tower. Geophysical Research Letters Bd. 35 (2008), Nr. 2.

- [51]: Williams, E. R.: The electrification of thunderstorms. Scientific American Bd. 258 (1988), Nr. 11, S. 88-99.
- [52]: Zhou, H.; Diendorfer, G.; Thottappillil, R.; Pichler, H.; Mair, M.: Continuing current in tower-initiated lightning. 30th International Conference on Lightning Protection, Cagliari, 2010, S. 1143-1 - 1143-4.
- [53]: Zhou, H.; Diendorfer, G.; Thottappillil, R.; Pichler, H.; Mair, M.: Upward Bipolar Lightning Flashes observed at the Gaisberg Tower. 30th International Conference on Lightning Protection, Cagliari, 2010, S. 1142-1 - 1142-5.
- [54]: Zundl, T.: Koordinierte Messungen von Blitzströmen und Ihrer elektromagnetischen Felder an einem Fernmeldeturm. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg 1995.