

Thomas Rüther

**Experimentelle Untersuchung  
der Lichtbogenaufteilung  
an Löschblechen**



Cuvillier Verlag Göttingen

# **Experimentelle Untersuchung der Lichtbogenaufteilung an LÖSCHBLECHEN**

Von der Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig



zur Erlangung der Würde eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte

## **Dissertation**

von  
Dipl.-Ing Thomas Rüter  
aus Braunschweig

Eingereicht am:	10.09.2007
Mündliche Prüfung am:	16.11.2007
Referenten:	Prof. Dr.-Ing. Manfred Lindmayer Prof. Dr.-Ing. Ernst Gockenbach
Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat

2008

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2008

Zugl.: (TU) Braunschweig, Univ., Diss., 2007

978-3-86727-513-2

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2008

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

[www.cuvillier.de](http://www.cuvillier.de)

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2008

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86727-513-2

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2003 – 2007 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen der Technischen Universität Braunschweig.

Dem ehemaligen geschäftsführenden Leiter des Institutes, Herrn Professor Dr.-Ing. Manfred Lindmayer, gilt mein ganz besonderer Dank für die Bereitstellung der technischen und auch finanziellen Rahmenbedingung bei der Durchführung meiner wissenschaftlichen Untersuchungen. Seine fortwährende Betreuung, Unterstützung und Hilfsbereitschaft - auch aus dem Ruhestand heraus - haben wesentlich zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen.

Herrn Professor Dr.-Ing. Michael Kurrat, dem jetzigen Leiter des Institutes danke ich für die hilfsbereite Fortführung der Betreuung meiner wissenschaftlichen Arbeit.

Für die Übernahme der Mitberichterstattung danke ich Herrn Professor Dr.-Ing. Gockenbach, Leiter des Schering-Instituts der Universität Hannover. Herrn Professor Dr.-Ing. Kurrat danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Den Firmen Rockwell Automation AG, Aarau, Schweiz und E-T-A GmbH, Altdorf bei Nürnberg, danke ich ganz besonders für die allzeit gute Zusammenarbeit auf dem wissenschaftlichen und auch dem zwischenmenschlichem Gebiet und die stets großzügige finanzielle Unterstützung. Besonders bedanken möchte ich mich bei den Herren Dr.-Ing. H.-J. Haars, Dr.-Ing. H. Weichert, Dr.-Ing. P. Frei und W. Feller (alle Firma Rockwell) für die kritischen Anmerkungen und Diskussionen bei meinen Firmenbesuchen. Gleiches gilt für Herrn Dipl.-Ing. P. Meckler, Firma E-T-A GmbH, dem ich zusätzlich für die fortwährende Bereitstellung von modernem Bildaufzeichnungsgerät danke, ohne welches diese Arbeit wohl nicht entstanden wäre.

Den Mitarbeitern der Institutswerkstatt, insbesondere Herrn Meister J. Rietz, Herrn K. Koszowski und Herrn D. Wohldt schulde ich großen Dank für die Unterstützung und die stets präzise und gewissenhafte Anfertigung der für meine wissenschaftlichen Untersuchungen benötigten Bauteile. Auch danke ich den Studenten des Instituts für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen, die mich in Form von Diplomarbeiten oder als Hilfwissenschaftler unterstützt haben.

Frau Dipl.-Ing. Alexandra Mutzke gilt mein besonderer Dank für die Durchsicht und Korrektur des Manuskriptes dieser Arbeit.

Allen Kollegen danke ich für die sehr lehrreiche und außerordentlich harmonische Zeit, die ich mit Ihnen verbringen durfte.

Meiner Partnerin Julia Riß danke ich für die ständige verständnisvolle Unterstützung und Hilfe, die sie mir fortwährend entgegengebracht hat. Ebenso danke ich meiner Familie und insbesondere meinen Eltern für die stetige Unterstützung während meiner Schul- und Studienzeit.

---

## Übersicht

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den Vorgängen bei der Lichtbogenzündung, -wanderung, -aufteilung und -löschung in speziell angefertigten Modellschaltkammern. Die verwendeten Versuchsschalter ähneln in Form und Größe handelsüblichen Schutzschaltern der Niederspannungstechnik. Die Arbeit teilt sich in die folgend aufgeführten Abschnitte.

Der **erste Abschnitt** bildet eine **Einführung** in die Thematik der **Lichtbogenunterteilung** in kompakten, strombegrenzenden Niederspannungsschaltern und gibt eine **Übersicht der grundlegenden Untersuchungen** anderer Autoren.

Im **zweiten Hauptabschnitt** folgt die Beschreibung der eigenen Versuchseinrichtungen und –anordnungen und der Messeinrichtungen und Messmethoden. Ferner werden in diesem Abschnitt die in der Arbeit betrachteten Größen definiert und die Auswertungsmethoden dargelegt.

Das Kernthema des **dritten Hauptabschnitts** bilden die **experimentellen Untersuchungen** des Lichtbogenaufteilungsvorgangs in Modellschaltkammern mit divergierenden Laufschiene im Strombereich von 500 bis 2000 A. Hierbei wird auf die genauen Vorgänge bei **der Lichtbogenunterteilung an einem Löschblech** eingegangen und diese anhand von **Aufnahmen mit einer digitalen Hochgeschwindigkeitskamera** ausführlich erläutert. Neben der Lichtbogenwanderung wird auf den genauen Ort der Fußpunkte auf dem Löschblech sowie die durch die Fußpunkte **aufgeschmolzenen Löschblechoberflächen** eingegangen.

Der **vierte Abschnitt** befasst sich mit dem **Vergleich von experimenteller und simulierter Lichtbogenaufteilung** in einer Kammer mit **parallelen Laufschiene** und **einem Löschblech**.

Im **fünften Abschnitt** werden die am Institut durchgeführten **Simulationen zur Lichtbogenunterteilung und Fußpunktbildung auf Löschblechen** im Hinblick auf die in den Experimenten gewonnenen Erkenntnisse vorgestellt. Die Simulationsdaten und -ergebnisse stammen **aus der Arbeit von Frau Dipl.-Ing. Mutzke**, die diese im Rahmen Ihrer Promotion mit dem Finite-Elemente-Methode (FEM)-Programm CFX/ANSYS der Firma CAD-FEM durchführt. Der Schwerpunkt der Untersuchungen

von Frau Mutzke liegt in der Erstellung eines möglichst realitätsgetreuen Fußpunktmodells, mit Hilfe dessen eben jene Unterteilung an einem oder auch mehreren Löschblechen nachgebildet werden kann.

**Abschnitt sechs** gibt eine Zusammenfassung der aus den experimentellen Untersuchungen und den Simulationen gewonnenen Erkenntnisse.

## **Kurzfassung**

Durch die immer kürzer werdenden Entwicklungszeiten gehen die Hersteller von Schaltgeräten dazu über, den Entwicklungsprozess von mechanischen Prototypen hin zu computergestützten FEM-Simulationsmodellen umzustellen. Daher gewinnt der Anteil von Simulationswerkzeugen in der Entwicklung von Niederspannungsschaltgeräten zunehmend an Bedeutung. Der Bedeutungszuwachs wird durch den Trend, immer mehr Leistung auf immer weniger Raum zu beherrschen, verstärkt. Die aus den Simulationen gewonnenen Ergebnisse bedürfen zurzeit noch der Überprüfung durch experimentelle Untersuchungen. Ein Vergleich liefert hierbei Rückschlüsse auf die Richtigkeit der Simulationen, lässt Fehler erkennen und fehlende Parameter ermitteln.

Die am häufigsten eingesetzte Variante zur Lichtbogenlöschung in Niederspannungsschaltgeräten ist die Unterteilung des nach der Kontaktöffnung entstehenden, entlang der Elektroden wandernden Schaltlichtbogens an ferromagnetischen Löschblechen. Die Nachbildung dieses Verhaltens in dreidimensionalen Simulationsmodellen setzt eine genaue Kenntnis über das Lichtbogenverhalten und die damit verbundenen physikalischen Prozesse voraus.

In dieser Arbeit werden experimentelle Untersuchungen der Lichtbogenaufteilung an einem Löschblech in Modellschaltkammern mit parallelen und mit divergierenden Laufschiene präsentiert. Die Kammergröße orientiert sich an der Größe von Leitungsschutzschaltern oder kleinen Motorschutzschaltern und entspricht den stark vereinfachten, simulierten Kammern.

Es wurde die Einflüsse des Kammervolumens, der Öffnungen in der Verdämmung und des prospektiven Stromes auf die Lichtbogenunterteilung am Löschblech untersucht. Ausgewertet wurden der Teilstrom durch das Löschblech, die Positionen der Fußpunkte auf dem Löschblech, die Form des Lichtbogens während des Aufteilungsvorgangs, die Fußpunktstromdichte auf dem Löschblech und die Aufschmelzungsspuren auf den Löschblechoberflächen. In allen Versuchen erfolgte eine optische Aufzeichnung des Lichtbogens mit einer digitalen Schnellfilmkamera.

Die in den Messungen gewonnenen Erkenntnisse werden anschließend mit am Institut durchgeführten Simulationen an parallelen Laufschiene verglichen. Anhand der verschiedenen Simulationsmodelle wird der Einfluss eines Fußpunktmodells auf die Lichtbogenunterteilung aufgezeigt.



## **Abstract**

The decreasing development time of new switching-devices leads the manufactures to change their development-process away from mechanical prototypes to computer-aided FEM simulation models. Therefore, simulation tools become more important. This is intensified by the trend of increasing the performance and additionally decreasing the space.

Presently, the simulation results need to be proofed by experimental investigations. These experimental results can be compared with the simulations and the accuracy of the calculations can be revealed. Errors can be detected and missing parameters can be investigated.

After the arc is ignited by contact opening it moves along the arc runners and is finally divided into several arcs at the splitter plates. This is the widest spread method to extinguish the electric arc in low voltage switchgears. To simulate this complex process three-dimensionally it is necessary have detailed knowledge about the behavior of the arc as well as about occurring physical processes.

This work reports on measurement data obtained with experiments at arc chambers with parallel or diverging arc runners. The size of the chambers is similar to short circuit breakers or small motor overload switches and corresponds to the simplified simulation models. The influences of the chamber geometries, vents in the chamber and the amperage onto the arc-splitting-process with a splitter-plate were investigated. The current through the splitter plate, the positions of the arc-roots at the plate, the shape of the arc during the splitting-process, the arc root current density, and the arc-root-traces onto the surfaces of the splitter plate were analyzed. The arc appearance at each experiment is recorded with a high-speed-camera.

The measurement results were compared with simulations in arc chambers with parallel arc runners that were carried out at the institute. The different simulation models show the dependence of an arc-root model to the sub-division of the arc.

**INHALTSVERZEICHNIS**

<b>1. Einführung .....</b>	<b>1</b>
1.1. Zielstellung der Arbeit .....	3
1.2. Strombegrenzendes Schalten .....	5
1.3. Lichtbogen.....	8
1.3.1. Plasmasäule .....	9
1.3.2. Kathodisches Fallgebiet (Kathodenfall) .....	9
1.3.3. Anodisches Fallgebiet (Anodenfall) .....	10
1.3.4. Kontraktion der Lichtbogens und die Ausbildung von Plasmastrahlen.....	10
1.4. Erhöhung der Lichtbogenspannung .....	12
1.4.1. Verlängerung des Lichtbogens.....	12
1.4.2. Aufteilung des Lichtbogens .....	12
1.5. Untersuchungen anderer Autoren .....	16
1.5.1. Experimentelle Untersuchungen .....	16
1.5.1.1. „Einfache“ Laufschienegeometrie ohne Löschbleche .....	17
1.5.1.2. „Einfache“ Laufschienegeometrie mit Löschblechen .....	20
1.5.1.3. Komplette Modellschaltkammern mit Löschblechpaketen .....	21
1.5.2. Simulationen des Schaltlichtbogens.....	23
<b>2. Versuchseinrichtung und Versuchsbedingungen.....</b>	<b>25</b>
2.1. Aufbau der Versuchsschalter .....	25
2.1.1. Divergierende Laufschieneanordnung.....	25
2.1.2. Kammer mit divergierende Laufschiene .....	28
2.1.2.1. Ein Löschblech .....	28
2.1.2.2. Zwei Löschbleche .....	30
2.1.3. Parallele Laufschieneanordnung .....	31
2.1.4. Löschbleche und –anfertigung .....	32
2.2. Versuchsstand .....	35
2.2.1. Prüfstromkreis .....	35
2.2.2. Steuerstromkreis mit Ablaufsteuerung.....	37
2.3. Versuchsparameter- und Kombinationen.....	37
2.4. Messeinrichtungen und –methoden .....	39
2.4.1. Messgeräte .....	39
2.4.2. Messgrößen .....	39
2.4.2.1. Durchlassstrom und Bogenspannung .....	40
2.4.2.2. Löschblechstrom.....	40
2.4.2.3. Löschblechpotential .....	40
2.4.2.4. Teilspannung zwischen den Löschblechen .....	41
2.4.3. Aufnahmen mit der Schnellfilmkamera .....	41
2.4.3.1. Lichtbogenkontur .....	43
2.4.3.2. Strömungsmessungen .....	45
2.4.4. Löschblechaufschmelzungen .....	47
2.5. Definitionen und Auswertungsmethoden.....	48
2.5.1. Auswertungen .....	49

2.5.2. Definitionen .....	50
2.5.2.1. Elektrische Größen .....	50
2.5.2.2. Filmaufnahmen .....	53
2.5.2.3. Löschblechoberflächen .....	54
<b>3. Versuchsschalter mit divergierenden Laufschiene</b> .....	<b>57</b>
3.1. Lichtbogenzündung / Zündzeitpunkt .....	57
3.2. Bogenwanderung unterhalb des Löschblechs.....	61
3.3. Lichtbogenunterteilung am Löschblech .....	68
3.3.1. Schleifenbildung und Fußpunkte auf dem Löschblech.....	68
3.3.2. Lichtbogenspannung / Zündspannung .....	71
3.3.2.1. Einfluss der Kammertiefe .....	72
3.4. Verlauf des Teilstromsflusses durch das Löschblech.....	79
3.5. Bogenwanderung zw. Laufschiene und Löschblech .....	84
3.6. Aufschmelzung der Löschblechoberflächen.....	90
3.6.1. 4 mm Kammertiefe .....	90
3.6.2. 8 und 12 mm Kammertiefe .....	94
3.6.2.1. Vergleich der Aufschmelzungen.....	98
3.7. Fußpunktstromdichte .....	100
3.8. Versuchsschalter mit zwei Löschblechen.....	108
3.8.1. Lichtbogenunterteilung an zwei massiven Löschblechen .....	108
3.8.2. Teilspannung zwischen zwei massiven Löschblechen .....	108
3.9. Versuch von Strömungsmessungen .....	110
<b>4. Versuchsschalter mit parallelen Laufschiene</b> .....	<b>111</b>
4.1. Lichtbogenzündung .....	112
4.1.1. Verdämmungseinfluss auf die Bogenwanderung.....	113
4.1.1.1. Komplette geschlossene Verdämmung.....	113
4.1.1.2. Verdämmung bei $I = 500 \text{ A}$ .....	115
4.1.1.3. Verdämmung bei $I = 2000 \text{ A}$ .....	117
4.2. Lichtbogenwanderung .....	120
4.2.1. Fußpunkte auf den Laufschiene und dem Löschblech.....	123
4.2.2. Wanderungsgeschwindigkeit.....	129
4.3. Lichtbogenaufteilung .....	131
4.3.1. Spannungserhöhung durch Schleifenbildung .....	131
4.3.2. Teilstrom durch das Löschblech .....	136
<b>5. Simulationen</b> .....	<b>140</b>
5.1. Lichtbogenmodellierung .....	140
5.1.1. Lichtbogensäule .....	140
5.1.2. Elektrodengebiete .....	143
5.2. Modellierung einer Fußpunktschicht auf Löschblechen .....	145
5.3. Simulationen der Lichtbogenunterteilung am Löschblech .....	146
5.3.1. Simulation ohne Fußpunktmodell .....	147
5.3.2. Simulation mit Fußpunktmodell ohne Zündspannung .....	149
5.3.3. Simulation mit Fußpunktmodell mit Zündspannung .....	151
<b>6. Zusammenfassung</b> .....	<b>153</b>

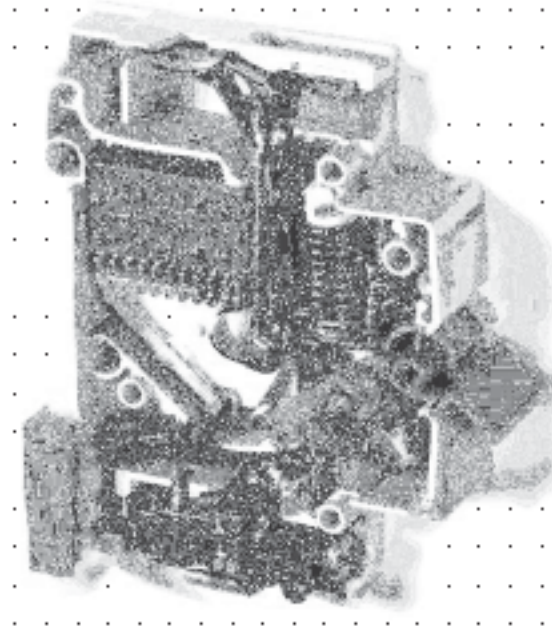
---

6.1. Experimentelle Untersuchungen .....	153
6.2. Simulationen .....	156
<b>7. Literaturverzeichnis .....</b>	<b>157</b>
<b>8. Bildverzeichnis .....</b>	<b>161</b>
<b>9. Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>167</b>
<b>10. Bildteil / Abbildungen.....</b>	<b>168</b>
<b>Lebenslauf.....</b>	<b>175</b>



## 1. Einführung

Schaltgeräte der elektrischen Energietechnik haben die Aufgabe, Stromkreise zu verbinden und zu unterbrechen, sowie im eingeschalteten Zustand den Strom zu führen [Lin-87]. Je nach ihrer in den Vorschriften festgelegten Art kommt bei Niederspannungsschaltgeräten neben dem Schalten von Betriebsströmen auch das Schalten von Überlastströmen und Kurzschlussströmen hinzu. Sowohl der Überlast- als auch der Kurzschlussstrom sind Überströme, die nach DIN VDE 0641 Teil 11 [VDE-01] oberhalb des Bemessungsstromes des Schaltgerätes liegen.



**Bild. 1.1:** Leitungsschutzschalter mit Löschblechpaket, Auslöseeinheit und Schaltschloss [Hag-06]

So müssen z.B. Leitungsschutzschalter, die in Haushalts- und Industrieinstallationen zum Schutz der elektrischen Leitungen und Verbraucher eingesetzt werden (Bild 1.1), Kurzschlussströme von 1,5 kA bis hin zu 25 kA bewältigen [VDE-01]. Bei Leistungsschaltern, die in Stationen der öffentlichen und industriellen Energieversorgung zum Kurzschlussschutz eingesetzt werden, sind Kurzschlussströme bis in die Größenordnung 200 kA zu schalten [VDE-02].

Die Unterbrechung des Stromkreises durch den Schutzschalter, das heißt der Übergang vom eingeschalteten in den ausgeschalteten Zustand geschieht durch Auftrennen eines metallischen Stromübergangs unter Ausbildung eines Lichtbogens. Dieser Schaltlichtbogen hat die Aufgabe, den Übergang von einem guten Leiter zu einem guten Isolator innerhalb kürzester Zeit zu bewerkstelligen [Lin-87]. Neben der Erkennung des Überstromes ist die Lichtbogenlöschung daher als zentrale Aufgabe eines Niederspannungsschaltgerätes zu sehen.

Die in Niederspannungsschaltgeräten am häufigsten eingesetzte Variante zur Lichtbogenlöschung ist die Unterteilung in mehrere in Serie geschaltete Teillichtbögen. Die Lichtbogenaufteilung führt hierbei durch mehrere Faktoren

(Kapitel 1.4) zur raschen Erhöhung der Lichtbogenspannung. Die Lichtbogenaufteilung erfolgt durch mehrere, quer zur Lichtbogenwanderungsrichtung angebrachte, metallische Bleche, den so genannten Löschblechen. Die Löschbleche sind in Paketen aus mehreren einzelnen, voneinander isoliert befestigten Blechen zusammengefasst. Die Anzahl der Löschbleche variiert und hängt von der Spannungsebene ab, in der das Schaltgerät eingesetzt wird [Lin-87] [Burk-85]. Die durch Unterteilung an den Blechen generierte hohe Lichtbogenspannung wirkt strombegrenzend. Dadurch reduziert sich die dynamische und thermische Beanspruchung der den zu unterbrechenden Stromkreis bildenden Leitungen und der daran angeschlossenen elektrischen Verbraucher (Kapitel 1.2).

Der für diese Anforderungen bereitgestellte Raumbedarf wird stetig geringer. So besteht der Trend, immer mehr Leistung auf immer weniger Raum zu beherrschen bzw. zu schalten. Dies setzt eine genaue Kenntnis über das Lichtbogenverhalten in Schaltkammern und die damit verbundenen physikalischen Prozesse voraus. Hinzu kommt, dass die zunehmend kürzeren Entwicklungszeiten die Hersteller dazu drängen, den Entwicklungsprozess von mechanischen Prototypen hin zu computergestützten FEM-Simulationsmodellen umzustellen. Die Herausforderung liegt dabei in einer möglichst genauen, mit hinreichenden Vereinfachungen versehenen, physikalischen Nachbildung des Schaltlichtbogens.

## 1.1. Zielstellung der Arbeit

Die in dieser Arbeit vorgestellten Versuchsreihen und die dabei gewonnenen Ergebnisse dienen der Modelldatengewinnung für ein in Arbeit befindliches Simulationsmodell zur Komplettsimulation von Schaltlichtbögen [Lin-03], [Lin-04], [Rue-06]. Des Weiteren werden im Umkehrschluss Simulationsergebnisse an experimentellen Anordnungen überprüft.

Die von Mutzke [Lin-03], [Lin-06], durchgeführten Simulationen sollen zu einer Lichtbogenkomplettsimulation führen. Dies bedeutet, dass die Simulation eine Lichtbogenunterteilung an Löschblechen beinhaltet. Zur Lichtbogenaufteilung durch Löschbleche gehört jedoch zwingend die Ausbildung neuer Elektrodenfallgebiete auf den Löschblechoberflächen (Kapitel 1.4.2). Mutzke betrachtet zunächst nur ein Löschblech [Lin-06], an dem sich ein Lichtbogen in zwei in Reihe geschaltete Teillichtbögen aufteilt. Des Weiteren sind im Simulationsmodell keine bewegten Komponenten implementiert. Die experimentellen Untersuchungen erfolgen daher auch an Modellschaltkammern ohne bewegliche Komponenten.

Die in dieser Arbeit untersuchten Stromstärken liegen mit 500, 1000 und 2000 A eher im unteren Strombereich der in [VDE-01] aufgeführten Kurzschlussströme. Der untere Stromstärkebereich wurde für die experimentellen Untersuchungen gewählt, da die im Simulationsmodell verwendeten Ströme (zurzeit) im Bereich von einigen 100 A liegen.

Die Ergebnisausgabe zeitvarianter Vorgänge bei Simulationsprogrammen wie ANSYS und CFX erfolgt in der Regel in Bildform anhand von Filmsequenzen. Die berechneten elektrischen Größen wie Stromdichte, elektrisches Potential oder die physikalischen Größen wie Temperatur, Druck, Geschwindigkeit werden dabei anhand von Grafiken in Falschfarben dargestellt.

Einen Schwerpunkt der experimentellen Untersuchungen bilden die optischen Aufzeichnungen der im Labor erzeugten Lichtbögen mittels einer digitalen Hochgeschwindigkeitskamera. Dabei werden die Lichtbogenbewegung innerhalb der Modellschaltkammer, sowie die Unterteilung des Lichtbogens an einem und zwei Löschblechen beobachtet und ausgewertet.

Einen weiteren Untersuchungsschwerpunkt bilden die durch die Lichtbogenfußpunkte aufgeschmolzenen Löschblechoberflächen. Hier interessieren

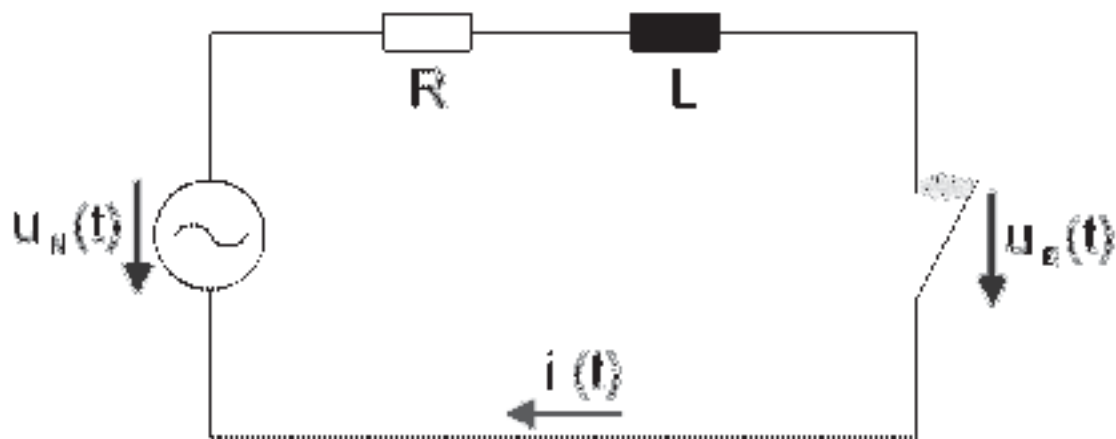


die Größe, die Form und der Ort der Löschblechaufschmelzungen bei verschiedenen Löschblech- und Modellschaltkammervarianten. Fußpunktspuren auf den Löschblechen geben zwar keine direkten Hinweise auf die Stromdichte in den Lichtbogenfußpunkten, lassen aber im Zusammenhang mit Simulationen Rückschlüsse darauf zu. In den Simulationen von Mutzke [Lin-03], [Rue-06] werden die Aufschmelzungen auf bzw. der Materialabtrag von den Löschblechen durch den einwirkenden Lichtbogen zurzeit noch nicht behandelt. Die experimentellen Betrachtungen sollen daher zukünftigen Vergleichen dienen.

## 1.2. Strombegrenzendes Schalten

Bei Abschaltvorgängen in Niederspannungsgeräten kommen im Wesentlichen zwei Löschrinzipien zum Tragen: das Wechselstrom- und das Gleichstromlöschrinzip.

Das Wechselstromlöschrinzip beruht darauf, dass im Nulldurchgang des Wechselstromes der Lichtbogen so beeinflusst wird, dass er seine Leitfähigkeit verliert. Das kann durch Energieentzug aus der Lichtbogensäule, im Prinzip wie bei einem Hochspannungsschalter, geschehen. Die zweite Möglichkeit beruht darauf, dass sich nach einem Abschaltvorgang unmittelbar vor der neuen Kathode eine Raumladungsschicht (Kathodenschicht) bildet, die in der Lage ist, die wiederkehrende Netzspannung aufzunehmen [Lin-87]. Sofern die wiederkehrende Einschwingspannung die als Wiederverfestigungsspannung bezeichnete Kathodenschicht-Durchschlagspannung nicht überschreitet, kommt es zu keiner erneuten Wiederzündung des Lichtbogens. Zuvor beschriebenes Prinzip findet in Niederspannungs-Wechselstromschaltern ohne besondere Löschrinzipien, z. B. bei Lichtschaltern, sowie bei jedem nicht-strombegrenzenden Schaltgerät mit Löschrinzipien, z. B. Schützen oder nicht-strombegrenzenden Leistungsschaltern, Anwendung. Bei den zuletzt genannten Schaltern werden durch die Löschrinzipien mehrere sofort verfestigende Strecken in Reihe geschaltet.



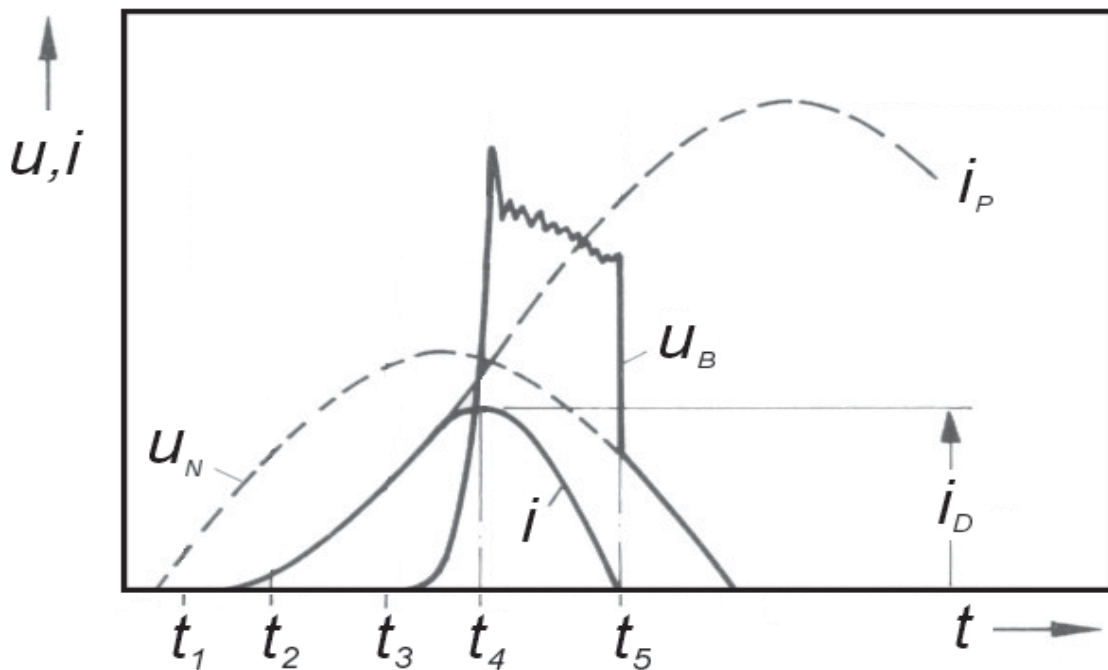
**Bild 1.2:** Ersatzschaltbild eines induktiven Kurzschlusskreises

Beim Gleichstromlöschrinzip wird der Stromverlauf im Kurzschlusskreis während eines Ausschaltvorganges durch die Lichtbogenspannung und die Eigenimpedanz beeinflusst [Erk-74]. Es findet seinen Ursprung in der Abschaltung von Gleichstromkreisen, wird aber auch zum strombegrenzenden Abschalten von

Wechselstromkreisen eingesetzt. Dabei wird der Kurzschlussstrom durch die rasche Erhöhung der Lichtbogenspannung (Kap. 1.4) über die treibende Netzspannung hinaus vor seinem natürlichen Nulldurchgang gelöscht. Hierdurch wird der Scheitelwert des Kurzschlussstromes auf kleinere Werte reduziert, als der unbeeinflusste Strom hätte.

Zur Erklärung der strombegrenzenden Wirkung wird die vereinfachte Ersatzschaltung eines Kurzschlussstromkreises in Bild 1.2 herangezogen.

Der Stromkreis enthält einen geringen ohmschen Widerstand und wird hauptsächlich von der induktiven Impedanz bestimmt. Ohne Schaltgerät bestimmen die treibende Spannung und die im Kurzschlusskreis liegende Impedanz aus R und L den prospektiven Kurzschlussstrom  $i_P(t)$ .



$u_B$ : Lichtbogenspannung	$t_1$ : Kurzschlusseintritt
$u_N$ : treibende Netzspannung	$t_2$ : Auslösung des Schalters
$i$ : Stromverlauf unter Einfluss der Lichtbogenspannung	$t_3$ : Kontaktöffnung
$i_P$ : unbeeinflusster Wert des prospektiven Stromes	$t_4$ : $di(t)/dt = 0$
$i_D$ : Durchlassstrom (beeinflusster Wert des Kurzschlussstromes)	$t_5$ : Stromunterbrechung

**Bild 1.3:** Strombegrenzendes Abschalten eines induktiven Stromkreises; Strom und Spannungsverlauf (schematisch)

Bild 1.3 zeigt schematisch den Verlauf der im Kurzschlusskreis auftretenden elektrischen Größen. Im Falle eines Kurzschlusseintritts ( $t_1$ ) vergeht eine bestimmte Zeitspanne, bis der Kurzschluss detektiert wird, die Auslösemechanik das Schaltschloss entriegelt ( $t_2$ ) und die Kontakte bei  $t_3$  öffnen und getrennt werden. Durch die Kontakttrennung entsteht ein Lichtbogen im Schaltgerät, dessen Bogenspannung  $u_B$  der Netzspannung  $u_N$  entgegenwirkt. Die dazugehörige Gleichung ergibt nach einem Spannungsumlauf (Bild 1.2) wie folgt:

$$u_N(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt} + R \cdot i(t) + u_B \quad (1.1)$$

$u_N$	: Netzspannung	$u_B$	: Lichtbogenspannung
$i$	: Kurzschlussstrom	$R$	: Widerstand
$L$	: Induktivität	$t$	: Zeit

Der im Kurzschlusskreis fließende Strom  $i$  erreicht seinen Scheitelwert, wenn die Gleichung

$$\frac{di(t)}{dt} = 0 \quad (1.2)$$

erfüllt ist.

Zu diesem Zeitpunkt  $t_4$  wird der begrenzte Strom als Durchlassstrom  $i_D$  bezeichnet. Wird im folgenden Zeitverlauf die Summe aus der Lichtbogenspannung  $u_B$  und den ohmschen Spannungsfällen im Kurzschlusskreis  $R \cdot i(t)$  größer als der Momentanwert der treibenden Netzspannung  $u_N(t)$ , so wird der Term  $L \cdot (di(t)/dt)$  in Gleichung (1.1) negativ. Letztlich sinkt der im Kreis fließende Kurzschlussstrom sowohl im Scheitelwert als auch in seiner Flussdauer bis auf 0 ab. Die Abschaltung erfolgt strombegrenzend zum Zeitpunkt  $t_5$ .

Kleinere Durchlassströme reduzieren die thermischen und dynamischen Beanspruchungen sowohl des Schaltgerätes selbst als auch der nachgeschalteten Komponenten, die es durch das Schaltgerät zu schützen gilt. Die wirksamste Energiebegrenzung im Kurzschlusskreis erhält man, wenn die Bogenspannung über die Netzspannung hinaus erhöht wird, noch vor dem Scheitelwert des prospektiven Wechselstromes eintritt.

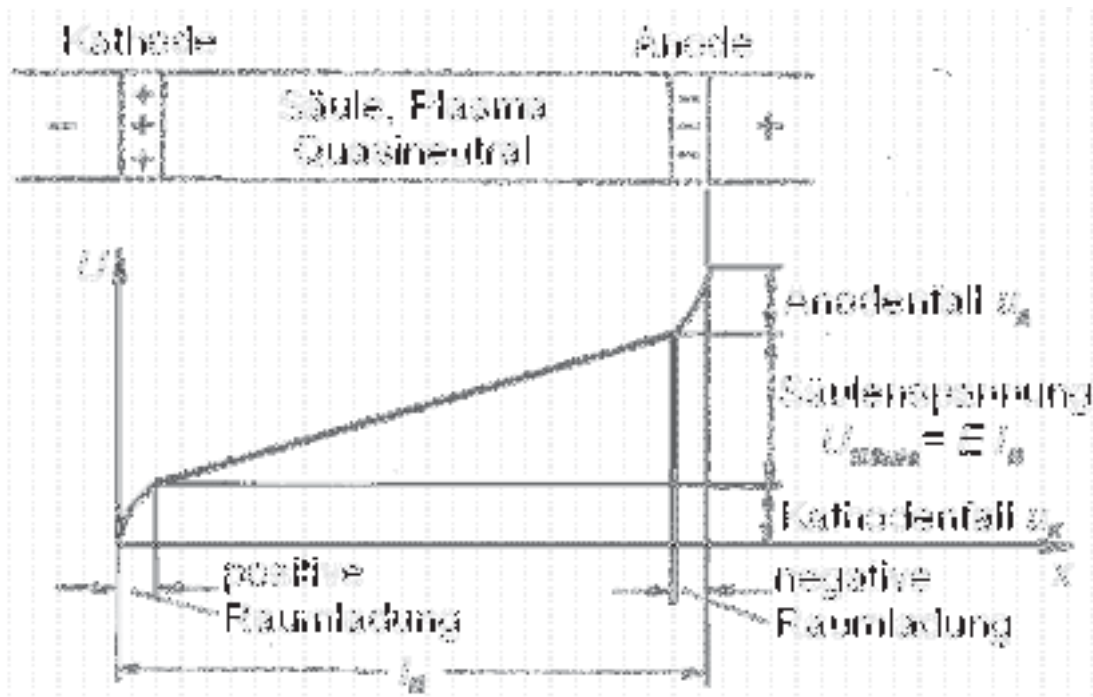
Für eine strombegrenzende Abschaltung muss die Bedingung

$$u_B \geq u_N - i \cdot R \quad (1.3)$$

erfüllt sein.

### 1.3. Lichtbogen

Der Lichtbogen unterteilt sich in mehrere Gebiete (Bild 1.4): die Lichtbogensäule, und das sich jeweils zu den Elektroden anschließende Anoden- und Kathodenfallgebiet.



**Bild 1.4:** Gebiete eines Lichtbogens (oben) und dazugehöriger Potentialverlauf (unten), schematisch

Während in der Lichtbogensäule das Plasma quasineutral ist, so herrscht vor der Kathode eine stark positive und vor der Anode eine stark negative Raumladungsdichte. Daraus resultieren eine sehr große Feldstärke und ein starker Potentialabfall. Die Dicke bzw. Länge der Schicht beträgt bei Atmosphärendruck etwa  $10^{-7} \dots 10^{-6}$  m [Hertz-65]. Dies entspricht ungefähr einer mittleren freien Elektronenweglänge [Lin-87]. Mit zunehmendem Druck sinken die Fallraumlängen [Hertz-65]. Der Spannungsbedarf der an den Elektroden befindlichen Fallgebiete liegt zwischen 5 und 30 V für die Kathode und 1 und 40 V für die Anode (abhängig von Gas und Metall) [Hertz-65]. Lindmayer [Lin-87] nennt vom Elektrodenmaterial abhängige Werte von ca. 10-20 V für die Summe aus Anoden- und Kathodenfall.

Für die Bestimmung der Stromdichten ist der Fallraumdurchmesser von Interesse. Dieser entspricht der Fläche, die der Fallraum auf den Elektroden bedeckt. Metalle mit hohen Schmelz- und Siedetemperaturen (z. B. Wolfram) weisen einen großflächigeren Fallraum auf als Metalle mit niedrigeren Temperaturen. Bei gleicher Stromstärke ergeben sich daher Stromdichten von  $10^6 \dots 10^8$  A/m<sup>2</sup> (für Metalle hoher

Schmelz- und Siedetemperatur) bis hin zu Werten von  $10^{11}$  A/m<sup>2</sup> [Lin-87]. Burkhard [Burk-85] nennt polaritätsunabhängige Stromdichten im Bereich von  $10^8 \dots 10^{11}$  A/m<sup>2</sup>, wohingegen Hertz [Hertz-65] polaritätsabhängige Stromdichtewerte von  $10^6 \dots 10^9$  A/m<sup>2</sup> für den Kathodenfall und  $10^3 \dots 10^7$  A/m<sup>2</sup> für den Anodenfall an.

Im Übergang des jeweiligen Elektrodenfallgebietes zur Plasmasäule liegt ein Gebiet, in dem sich die physikalischen Parameter wie Temperatur und Ladungsträgerdichte des Plasmas stark ändern.

### 1.3.1. Plasmasäule

Die Achsentemperatur des Bogenplasmas liegt im Bereich zwischen  $4 \cdot 10^3$  und  $50 \cdot 10^3$  K [Hertz-65]. Das den Stromfluss treibende elektrische Feld  $E$  ist in der Lichtbogensäule in Achsrichtung praktisch konstant, wodurch sich der Spannungsbedarf einer Säule der Länge  $l$  zu  $U_{\text{Säule}} = E \cdot l$  ergibt (Bild 1.4). Im Allgemeinen wächst die Feldstärke mit zunehmendem Druck und sinkt mit zunehmender Stromstärke. Charakteristische Feldstärkewerte liegen im Bereich von 5 bis 30 V/cm [Hertz-65].

Auf Grund der sehr viel höheren Beweglichkeit der Elektronen kann der Beitrag der Ionen zum Stromtransport gegenüber dem Beitrag der Elektronen vernachlässigt werden [Lin-87]. Der Stromtransport im Plasma/Lichtbogen erfolgt zu etwa 99 % durch Elektronen.

### 1.3.2. Kathodisches Fallgebiet (Kathodenfall)

Der kathodische Fallraum ist für die Aufrechterhaltung der Entladung verantwortlich, da hier die für den Stromtransport durch das Plasma notwendigen Elektronen erzeugt werden [Hertz-65]

Im kathodischen Fallraum werden die positiven Ionen so stark in Richtung der Kathode beschleunigt, dass sie die Kathodenoberfläche allmählich durch Stöße erhitzen. Sowohl die durch die Raumladungsschicht verursachten hohen Feldstärken als auch die Temperaturanhebung der Kathodenoberfläche durch die auftreffenden Ionen führen zu einer Emission von Elektronen aus der Kathodenoberfläche. Man spricht zum einen von einer Thermoemission, zum anderen von einer Feldemission [Lin-87], [Erk-74]. In der Regel liegt eine kombinierte Thermo-Feldemission als Mechanismus der Ladungsträgererzeugung

an der Kathode vor. Die Eigenschaften des Elektrodenmaterials bezüglich des Schmelz-, des Siedepunktes und der Austrittsarbeit, sowie die Beschaffenheit der Elektrodenoberfläche hinsichtlich der Rauigkeit haben hierbei einen sehr großen Einfluss auf die Höhe des Feldemissionsstromes [Burk-71].

Die Beschleunigung der aus der Kathode ausgelösten Elektronen in Richtung der Bogensäule durch das im Fallgebiet herrschende hohe elektrische Feld führt durch direkte Stoßionisation mit Teilchen und/oder durch Aufheizung des Plasmas am Übergangsgebiet zur Bogensäule zu einer zusätzlichen Ladungsträgergeneration [Erk-74], [Lin-87].

Die zum Stromtransport im Plasma notwendigen Elektronen werden folglich sowohl an der Kathodenoberfläche durch kombinierte Thermo-Feldemission (mindestens 80 % des Gesamtstromes [Erk-74]) als auch zusätzlich durch Thermoionisation am Übergangsgebiet des kathodischen Fallgebietes zur Lichtbogensäule erzeugt.

### **1.3.3. Anodisches Fallgebiet (Anodenfall)**

Der am Gesamtstrom fehlende minimale Anteil ( $\sim 1\%$ ) negativen Ionenstromes wird im Fallraum vor der Anode erzeugt [Erk-74]. Zur Bildung eines Ions stehen die sich aus der Säule in Richtung Anode bewegendem Elektronen zur Verfügung, deren Anzahl um den Faktor  $10^2 - 10^3$  über dem der zur Ionisierung zur Verfügung stehenden Neutralteilchen liegt. Die Ausbildung eines anodischen Fallraumes ist daher weitaus weniger schwierig als die eines kathodischen Fallraumes.

### **1.3.4. Kontraktion der Lichtbogens und die Ausbildung von Plasmastrahlen**

Der Lichtbogen kann als ein vom Strom durchflossener Leiter aufgefasst werden, der von seinem Eigenmagnetfeld umgeben ist. Das Eigenmagnetfeld übt eine Kraft auf die den Lichtbogen durchfließenden Ladungsträger aus, welche den Lichtbogen in Richtung seiner Achse komprimiert. Die Kraft ist umso stärker, je höher die Plasmastromdichte ist. Speziell an der Kathode ergibt sich eine, durch die den Elektronenaustrittsprozess bedingte, hohe Stromlinienkontraktion und damit verbunden eine hohe Stromdichte. In der Lichtbogensäule herrscht eine geringere Stromdichte, wodurch ein zusätzlicher Druckgradient in Richtung der Lichtbogensäule entsteht. Dieser magnetisch erzeugte Druckgradient ruft von den Elektroden weg gerichtete Plasmastrahlen hervor [Lin-87].

Eine Ausbildung der Plasmastrahlen geschieht nach [Fink-56] und [Amft-75] jedoch erst beim Überschreiten einer gewissen Mindeststromstärke bzw. Mindeststromdichte. Das an den Elektroden abströmende Plasma wird durch umgebendes Gas ersetzt, welches durch Kühlung des Kontraktionsgebietes dieses noch mehr kontrahieren lässt [Ried-67]. Die von den Elektroden ausgehenden Plasmastrahlen können bei geringen Elektrodenabständen aufeinander treffen und sich gegenseitig beeinflussen [Erk-74], [Bur-85].

Grundsätzlich ergibt sich demnach aus dem Unterschied der Stromdichten in den Fallgebieten gegenüber der Stromdichte in der Lichtbogensäule immer eine gewisse Kontraktion an den Elektroden. Die Kontraktion erscheint in den Filmaufnahmen als eine Art Brennfleck, der im Folgenden als Fußpunkt bezeichnet wird. Der Fußpunktdurchmesser entspricht dabei der Fläche, die der Fallraum auf den Elektroden bedeckt.

Der anodische Bogenansatz ist nach Ecker [Eck-54] weit weniger kontrahiert als der Kathodische.



## **1.4. Erhöhung der Lichtbogenspannung**

Die in strombegrenzenden Schaltgeräten notwendige rasche Erhöhung der Lichtbogenspannung über den Wert der treibenden Netzspannung hinaus wird durch eine Kombination mehrerer Faktoren erreicht [Erk-74], [Lin-87], [Burk-85]. Die wichtigsten hiervon werden im Folgenden behandelt.

### **1.4.1. Verlängerung des Lichtbogens**

Der zwischen sich öffnenden Kontaktstücken entstehende Lichtbogen beginnt nach einer gewissen Verzugs- bzw. Verharrzeit [Wei-88], an den Laufschiene entlang zu wandern. Die Lichtbogenwanderung wird dabei durch vom Lichtbogenstrom selbsterregte Magnetfelder angetrieben. Die um die parallelen Laufschiene entstehenden Magnetfelder bewirken eine Kraft (Lorentzkraft) auf den Lichtbogen [Erk-74], [Lin-87]. Während der Wanderung entlang divergierender Laufschiene verlängert sich die Bogensäule, und die Lichtbogenspannung steigt bei konstant anzunehmender Bogenfeldstärke entsprechend der Längenänderung an.

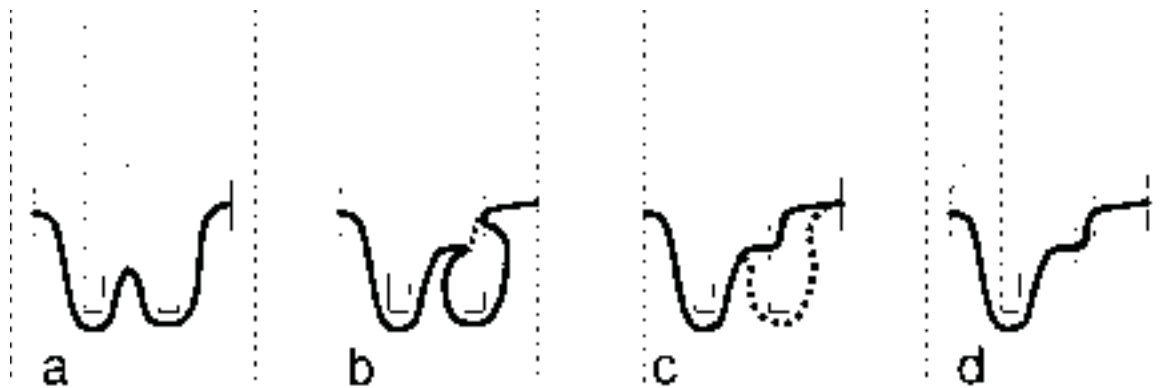
Der durch die Verlängerung erreichte Spannungsanstieg hängt vom Spreiz- bzw. Öffnungswinkel der beiden Laufschiene ab [Erk-74], [Burk-85]. Eine Vergrößerung des Winkels zwischen den Laufschiene auf hohe Werte erhöht die Rückzündhäufigkeit [Gau-98]. Ein für die Lichtbogenverlängerung geeigneter Öffnungswinkel liegt nach Gauster zwischen 90 und 120 °.

### **1.4.2. Aufteilung des Lichtbogens**

Der Bogen wird im weiteren Wanderungsprozess entlang der Laufschiene in ein Löschesystem aus mehreren isoliert voneinander befestigten Eisenblechen, den Löschesblechen, getrieben. Die Bleche liegen quer zur Bewegungsrichtung des Lichtbogens und unterteilen ihn in mehrere, elektrisch in Serie geschaltete Teillichtbögen.

Durch die Eisenbleche entsteht eine ferromagnetische Verzerrung des Bogeneigenfeldes, die auf den stromdurchflossenen Bogen eine beschleunigende Kraft ausübt [Gas-62], [Lin87], [Burk-62]. Mit Annäherung des Lichtbogens an die Eisenlöschesbleche steigt die von ihnen ausgehende, anziehende Kraftwirkung auf den Lichtbogen an.

Zur Klärung der Vorgänge bei der Lichtbogenaufteilung wird die Anordnung mit zwei Löschblechen aus Bild 1.5 herangezogen.



**Bild 1.5:** Prinzip der Lichtbogenunterteilung [Burk-85]

Die Lichtbogensäule wird durch magnetische Kräfte an die Blechvorderkanten und in die Blechzwischenräume gedrückt [Lin-87] (Bild 1.5 a), wodurch es nach [Burk-62] und [Ges-62] zur Kühlung und zur Querschnittskontraktion der Bogensäule kommt. Die Querschnittskontraktion führt zur Ausbildung von in die Blechzwischenräume gerichteten Plasmastrahlen [Burk-62] und somit zur Umwölbung einzelner Löschbleche durch den Lichtbogen (Bild 1.5b).

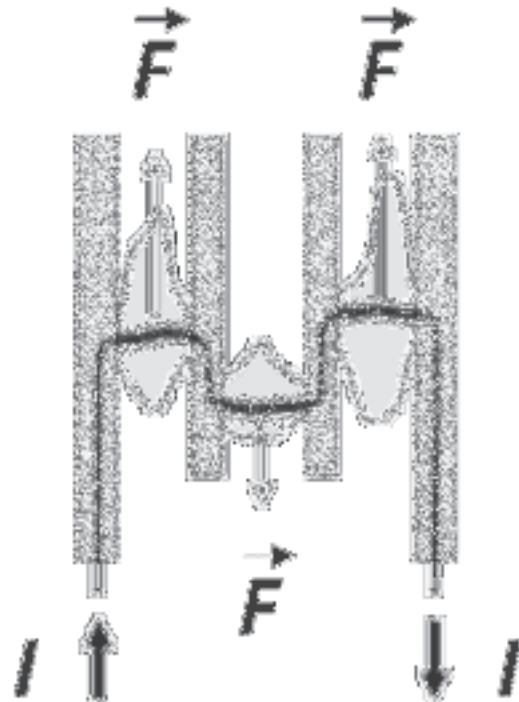
Die Lichtbogenspannung steigt weiter an, bis sich beim Überschreiten einer bestimmten Mindestspannung neue Teillichtbögen ausbilden. Die Mindestspannung pro Löschblech entspricht dabei dem Spannungsbedarf der auf den beiden Löschblechseiten neu zu bildenden Elektrodenfallgebiete und liegt für beide Fußpunkte zusammen bei etwa 15-20 V. Die Ausbildung eines anodischen Fußpunktes ist nach [Burk-62] weniger schwierig, da dieser nur die Elektronen aus der Säule aufzunehmen hat. Zur Ausbildung eines kathodischen Fußpunktes ist hingegen eine bestimmte Spannung notwendig, die für das Zustandekommen einer Entladung im vor dem Blech liegenden Ionisationsgebiet sorgt [Burk-62] (Kapitel 1.3.1). Nach der Ausbildung eines kathodischen Fußpunktes können Elektronen sofort durch den auf der anderen Blechseite liegenden anodischen Fußpunkt aus der Lichtbogensäule aufgenommen und durch das Blech geleitet werden.

Nach der Ausbildung neuer Fußpunkte (Bild 1.5 b) fließt der Lichtbogenstrom für eine gewisse Zeit dann sowohl in einem Pfad unterhalb des Löschblechs als auch über

die beiden neuen Fallgebiete durch das Löschblech hindurch (Bild 1.5 b, c). Der Strom im Löschblech nimmt in dieser Phase zu, der außerhalb ab, bis der gesamte Strom durch das Löschblech fließt (Bild 1.5 d) [14, 15].

Bei Unterteilung des Bogens in mehrere Teillichtbögen steigt die Bogenspannung rasch um die entsprechende Anzahl der neuen Fallgebietsspannungen an (Kap. 1.3).

Innerhalb eines Löschblechpaketes kommt es zu einer elektrodynamischen Beeinflussung der Teillichtbogenwanderung [Burk-85] (Bild 1.6). Da sich die einzelnen Teillichtbögen nicht alle gleichzeitig im Löschblechpaket ausbilden, kommt es zur Stromschleifenbildung. Die Schleifen weiten sich durch magnetische Kräfte auf und beeinflussen sich gegenseitig. Einzelne Teillichtbogen werden dadurch elektrodynamisch aus den Blechzwischenräumen herausgedrückt. Teillichtbögen, die zurück in Richtung Schaltkammerraum wandern, sorgen für eine kurzzeitige und geringfügige Reduzierung der hohen Bogenspannung.



**Bild 1.6:** Gegenseitige Beeinflussung der Teillichtbögen bei einer Lichtbogenunterteilung an zwei Löschblechen [Burk-85]

Schlagartige Lichtbogenspannungseinbrüche werden durch die Ausbildung von parallelen Strompfaden im bereits durchwanderten Kammerbereich unterhalb des Löschblechpaketes eingeleitet. Die parallelen Strompfade entstehen meist durch in diesem Bereich noch vorhandenes heißes Restplasma oder durch Teillichtbögen, die sich durch die elektrodynamische Beeinflussung an der Unterseite des Löschblechpaketes fest brennen und den Löschblechvorraum mit heißem Plasma hoher Leitfähigkeit beströmen. Pfade hoher Temperatur und hoher Leitfähigkeit bieten dem Lichtbogen einen geringeren Spannungsbedarf. Die Kommutierung eines

anteiligen, meist jedoch des gesamten Stromflusses auf diesen Bereich erfolgt im  $\mu$ -Sekunden-Bereich und wird als Rückzündung bezeichnet [Schi-94], [Wei-88]. Die Lichtbogenspannung bricht bei einer Rückzündung aus zuvor beschriebenen Gründen schlagartig ein.

Nach einer Rückzündung erfolgt die erneute Lichtbogenwanderung in der Regel schneller als die vorherige. Hierfür nennt [Wei-88] mehrere Gründe. Zum einen sind die für die Bogenwanderung maßgeblichen, das Eigenmagnetfeld erzeugenden und die Lorentzkraft verursachenden Ströme bei höheren Momentanwerten höher. Zum anderen durchwandert der Lichtbogen ein Gebiet, welches im Vergleich zur vorherigen Durchwanderung eine viel höhere Temperatur und damit eine geringere Dichte aufweist.

Da Rückzündungen zu einer geringen Lichtbogenspannung führen und die strombegrenzende Wirkung des Schaltgerätes bis zur erneuten Bogenaufteilung herabsetzen, sollten sie vermieden werden.

Die Unterteilung eines Lichtbogens an Löschblechen ist in strombegrenzenden Schaltgeräten die effektivste Methode, die Lichtbogenspannung zu erhöhen.

## **1.5. Untersuchungen anderer Autoren**

### **1.5.1. Experimentelle Untersuchungen**

Die Vielzahl an experimentellen Untersuchungen des Schaltlichtbogens lassen sich grob unterteilen in Untersuchungen an

- „Einfachen“ Laufschienegeometrien OHNE Löschbleche  
[Burk-71], [Amft-73], [Burk-61], [Hess-59], [Paul-97], [Müller-57]
- „Einfachen“ Laufschienegeometrien MIT Löschblechen  
[Gess-62], [Burk-62], [Nie-67]
- Kompletten Modellschaltkammern mit Löschblechpaketen.  
[Lin-72], [Wei-88], [Cle-89].

Gegenstand der Untersuchungen an einfachen Laufschienegeometrien sind in der Regel die grundlegenden Vorgänge der Lichtbogenwanderung, welche sich aus der Wanderung alter bzw. der Entstehung neuer Fußpunkte auf den Laufschiene ergeben. Die Lichtbogen-/Fußpunktwanderung hängt dabei von verschiedenen mechanischen Faktoren, wie Elektrodenmaterial, Elektrodenform, Kammervolumen und Kammermaterial, Zu- und Abluftöffnungen sowie von der Stromstärke und eigen- oder fremderregten Magnetfeldern ab. Einige Arbeiten betrachten zudem die Lichtbogenzündung durch Kontaktöffnung und untersuchen das Abwandern des Lichtbogens von der Entstehungsstelle (Kontakt) hinweg auf die Laufschiene.

Die Untersuchungen werden ergänzt durch Arbeiten, die die Lichtbogenunterteilung an Löschblechen zwischen einfachen Laufschiene mit einbeziehen. Hier liegen die Schwerpunkte auf den Mechanismen, die zur Fußpunktbildung auf den Löschblechen führen, welche sich nicht wesentlich von denen der Fußpunktbildung auf Laufschiene unterscheiden. Neben der Löschblechanzahl werden das Löschblechmaterial, die Löschblechdicke, die Löschblechform und der lichte Löschblechabstand variiert. Einen wesentlichen Einfluss auf die Aufteilung hat auch die Wanderungsgeschwindigkeit des Lichtbogens, mit der er auf die Löschbleche trifft. Burkhard [Burk-62] und Gessner [Gess-62] führten umfangreiche Untersuchungen zur Lichtbogenunterteilung durch.

Arbeiten, die sich an nahezu realen industriellen Leistungsschaltern und Schützen orientieren, und unter praxisnahen Bedingungen an idealisierten Kammermodellen

durchgeführt werden, bilden einen dritten Schwerpunkt innerhalb der Untersuchungen zu Schaltlichtbögen. Hier wird neben der Lichtbogenzündung an sich öffnenden Kontaktstücken und der Kommutierung des Bogens auf die Laufschiene die Lichtbogenwanderung und zusätzlich die Lichtbogenlöschung untersucht [Lin-72], [Wei-88]. Es werden Versuchsanordnungen und der Einfluss verschiedener Parameter wie Kontaktmaterial, Kontaktform, Kammerwerkstoff, Kammervolumen, Ausblasöffnungen, Löschblechanzahl und Löschblechform untersucht. Die für diese Arbeit wesentlichen Ergebnisse werden mit unter dem Punkt „einfache“ Laufschienegeometrie mit Löschblechen genannt.

### 1.5.1.1. „Einfache“ Laufschienegeometrie ohne Löschbleche

Arbeiten, die sich mit der Lichtbogenwanderung und Fußpunktbildung auf Laufschiene beschäftigen, sind prinzipiell auch auf die Thematik der Fußpunktbildung und -wanderung auf Löschblechen übertragbar.

Burkhard [Burk-71] untersuchte die Wanderung kathodischer Fußpunkte auf parallel verlaufenden Kupferelektroden mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera. Er betrachtete die durch die wandernden Fußpunkte verursachten Aufschmelzungsspuren und unterteilte sie je nach Wanderungsgeschwindigkeit in drei Arten:

- die **durchgehende einfache Spur** (deutliche Aufschmelzungen des Materials im Inneren)
- die **Mehrfachspur**, die auf die gleichzeitige Existenz mehrerer Fußpunkte hinweist
- die **in feine Verästelungen ausgebildete Spur**, die mit dem bloßen Auge keine Aufschmelzungen erkennen lässt und den Eindruck vieler kleiner gleichzeitig existenter Fußpunkte vermittelt.

Dabei sind die Einfachspuren das Ergebnis niedriger Fußpunktwanderungsgeschwindigkeiten mit dadurch bedingter starker Aufschmelzung, wohingegen die Mehrfachspuren und Verästelungen von schnell wandernden Lichtbögen herrühren, die das Material weniger stark aufschmelzen. Einen wesentlichen Einfluss auf die Wanderungsgeschwindigkeit des kathodischen Fußpunktes haben die Oberflächenrauigkeit, die Oxidationsschichten und der

atomare, kristalline Metallaufbau. Diese Effekte beeinflussen die Feldemission [Kapitel 1.3.2] nach Burkhard [Burk-71] wie folgt: 1.) Raue Oberflächen bieten viele Mikrospitzen, die die Feldemission durch Überhöhungen des elektrischen Feldes und der damit verbundenen Herabsetzung der Austrittsarbeit der Elektronen begünstigen. 2.) Schwach oxidierte Kupferoberflächen führen zu einer höheren Lichtbogengeschwindigkeit als nicht-oxidierte, dicke Oxidschichten verringern hingegen wieder die Lichtbogengeschwindigkeit. Die Oxidschichtdicke hat dabei einen Einfluss auf die den Feldemissionsstrom beeinflussende Austrittsarbeit der Elektronen. 3.) Bei der Untersuchung des kristallinen Metallaufbaus zeigt Burkhard hohe Wanderungsgeschwindigkeiten für polykristalline Kupferoberflächen, da die Bogenansätze die Kristallite mit der niedrigsten Austrittsarbeit bevorzugen. Einkristalline Oberflächen jeweils unterschiedlicher Kristallorientierung weisen erhebliche Unterschiede in den Lichtbogenwanderungsgeschwindigkeiten auf.

Burkhard [Burk-71] stellte fest, dass der kathodische Lichtbogenansatz aus einer Vielzahl von so genannten Elementarzellen besteht, die jeweils einen für den Werkstoff charakteristischen Mindeststrom tragen. Sie entstehen an Stellen, an denen die Feldemission begünstigt wird (z.B. Mikrorauheiten). Ein Lichtbogenfußpunkt kann sich durch Neubildung von Elementarzellen an bevorzugten Feldemissionszentren in einen weiteren, parallelen Lichtbogenfußpunkt ausbilden.

Amft [Amft-75] betrachtete neben dem kathodischen auch den anodischen Fußpunkt in Versuchsanordnungen mit parallelen Laufschiene unterschiedlichen Materials. Auch hier wurden die Bewegungsabläufe mit Hilfe einer mechanischen Schnellfilmkamera aufgezeichnet. Amft versucht, eine einheitliche, quantitative Theorie über die Wanderung der Bogenansätze in Abhängigkeit vom Elektrodenmaterial, der Elektrodenform, der Stromstärke und dem Magnetfeld aufzustellen. Er unterscheidet dabei vier Bewegungsformen der Lichtbogenansätze:

1. rasche, unterbrochene Bewegung:
  - beide Lichtbogenansätze sind durch die Aufspaltung in Fußpunkte und Elementarzellen sehr beweglich
  - *nur die Lichtbogensäule hemmt die Fortbewegung*
  - > **kontinuierliche Wanderung**
2. langsame, unterbrochene Bewegung:

- beide Lichtbogenansätze werden als Einzel- oder Mehrfachansatz langsam fortgeschoben
  - *die Bogenansätze hemmen die Lichtbogenwanderung*  
-> **quasikontinuierliche Wanderung**
3. unterbrochene Bewegung:
- beide Lichtbogenansätze wandern oder verharren als Einzel- oder Mehrfachansatz Neubildung unter Beteiligung von Plasmastrahlen
  - unterschiedliche Bewegungsformen wie in 1. und 2. und zeitweise Verharren der Bogenansätze (4.)  
-> **diskontinuierliche Wanderung**
4. keine fortlaufende Bewegung:
- beide Lichtbogenansätze stehen als Einzelansatz still  
-> **keine Wanderung**

Amft weist jedoch darauf hin, dass zur Formulierung einer quantitativen Wanderungstheorie noch wesentliche Detailuntersuchungen fehlen, wie beispielsweise Betrachtungen der Zündwahrscheinlichkeiten neuer Bogenansätze auf unbenutzten und bereits benutzten Elektroden.

Zur Thematik der Fußpunktbildung auf Elektroden führte Gassmann [Gas-68] Untersuchungen an Lichtbögen bei Stromstärken bis 40 A durch. Nach Gassmann ist zur Ausbildung eines Kathodenfalls eine zusätzliche Spannung erforderlich, die umso niedriger ist, je intensiver der Kontakt zwischen Bogen und Elektrode ist. Die Spannung liegt zwischen wenigen Volt und einigen 100 V und führt zum Durchschlag der Raumladungsschicht vor der neuen Kathode.

Paulke [Paul-97] untersuchte die Lichtbogenbewegung und die Druckentwicklung in Modellanordnungen mit parallelen und divergierenden Laufschiene. Die Lichtbogenzündung erfolgte durch Kontakttrennung bei Trennströmen bis 4,5 kA unter Variation des Kammervolumens und der Ausblasöffnungen. Paulke stellte fest, dass die Wanderungsgeschwindigkeit der Bogenfront annähernd linear bis auf einen Endwert ansteigt, der von der Stromhöhe und den Ausblasöffnungen in der Kammerverdämmung bestimmt wird. Die Geschwindigkeit des Bogenrückens lässt sich zusätzlich durch einen erhöhten Abstand der Kammerwände steigern. Die Höhe des Lichtbogenbandes innerhalb der Schaltkammer wird nach Paulke durch die Druck und Strömungsverhältnisse innerhalb der Schaltkammer und nicht durch die



Deformation des Bogenquerschnitts durch die seitlichen Kammerwände hervorgerufen.

### **1.5.1.2. „Einfache“ Laufschienegeometrie mit Löschblechen**

Im Folgenden werden einige Arbeiten, die die Lichtbogenunterteilung an Löschblechen in stark idealisierten Anordnungen untersucht haben, betrachtet.

Gessner [Gess-62] untersuchte die Lichtbogaufteilung an Eisen- und Kupferlöschblechen verschiedener Form in einer Anordnung mit parallelen Kupferlaufschiene bei Gleichströmen von 100 bis 1000 A. Er stellt fest, dass oberhalb eines gewissen Grenzstromes eine Lichtbogenunterteilung an den untersuchten rechteckigen Eisenlöschblechen stattfindet. Die Lichtbogenunterteilung wird bei der Verwendung von ferromagnetischen Blechen begünstigt, da sie eine durch Magnetfeldverzerrung entstehende, auf den Lichtbogen anziehende magnetische Kraft ausüben. Die Bleche aus nicht-ferromagnetischem Material eignen sich nach [Gess-62] hingegen nicht zur Bogenunterteilung. Die zur Fußpunktbildung auf dem Löschblech erforderliche Zündspannung wird durch die Verlängerung und die Faltung der Bogensäule zwischen den Löschblechen aufgebracht, was nach Gessner bei nicht-ferromagnetischen Materialien nur bei großen Blechabständen möglich ist. Löschbleche, die zusätzlich mit einem V-Schlitz oder mit Löchern versehen sind, erzielen eine Spannungserhöhung durch Einengung des Bogenquerschnitts und den damit verbundenen Energieentzug. Im Falle der Kupferbleche erhöht sich die Wahrscheinlichkeit einer Aufteilung im Vergleich zu den rechteckigen Varianten ohne Schlitz und Löcher schon bei geringem Blechabstand. Die beste Lichtbogenunterteilung ergibt sich bei ferromagnetischen Eisenblechen mit V-Schlitz oder Löchern, da sie zusätzliche Kräfte auf den Lichtbogen ausüben. Bei der Verwendung von Schlitzblechen weist Gessner auf die Gefahr der Wiederzündung im schlecht entionisierten Schlitzanfang hin.

Burkhard [Burk-62] untersuchte die Unterteilung an mehreren Löschblechen unter Variation der Löschblechzahl, -dicke, -form und des Löschblechabstandes, und stellte bestimmte Bemessungsrichtlinien für Leistungsschalter mit Löschblechkammern auf. Die Untersuchungen erfolgten überwiegend mit Gleichströmen bis 1000 A an einer Anordnung, bei der die Löschbleche von oben in einen zwischen zwei Molybdänelektroden brennenden Lichtbogen eingeführt werden.

So wurden reproduzierbare Auftreffgeschwindigkeiten des Lichtbogens an den Löschblechvorderkanten nachgebildet und festgestellt, dass sich die Lichtbogensäule vor der Aufteilung stark kontrahiert und durch Plasmaströmungen in die Blechzwischenräume hineinwölbt. Die Wölbung hat eine Brennspannungserhöhung zur Folge und führt ab einem Wert von 15 V zur Ausbildung von Fußpunkten auf dem Löschblech. Ob sich der Lichtbogen auch als Schleife zwischen zwei Bleche legt, hängt nach [Burk-62] vom Löschblechabstand und dem Säulendurchmesser, der wiederum von der Stromhöhe und der Kühlung durch die Bleche bestimmt ist, ab. Löschbleche aus ferromagnetischem Material ziehen den Lichtbogen an und bewirken so eine zusätzliche beschleunigende Kraft auf den Lichtbogen. Schlitze und Kerben in den Löschblechen erhöhen zusätzlich durch Einengung des Bogenquerschnitts den Spannungsgradienten vor den Löschblechvorderkanten, wodurch die Aufteilung erleichtert wird. Nach der Lichtbogenunterteilung bewegen sich die Teillichtbögen auf den Löschblechoberflächen. Burkhard gibt an, dass sich die Wanderungsgeschwindigkeit auf den Blechen durch die Blechbreite, die Blechdicke und durch Überzug der Blechoberflächen mit anderen Metallen beeinflussen lässt. Das Wanderungsverhalten entspricht dem Verhalten auf Flächenelektroden. Die realen Wanderungsbedingungen der Lichtbogensäule in einer Schaltkammer begrenzten Volumens werden in [Burk-62] hingegen nicht berücksichtigt.

Niemeyer [Nie-67] deutete aus Untersuchungen, dass zur Lichtbogenunterteilung an Löschblechen ein von der Löschblechgeometrie abhängiger Mindeststrom notwendig ist. Dieser ergibt sich aus der auch von [Burk-62] und [Gess-62] getroffenen Annahme, dass die Lichtbogenspannung zur Ausbildung eines neuen Anoden- und Kathodenfalls auf dem Blech um eben diesen Wert erhöht werden muss. Die Bogenspannungserhöhung geschieht neben der Kühlung und damit verbundenen Kontraktion der Bogensäule vor den Blechen nach [Nie-67] auch durch Verdampfung von Metall an der Blechvorderkante.

### **1.5.1.3. Komplette Modellschaltkammern mit Löschblechpaketen**

Lindmayer [Lin-72] betrachtete unter anderem die Lichtbogenunterteilung an Modellanordnungen mit vier 1,5 mm dicken Eisen- oder Messinglöschblechen in Abhängigkeit von der Löschblechform, des lichten Löschblechabstandes und von unterschiedlich großen Zu- und Abluftöffnungen im Strombereich von 2500 bis

8500 A. In Kammern mit nicht gasendem Wandmaterial verbesserten dabei V-förmig oder trapezförmig gekerbte Vorderkanten der Eisenbleche die Lichtbogenunterteilung. Die Löschblechlänge hat keinen Einfluss auf die Lichtbogenunterteilung. Die bei Messingblechen fehlende Saugkraft auf den Lichtbogen verschlechtert die Aufteilung an diesen Blechen. Mit zunehmender Stromstärke verschlechtert sich die Lichtbogenunterteilung. Als Ursache nennt Lindmayer die bereits von [Burk-62] beschriebene erschwerte Schleifenbildung zwischen den Löschblechen, da sich der Lichtbogenquerschnitt mit zunehmender Stromstärke verbreitert. Hier verbessert eine Vergrößerung des lichten Blechabstandes die Verhältnisse. Eine Veränderung der Zu- und Abluftöffnungen verändert die Druck- und Strömungsverhältnisse in der Kammer und beeinflusst die Bogenunterteilung. Hier weist Lindmayer darauf hin, dass optimale Werte für die Zu- und Abluftöffnungen bestehen. Anhand von Filmaufnahmen zeigt Lindmayer, dass parallel zu den im Löschblechpaket befindlichen Lichtbögen heiße Gebiete vor oder hinter den Löschblechen existieren, die mit den Teillichtbögen mehr oder weniger gut leitend in Verbindung stehen.

Weichert [Wei-88] untersuchte parallele Laufschieneanordnungen mit einem Paket aus handelsüblichen Schutzschaltern, bestehend aus 13 V-förmig geschlitzten Löschblechen. Er ermittelte den Einfluss des Löschblechpaketes auf einen in unterschiedlicher Entfernung gezündeten Lichtbogen im Trennstrombereich von 1 bis 3 kA in einer 7 mm tiefen Kammer unterschiedlicher Höhe. Er stellte fest, dass die Lichtbogenwanderung und -aufteilung desto schneller erfolgt, je enger der Entladungskanal nach der Zündung ist, und je höher die den Bogen antreibende, von der Stromstärke abhängige Anfangsinduktion ist. Des Weiteren wurde festgestellt, dass sich auch ein in unmittelbarer Nähe der Blechkante gezündeter Lichtbogen aufteilt. Im Falle eines in voller Saugwirkung der Löschbleche liegenden Lichtbogens, der sich rasch auf die gesamte Länge des Blechpaketes ausbildet, kommt es nach [Wei-88] zu einer nahezu idealen Strombegrenzung. Der Raum hinter dem Ort der Lichtbogenentstehung spielt eine wesentliche Rolle für den Beginn der Bogenwanderung, da die Druck- und Strömungsverhältnisse beeinflusst werden.

Die Bedeutung der Druck- und Strömungsverhältnisse auf die Lichtbogenwanderung und Aufteilung ist in vielen experimentellen Arbeiten erwähnt und untersucht worden. Es bleibt festzuhalten, dass Öffnungen, die in Wanderungsrichtung seitlich zu oder hinter den Löschblechen angebracht sind, eine Druck abbauende Wirkung

haben und die Lichtbogenwanderungsgeschwindigkeit stark beeinflussen [Behr-80], [Beer-73], [Lin-72], [Schi-94]. Das Kammervolumen hat ebenso Einfluss auf die Druckentwicklung. So ist nach Beer [Beer-73] der Maximaldruck in kleinen Kammer größer als in großen Kammern. In engen Kammern, in denen der Lichtbogen durch den Kontakt mit Isolierstoffwänden stark gekühlt wird, ist der Druckaufbau hingegen geringer, da weniger Leistung zum Aufheizen des Volumens zur Verfügung steht. Gleiches gilt für den Energieentzug durch kühlende Löschbleche. Hohe Drücke sind nach Schütte [Schü-61] die Auswirkungen schnell wandernder Lichtbögen, die in engen Kammern als massearmer Kolben das vor der Bogenfront liegende Volumen komprimieren.

### **1.5.2. Simulationen des Schaltlichtbogens**

Der Vielzahl an experimentellen Untersuchungen stehen weitaus weniger Untersuchungen bezüglich der Thematik einer Simulation von Lichtbögen gegenüber. Das Interesse hieran seitens der Hersteller von Schaltgeräten ist bereits seit einigen Jahren enorm hoch. Mit einer realitätsnahen Simulation können sich die Entwicklungszeiten bei Schaltgeräten stark reduzieren lassen. Aufwändige Bauten von Prototypen mit anschließenden experimentellen Testreihen zur Überprüfung der Funktion im Schaltfall können durch Simulationen reduziert werden bzw. komplett entfallen [Grot-97]. Vielmehr kann der Schaltvorgang sowie der Einfluss von Geometrie- und Materialänderungen auf den Schaltlichtbogen mittels Simulationen untersucht werden.

Seit einigen Jahren widmet sich eine steigende Anzahl von Forschern dem Thema der Simulation von Lichtbögen [Kar-98], [Rüm-05], [Andr-01] [Stam-02], [Swie-03], [Spring-07]. Dabei erfolgen die Untersuchungen zumeist an einfachen Geometrien. In jüngerer Zeit wird jedoch von den einfachen Geometrien immer rascher auf reale Geometrien, z.B. von Motorschutz- oder Leitungsschutzschaltern übergegangen [Rüm-05].

Ein Unterschied in den zuvor genannten Arbeiten findet sich in der jeweiligen Stufe der Vereinfachung, die für ein bestimmtes Simulationsmodell getroffen wird. Hierzu zählen:

- Laufschiene und Kammergeometrie

- Fallgebiete (Fußpunkte) auf den Elektroden (Laufschiene)
- Ein oder mehrere Löschbleche
  - Fallgebiete (Fußpunkte) auf dem Löschblech

Ein wesentlicher Unterschied liegt heutzutage im Bereich der Miteinbeziehung von Löschblechen in die Simulation und dem damit verbundenen Lichtbogenaufteilungsvorgang an ihnen. Diese Nachbildung ist von großem Interesse, da die Löschbleche in Schaltgeräten der Niederspannungstechnik notwendige Bedingungen zur Abschaltung herstellen (Kapitel 1.4.2).

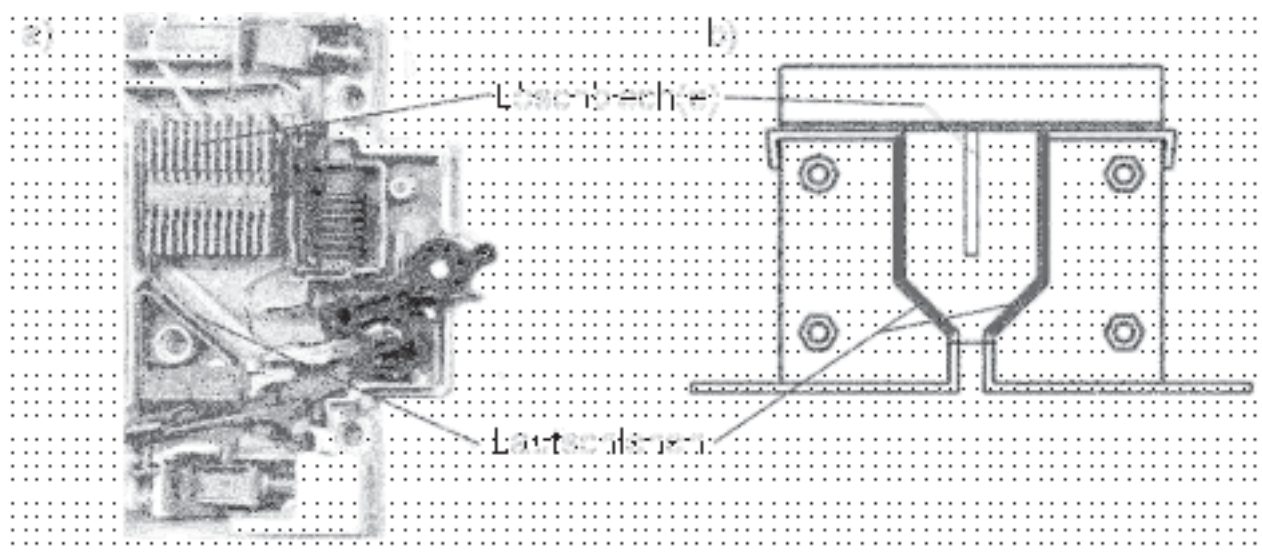
Ein Schwerpunkt der Arbeiten von Mutzke [Lin-03], [Lin-04], [Lin-05a], [Lin05b], [Rue-06], [Mut-07] liegt in eben jener Simulation der Lichtbogenunterteilung durch die Nachbildung der Fußpunktbildung sowie der anschließenden Wanderung bei zunächst einem Löschblech.

Um die gewonnenen Simulationsergebnisse auf physikalische Richtigkeit überprüfen zu können, müssen experimentelle Untersuchungen an realen, dem Simulationsmodell entsprechenden Anordnungen durchgeführt werden. Dies ist ein Bestandteil dieser Arbeit.

## 2. Versuchseinrichtung und Versuchsbedingungen

### 2.1. Aufbau der Versuchsschalter

Es wurden Modellschaltkammern mit paralleler und divergierender Anordnung der Laufschiene untersucht. Die Motivation zur Auswahl der Laufschiene- und Schaltkammergeometrie sowie die Unterschiede zwischen den einzelnen Kammervarianten werden in den folgenden Kapiteln erläutert.



**Bild 2.1:** a) Foto eines Leitungsschalters (Typ AEG Elfa E81S) und b) Modellschaltkammer mit divergierenden Laufschiene und einem Löschblech

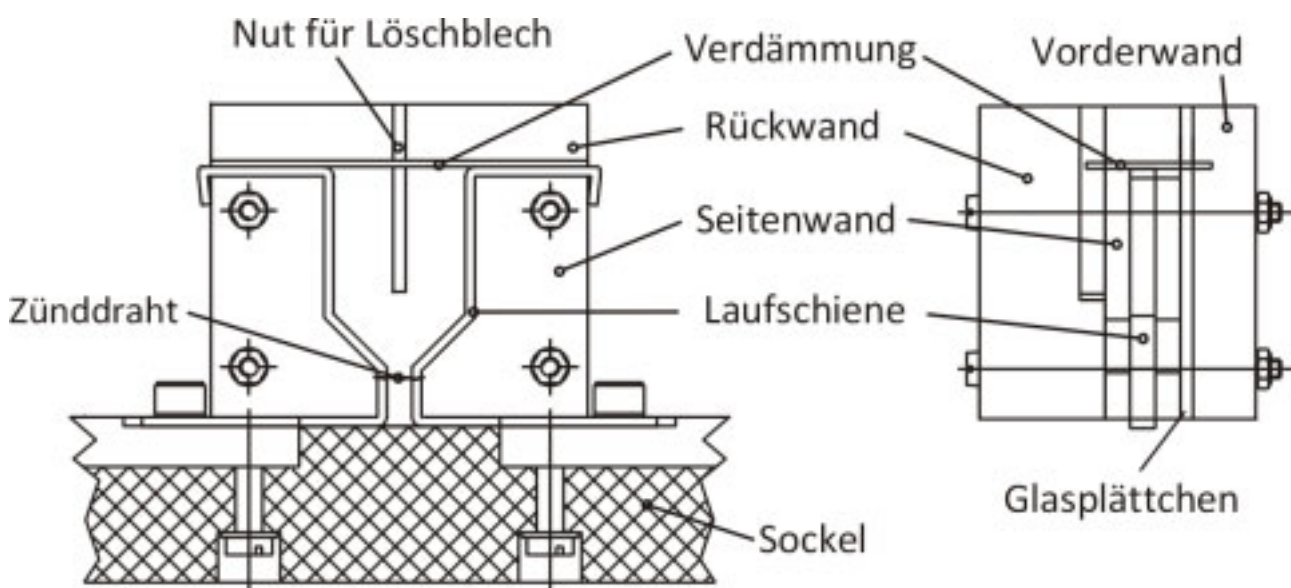
Um die Verhältnisse der experimentellen Untersuchungen den Simulationen anzupassen, werden jedoch folgende Vereinfachungen getroffen:

1. Das Simulationsmodell [Lin-03], [Lin-04], [Lin-05a], [Lin-05b], [Rue-06] [Spring-07] besteht aus zwei Laufschiene und nur einem Löschblech. Die Löschblechanzahl in den Simulationen soll erst dann erhöht werden, wenn die Lichtbogenaufteilung an einem Löschblech physikalisch hinreichend genau nachgebildet werden kann. Anstelle eines ganzen Löschblechpaketes befindet sich daher auch in den Modellschaltkammern nur ein Löschblech.

In den Simulationsmodellen sind zurzeit keine beweglichen Teile berücksichtigt [Rue-06]. Die Laufschiene sind daher in der Versuchsschaltkammer starr befestigt. Auf einen Antrieb kann verzichtet werden.

- Die Lichtbogenzündung in den Simulationen erfolgt mittels eines leitfähigen Kanals, der die beiden Elektroden anfänglich miteinander verbindet. In der Modellschaltkammer wird dieser leitfähige Kanal durch die Verdampfung eines Kupferdrahtes mit einem Durchmesser von 0,1 mm, der im Folgenden als Zünddraht bezeichnet wird, erzeugt.

Bild 2.2 zeigt den Aufbau einer Modellschaltkammer mit divergierenden Laufschiene und einem Löschblech anhand einer technischen Zeichnung. Der beschriebene modulare Kammeraufbau gilt sowohl für die divergierenden als auch für die parallelen Laufschieneanordnungen.



**Bild 2.2:** Vorder- und Seitenansicht einer Modellschaltkammer mit divergierenden Laufschiene und einem Löschblech

Die Schaltkammer besteht aus mehreren Komponenten: Die beiden Laufschiene haben einen Querschnitt von 1,5 x 4 mm und bestehen aus Elektrolytkupfer (E-Cu). Sie sind auf zwei Kupferanschlüssen, die in einem Sockel aus Hartpapier eingelassen sind, befestigt. Um die Laufschiene und das Löschblech herum ist die

Modellschaltkammer in Modulbauweise aufgebaut: Die Rückwand und die Seitenwände des Versuchsschalters bestehen aus dem Material „Dotherm 700“ [Doth-06], einem temperaturresistenten und kaum gasenden Werkstoff. Die Vorderseite der Kammer ist zur optischen Beobachtung durch eine Glasscheibe geschlossen, die mittels einer durchsichtigen Plexiglasscheibe an die Seitenteile gedrückt wird. Die Glasscheibe schützt das Plexiglas vor heißem Plasma, welches ein starkes Ausgasen des Kunststoffes verursachen würde [Lin-87]. Ein Streifen aus glasfaserverstärktem Kunststoff verschließt die Kammeroberseite. Er ist mit Ausblasöffnungen versehen, die einen bestimmten prozentualen Anteil des oberen Kammerquerschnitts betragen. Die Ausblasöffnungen sind mehrere, gleichmäßig über den gesamten rechteckigen Verdämmungsquerschnitt verteilte, runde Bohrungen mit einem Durchmesser von 0,5 – 1,0 mm (Siehe Bild 2.3). In der Kammer befindet sich mittig zwischen den Laufschiene ein Löschblech.

Kurz oberhalb des geschlossenen Kammersockels ist ein 0,1 mm dicker Kupferzünddraht (Kap. 5.1) an den Laufschiene befestigt.

Die Seitenteile, das Schutzglas und die Vorderwand werden nach der „Montage“ um die Laufschiene an vier Stellen mit der Kammerrückwand verschraubt. Die gesamte Kammer wird zusätzlich mit zwei Bügeln (im Bild 2.2 nicht dargestellt) auf dem Sockel fixiert.

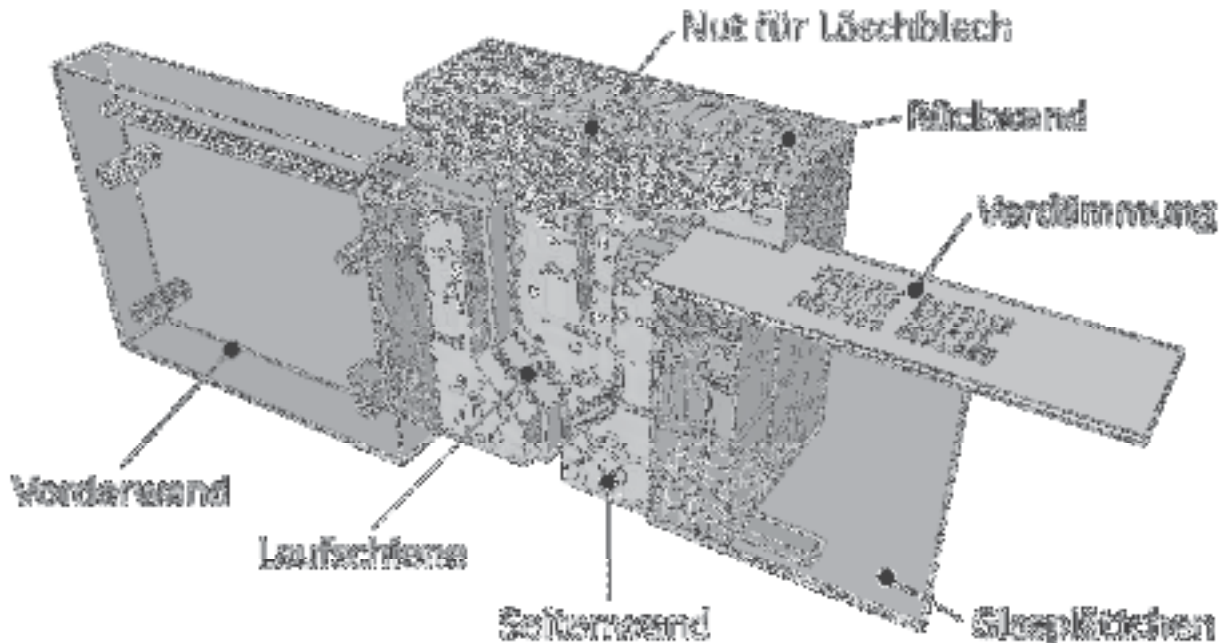
Alle in Kammernähe befindlichen Schrauben und Halterungen sind aus Messing hergestellt. Dieses Material ist nicht-ferromagnetisch und kann daher keine beeinflussenden magnetischen Kräfte auf den Lichtbogen ausüben [Lin-87].

Ein besseres Bild der verwendeten Modellschaltkammern und Bauteile bekommt man durch dreidimensionale technische Zeichnungen. Die realen Kammerbauteile werden mit dem Programm SketchUp<sup>®</sup> der Firma Google<sup>™</sup> angefertigt. Nach Eingabe aller Kammerbauteile können diese virtuell zusammengesetzt und beliebig dargestellt werden.

Das Bild 2.3 zeigt ein dreidimensionales Modell einer Schaltkammer mit divergierenden Laufschiene. Das Modell ist hier in einem auseinander genommenen Zustand dargestellt. Das mittig in der Kammerrückwand fixierte Löschblech ist nicht dargestellt. Um in die Kammer hineinschauen zu können, ist die



Vorderwand nach links und die Verdämmung und das Glasplättchen nach rechts verschoben.



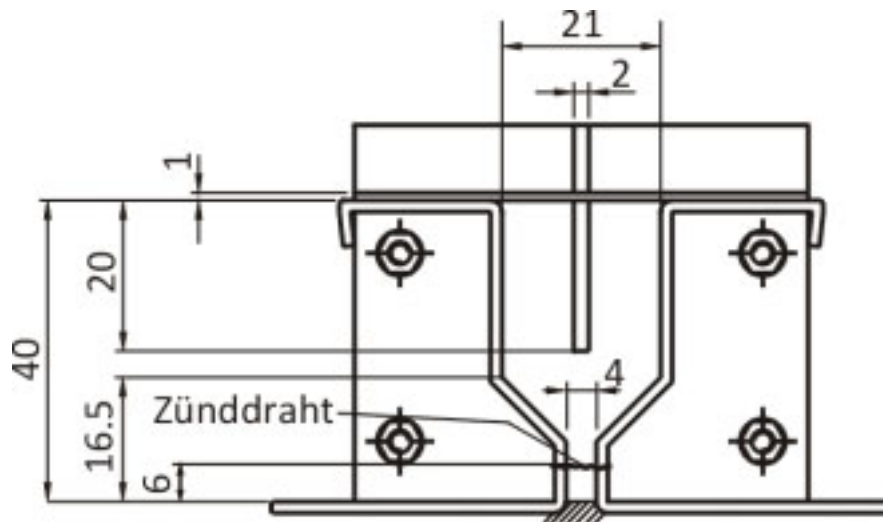
**Bild 2.3:** Dreidimensionales Modell einer in den Versuchen verwendeten Schaltkammer

## 2.1.2. Kammer mit divergierende Laufschiene

### 2.1.2.1. Ein Löschblech

Das Bild 2.4 zeigt die für die Versuche verwendete Modellschaltkammer mit einem Löschblech. Der divergierende Laufschienebereich beginnt bei einer Kammerhöhe von 8 mm. Die Kammerbreite beträgt ab 16,5 mm Kammerhöhe bis hin zur Kammeroberseite 21 mm, die Kammerhöhe 40 mm und die Kammertiefe 4 mm, 8 mm oder 12 mm.

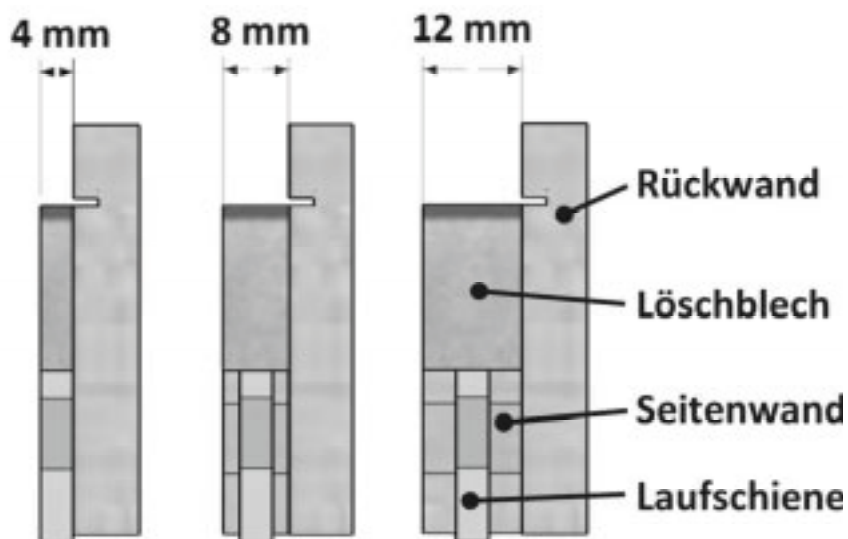
Die verschieden tiefen Kammern sind in Bild 2.5 dargestellt. Die 4 mm breiten Laufschiene befinden sich mittig zwischen der Kammerrückwand und der die Vorderseite bildenden Glasplatte. In der 4 mm tiefen Kammer liegen die Laufschiene deshalb direkt an der Vorder- und Rückseite der Modellschaltkammer an.



**Bild 2.4:** Schematische Darstellung der Modellschaltkammer mit divergierenden Laufschienen und einem Löschblech

Die obere Kammerverdümmung ist mit Ausblasöffnungen versehen, die 20, 40 oder 60 % des oberen Kammerquerschnitts betragen.

Das 20 mm hohe Löschblech befindet sich zwischen den beiden Laufschienen in der Kammermitte. Es ist einseitig in einer 4 mm tiefen Nut in der Kammerrückwand fixiert. Die untersuchten Löschblechtypen sind in Kapitel 2.1.3 beschrieben.

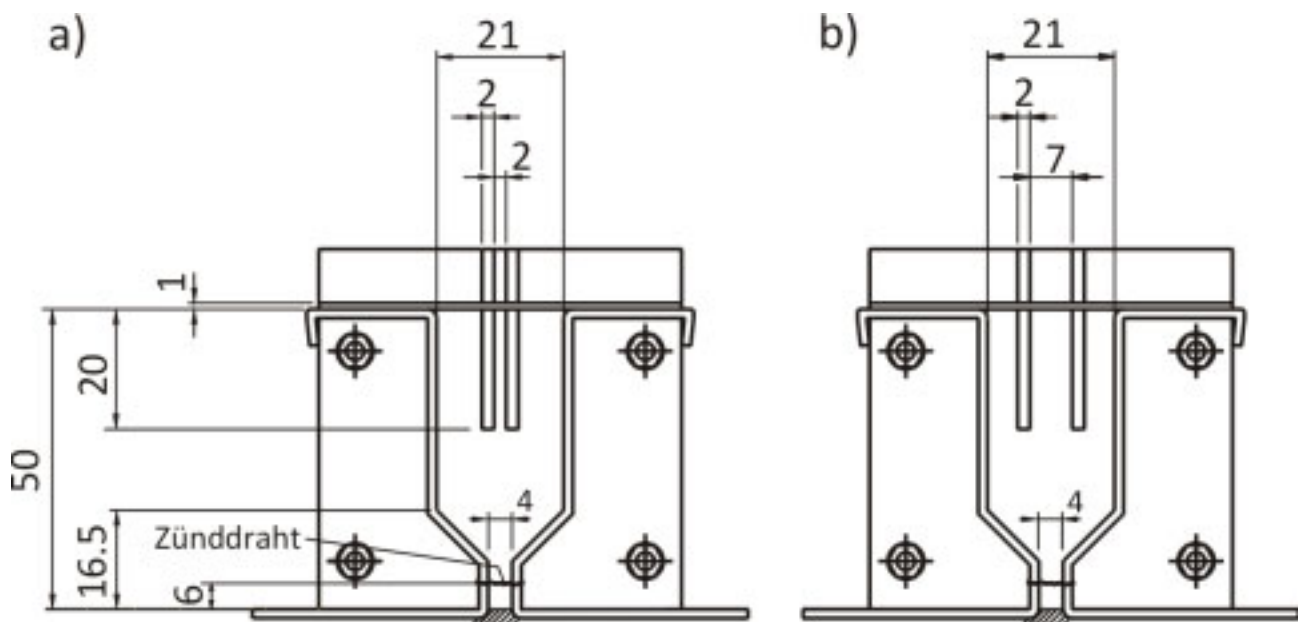


**Bild 2.5:** Seitenansicht der 4, 8 und 12 mm tiefen Kammer aus Bild 2.4

### 2.1.2.2. Zwei Löschbleche

Zusätzlich zu den Experimenten an Kammern mit einem Löschblech wurden Untersuchungen an 50 mm hohen Modellschaltkammer mit zwei Löschblechen bei unterschiedlichem Löschblechabstand durchgeführt. Durch die Erhöhung der Kammer um 10 mm (siehe voriges Kapitel) erhöht sich der Abstand der Löschblechunterkante zum divergierenden Bereich. Hierdurch wird der Einfluss der Lichtbogenaufweitung auf die Lichtbogenunterteilung reduziert.

Der lichte Löschblechabstand wurde in 1 mm-Schritten von 2 mm bis auf 7 mm erhöht.

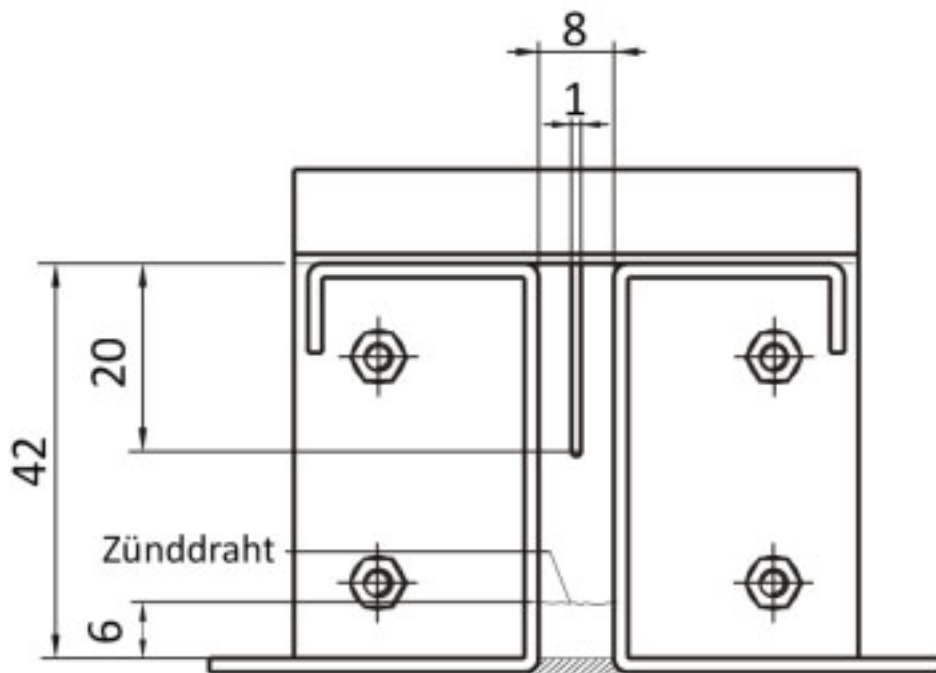


**Bild 2.6:** Modellschaltkammer mit divergierenden Laufschienen und zwei Löschblechen, 12 mm tief; a) 2 mm, b) 7 mm Löschblechabstand (sonstige Abmessungen wie a))

Das Bild 2.6 zeigt a) die Kammer mit 2 mm und b) mit 7 mm Blechabstand. In dieser 12 mm tiefen Modellkammer wurde überwiegend das Aufteilungsverhalten des Lichtbogens untersucht.

### 2.1.3. Parallele Laufschieneanordnung

Die Modellschaltkammer mit parallelen Laufschiene ist in Bild 2.7 dargestellt. Sie dient dem direkten Vergleich mit der Simulation. Das von Mutzke [Mut-07] in ANSYS/CFX verwendete Simulationsmodell bildete dabei die Vorlage zur Erstellung der Versuchsschaltkammer.

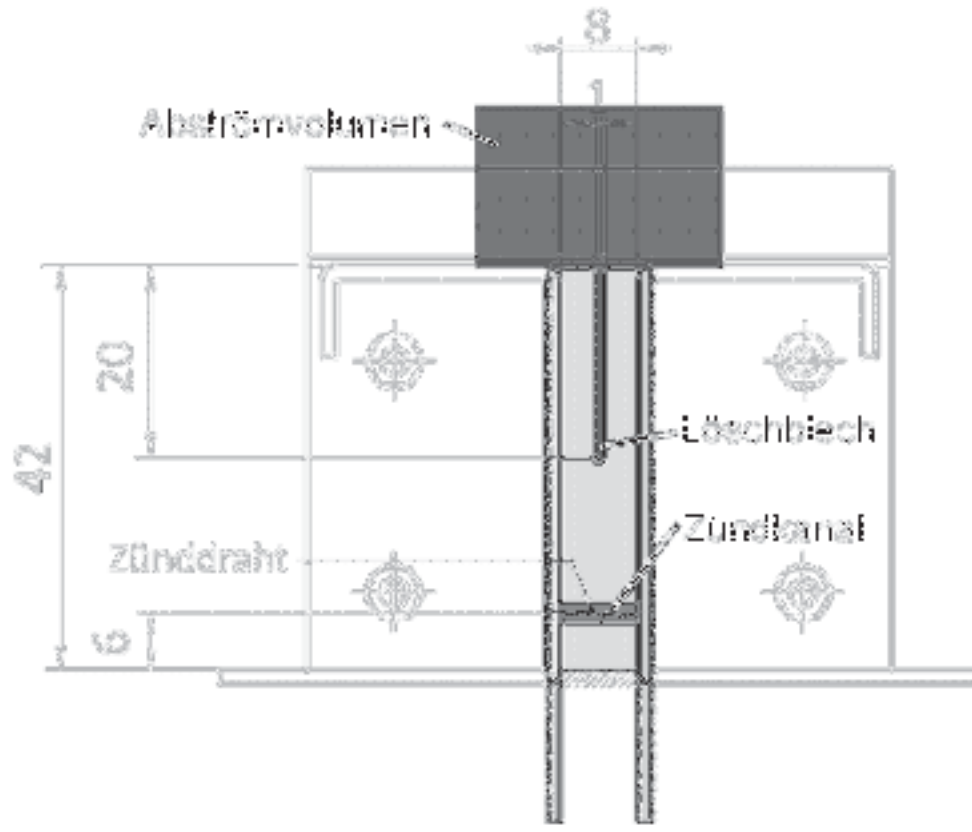


**Bild 2.7:** Modellschaltkammer mit parallelen Laufschiene und einem Löschblech

Die Kammertiefe entspricht mit 4 mm genau der Laufschienebreite. Die Lichtbogenzündung per Zünddraht erfolgt 6 mm oberhalb des Kammersockels. Mittig zwischen den Laufschiene befindet sich ein 1 mm dickes, 20 mm hohes Löschblech. Die obere Kammerverdämmung ist mit Ausblasöffnungen versehen, die 0, 20 oder 40 % des oberen Kammerquerschnitts betragen.

Eine Überlagerung des Simulationsmodells mit der Versuchsschaltkammer ist in Bild 2.8 dargestellt. Die Modelle unterscheiden sich wie folgt: 1.) Der Kammersockel im Simulationsmodell ist geöffnet. 2.) Das Abströmvolumen ist im Simulationsmodell begrenzt und besitzt die Abmessungen (BxHxT) 11x4x4 mm bzw. 26x17x19 mm. 3.) Die obere Kammerverdämmung ist in den Simulationen vollständig geöffnet. 4.) Die Laufschieneknicke an Kammerober- und Kammerunterseite, die in der experimentellen Anordnung der Kammerbefestigung dienen sind im

Simulationsmodell nicht nachgebildet. 5.) Der Zünddraht wird in den Simulationen durch den als „Zündkanal“ bezeichneten Bereich nachgebildet. Das mittig liegende Löschblech ist 1 mm dick und hat eine Höhe von 20 mm.

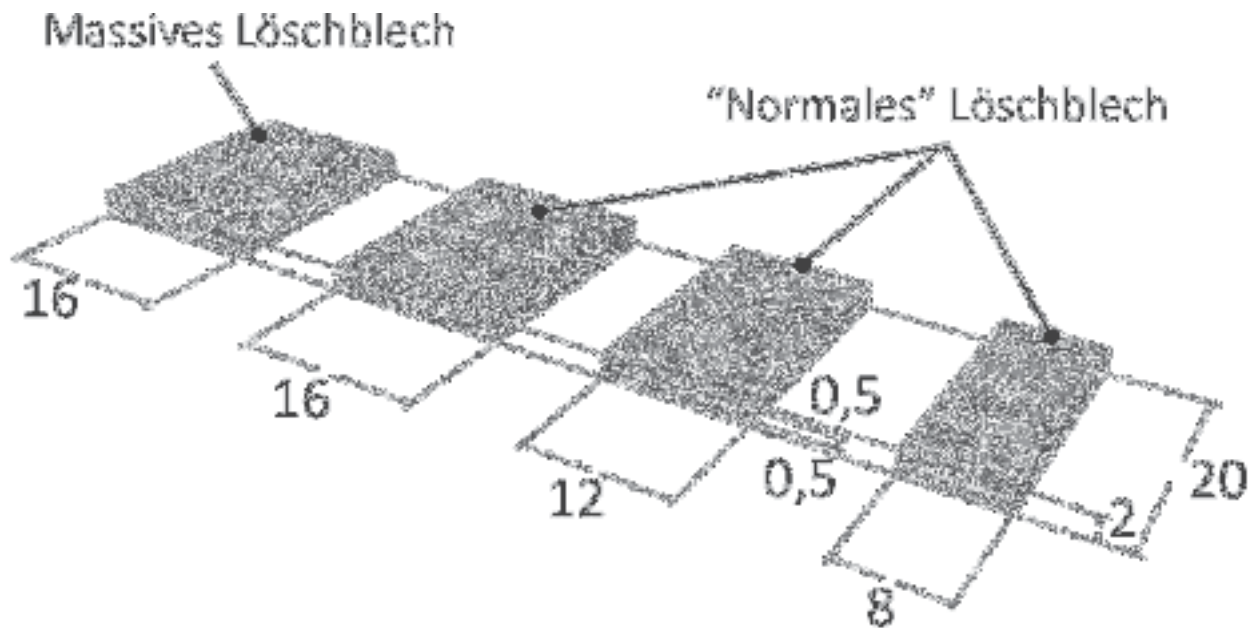


**Bild 2.8:** Modellschaltkammer mit parallelen Laufschielen(Hintergrund) mit überlagertem Simulationsmodell (Vordergrund)

#### 2.1.4. Löschbleche und –anfertigung

In den Untersuchungen werden die beiden in Bild 2.9 dargestellten Löschblechtypen verwendet.

Die massiven Löschbleche bestehen aus Stahlblech. Die 2 mm dicke Variante dient dazu, Vergleichsdaten für die Messungen mit den präparierten Löschblechen zu erhalten.



**Bild 2.9:** Modelle der verwendeten Löschbleche

Die anderen Löschblechvarianten sind speziell präparierte Löschbleche. Sie bestehen aus jeweils zwei 0,5 mm dicken Stahlplättchen, die über einen 1 mm dicken, niederohmigen Messshunt verbunden sind. Damit wird die Bestimmung des Teilstromflusses durch das Löschblech ermöglicht. Sowohl der spezielle Aufbau, als auch der niedrige Widerstand des Shunts sind so ausgelegt, dass der Aufteilungsvorgang des Lichtbogens – im Speziellen die Ausbildung von Fußpunkten auf dem Blech – nicht beeinflusst wird.

Der Aufbau eines normalen Löschblechs einer 12 mm tiefen Kammer ist in Bild 2.10 dargestellt. Das Löschblech besteht aus zwei 0,5 mm dicken Stahlblechen, die mittels zweier 0,1 mm dicken Folien aus der Widerstandlegierung Konstantan [God-06] verbunden sind. Die Konstantanfolien sind jeweils in einer Lage, d. h. „ringförmig“ um zwei elektrisch gut isolierende und temperaturresistente etwa 0,8 mm dicke Keramikstreifen gefaltet.

Um einen bestimmten Messwiderstand zu erreichen, wird ein Folienstreifen in Längsrichtung und der andere in Querrichtung um den Keramikkörper gelegt. Beide Wickel haben eine Höhe von etwa 1 mm, so dass sich zusammen mit den Stahlblechen eine Löschblechdicke von etwa 2 mm ergibt. Der Shuntwiderstand liegt im Bereich von Zehntel Milliohm. Die Verbindung der parallel liegenden Konstantan-

Keramikwickel mit den Löschblechhälften erfolgt dabei mittels Lötzinn in einem Lötöfen. Hierbei wird aufgrund des Einsatzes von Keramik ein bestimmtes Temperaturprofil abgefahren. Nach dem Verlöten werden die beiden Seitenteile des Bleches mit Drähten kontaktiert, die anschließend miteinander verdrillt werden (in Bild 2.10 nicht dargestellt). Dies gewährleistet minimale induktive Störeinkopplungen in die durch die Zuleitungen aufgespannte Messschleife. Zuletzt wird das Löschblech entlang der Seiten-, Ober- und Unterkante mit Silikon verschlossen (verfüllt), damit das in der Modellschaltkammer befindliche Plasma nicht in den Blechzwischenraum eindringen und den Messshunt kurzschließen kann. Eine anschließende Reinigung mit Aceton entfernt die von der Anfertigung der Bleche stammenden Fett- und Silikonspuren.



**Bild 2.10:** Aufbau eines normalen Löschblechs mit Shunt (obere Stahlblechhälfte nicht dargestellt)

Die „Grundfläche“, die für den Aufbau des integrierten Shunts auf den normalen Löschblechen für die 12 mm tiefen Kammern zur Verfügung steht, sind 16\*20 mm. Davon stecken 4 mm der 16 mm breiten Bleche im Schlitz der Modellschaltkammerrückwand, um das Blech zu fixieren. Ein Konstantan-Keramikwickel liegt daher weniger weit in der Kammer als der andere. Das Löschblech wird in allen Untersuchungen mit der längs umwickelten Seite in der

Rückwand fixiert. Hierdurch sollen etwaige Einflüsse der Wickelrichtung der Konstantanfolie auf die Wanderung der beiden Teillichtbögen (Kapitel 1.4.2) vermieden werden.

In den 4 und 8 mm tiefen Kammern befindet sich jeweils nur ein Querwickel zwischen den beiden Löschblechhälften, da die für den Aufbau des Shunts zur Verfügung stehende Grundfläche geringer als in der 12 mm tiefen Kammer ist.

## 2.2. Versuchsstand

### 2.2.1. Prüfstromkreis

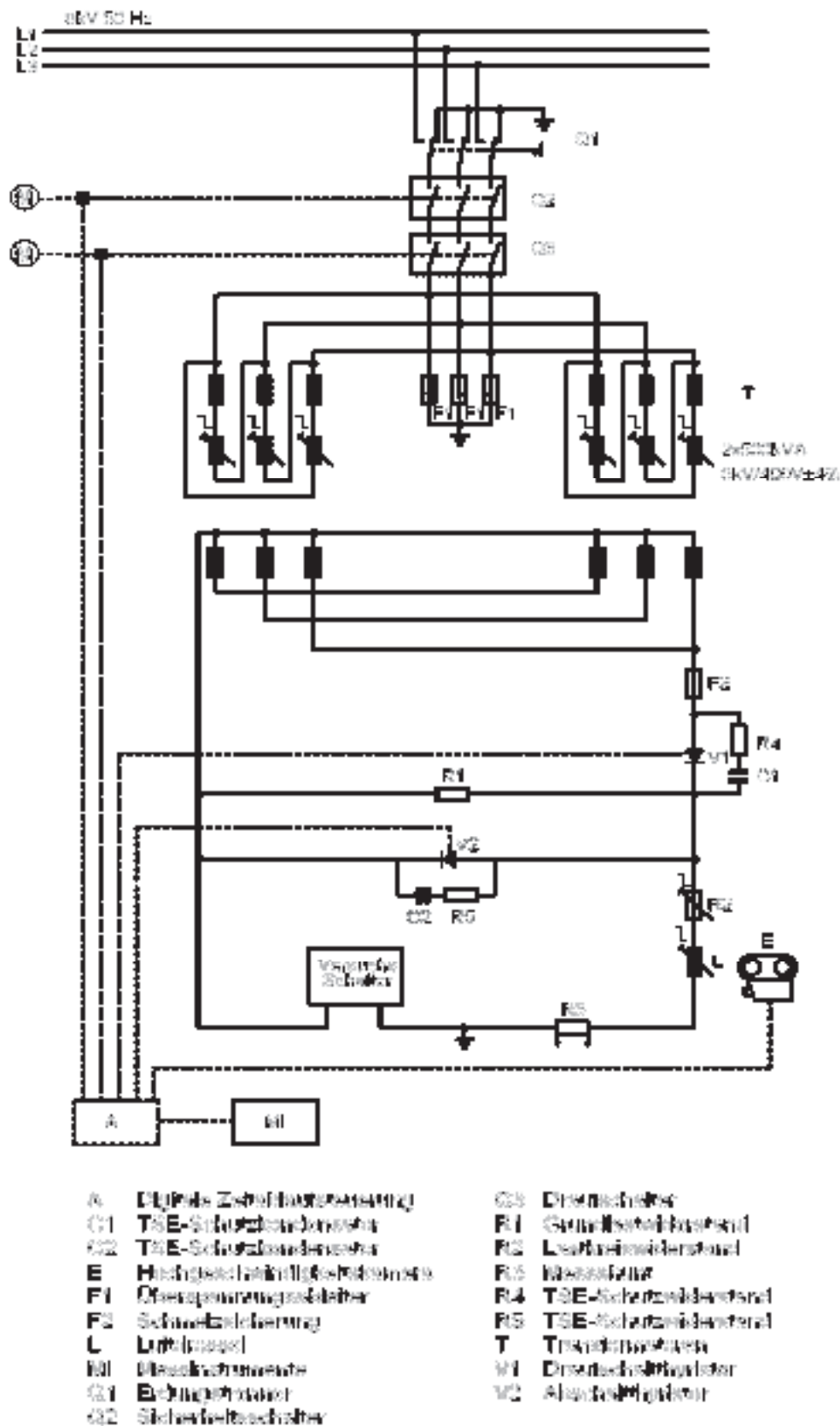
Das Bild 2.11 zeigt einen schematischen Übersichtplan des Prüfstromkreises. Die für die Versuche benötigte Leitung wird mittels zweier 500 kVA Dreiphasentransformatoren aus einem 6 kV / 50 Hz Netz entnommen. Die Transformatoren sind Primärseitig über Schalter (Q1, Q2, Q3) an die Mittelspannung angeschlossen. Durch die Parallelschaltung der Transformatoren wird eine Gesamtscheinleistung von 1 MVA erreicht. Dies entspricht bei einer Sekundärspannung von 242 V einem einphasigen Sekundärstrom (Prüfstrom) von 10 kA effektiv.

Der prospektive Kurzschlussstrom  $i_p$  sowie der Leistungsfaktor  $\cos \varphi$  lassen sich mittels der im Prüfkreis liegenden stufenverstellbare Luftdrossel L und dem Lastkreiswiderstand R2 einstellen.

Durch Zündung des Thyristors V1 wird der Prüfstromkreis geschlossen und der eingestellte prospektive Strom beginnt im natürlichen positiven Stromnullgang bis zum nächsten Stromnulldurchgang zu fließen. Der Thyristor V2 liegt parallel zum Versuchsschalter und ermöglicht es, den Versuchsschalter kurzzuschließen, d. h. den Strom zu einem beliebigen Zeitpunkt am Versuchsschalter vorbeifließen zu lassen. Zum Schutz der Thyristoren vor Überspannungen dient jeweils eine TSE – Schutzschaltung (R4 und C1 bei V1; R5 und C2 bei V2). Die Schmelzsicherung F2 schützt die Thyristoren vor thermischen Schäden. Der Widerstand R1 ist parallel zum Lastkreis geschaltet und lässt einen geringen Strom von 100 A bis 300 A als so genannte Grundlast fließen, um im Falle der Abschaltung eine Überspannung durch Chopping [Lin-87] zu verhindern.



Der niederohmige Messshunt R3 dient der Strommessung (Kapitel 3.2).



**Bild 2.11:** Schematischer Übersichtsplan der Versuchsanlage

## 2.2.2. Steuerstromkreis mit Ablaufsteuerung

Die bei Schaltversuchen erforderlichen Steuerbefehle für den Sicherheitsschalter Q2, den Draufschalter Q3, den Draufschaltthyristor V1 und den Abschaltthyristor V2 sowie die Bereitstellung des Triggersignals für die Messinstrumente MI und die Kamera E erfolgen netzsynchron über eine digitale Zeitablaufsteuerung A. Der Zeitablauf erfolgt mikrosekundengenau mittels eines quarzstabilisierten, in C-MOS Technologie aufgebauten Zählwerkes.

## 2.3. Versuchsparameter- und Kombinationen

Die wichtigsten elektrischen und mechanischen Parameter werden im Folgenden aufgeführt und erläutert.

Die dieser Arbeit zugrunde liegenden elektrischen Prüfbedingungen orientieren sich nicht an den VDE-Bestimmungen für Leitungsschutzschalter oder Leistungsschalter in Niederspannungsbereich. Vielmehr orientieren sich die Versuche an den zurzeit in den Simulationen verwendeten Stromstärken. So spielt beispielsweise der Leistungsfaktor  $\cos \varphi$  eine entscheidende Rolle in den VDE-Bestimmungen, da er maßgeblich für die Strombegrenzung und – zusammen mit den Netzkomponenten - bestimmend für die Höhe der über einer Schaltstrecke wiederkehrenden Einschwingspannung ist [Lin-87], [Erk-74]. Diese wiederum bestimmt die Löscheigenschaften und das Wiederezündverhalten einer bestimmten Kontakt- bzw. Kammergeometrie. In den Simulationen ist hingegen das Löschverhalten bzw. das Wiederezündverhalten nach dem Stromnulldurchgang zum jetzigen Zeitpunkt nicht von Interesse. Vielmehr interessiert

- die Lichtbogenwanderung und die
- Ausbildung neuer Fußpunkte auf
  - einfachen Löschblechgeometrien
  - in einfachen Modellschaltkammern.

Hiervon abgeleitet ergeben sich die in Tabelle 2.1 aufgeführten mechanischen/geometrischen Parameter für die Modellschaltkammern und die an der Versuchsanlage eingestellten elektrischen Größen.

Die Messreihen mit divergierenden Laufschiene und einem Löschblech dienen der Untersuchung des Lichtbogenaufteilungsvorgangs, speziell der Ausbildung neuer Fußpunkte auf dem Löschblech im Vergleich zu den Simulationen. Die divergierende Geometrie bestimmt hierbei maßgeblich die Lichtbogenwanderung und das Lichtbogenverhalten.

Parameter	Werte	Divergierende Laufschiene	Parallele Laufschiene
Prüfspannung	220 V	X	X
prospektiver Strom $i_p$	500 A	X	X
	1000 A	X	X
	2000 A	X	X
Löschblechtyp / Dicke in mm	Normal / 2	X	--
	massiv / 2	X	--
	massiv / 1	X	--
Modellkammerhöhe	40 mm	X	--
	42 mm	--	X
Modellkammertiefe	4 mm	X	X
	8 mm	X	--
	12 mm	X	--
Modellkammerbreite	8 mm	--	X
	21 mm	X	--
Verdämmungsquerschnitt (prozentualer Wert der Öffnung!)	0 %	--	X
	20 %	X	X
	40 %	X	X
	60 %	X	--
	100 %	--	X

**Tabelle 2.1:** Elektrische und mechanische (geometrische) Parameter der Versuchsreihen

Die Tabelle 2.1 zeigt, dass umfangreiche Untersuchungen an Modellschaltkammern mit divergierenden Laufschiene durchgeführt wurden, obwohl Mutzke [Lin03], [Lin-04], [Rue-06] bis dato überwiegend Modelle mit paralleler Laufschieneanordnung und einem Löschblech simuliert und untersucht hat. Modelle mit ausschließlich paralleler Laufschienegeometrie kommen in Leitungsschutzschaltern jedoch nicht vor, und stellen auch in der Simulation erst den Anfang dar. Der nächste Schritt in

der Optimierung der Simulation ist die Berücksichtigung divergierender Laufschienegeometrien mit zunächst einem Löschblech.

## 2.4. Messeinrichtungen und –methoden

### 2.4.1. Messgeräte

Die Messung und Aufzeichnung der Messgrößen erfolgt mittels zweier digitaler Speicheroszilloskope (Firma Tektronix: Typ TDS 460, 4 Kanal DSO, 8-bit-Auflösung, 500 MS/s, 500 MHz Bandbreite; Firma LeCroy: Typ LT264, 4 Kanal DSO, 8-bit-Auflösung, 350 MHz Bandbreite). Die Messdaten werden per IEEE (GPIB)-Schnittstelle auf einen IBM-kompatiblen PC übertragen.

Zur potentialfreien Übertragung einiger Messgrößen kommen zwei Lichtwellenleiterübertragungsstrecken (HERO-Link; 2 Kanäle mit je 15 MHz Bandbreite) zum Einsatz. Die beiden in einer Strecke integrierten Kanäle haben das gleiche Bezugspotential, weshalb für die Messung mit zwei Löschblechen zwei Übertragungsstrecken benötigt werden.

### 2.4.2. Messgrößen

Der während der Versuche aufgezeichneten elektrischen Messgrößen sind

- der *Strom im Lastkreis*  $i$ ,
- die *Lichtbogen­spannung*  $u_B$ ,
- der Teilstromfluss durch das Löschblech 1  
(*Löschblechstrom*)  $i_{LB1}$  oder
- das *Löschblechpotential 1*  $V_{LB1}$ .

und bei den Untersuchungen mit zwei Löschblechen zusätzlich

- das *Löschblechpotential 2*  $V_{LB2}$ .

Je nach Versuchsanordnung werden entweder der Teilstromfluss durch das Löschblech (normale Löschbleche) oder das Löschblechpotential (massive Löschbleche) gemessen.

### **2.4.2.1. Durchlassstrom und Bogenspannung**

Der im Lastkreis fließende Kurzschlussstrom  $i$  wird mittel eines Gitter-Messshunts R3 (Empfindlichkeit: 60 mV bei 300 A) gemessen. Die Messung erfolgt direkt, also nicht-potentialfrei im Lastkreis.

Die Lichtbogenspannung  $u_B$  wird an der anodenseitigen Stromzuführung abgegriffen und über einen abgeglichenen Tastkopf (Typ Tektronix P6007; Teilverhältnis 100:1, Grenzfrequenz 50 MHz) gemessen.

Das Bezugspotential  $V_E$  der Messgrößen liegt zwischen dem Messshunt R3 und der kathodischen Versuchsschalterelektrode.

### **2.4.2.2. Löschblechstrom**

Die Messung des Löschblechstromes  $i_{LB}$  erfolgt mittels des im Löschblech integrierten Shunts (Kap. 2.2.2).

Die Messspannung ist proportional zum Löschblechstrom und liegt im Bereich von einigen Millivolt. Das in der Kammermitte sitzende Löschblech nimmt hingegen beim Kontakt mit dem umgebenden Lichtbogenplasma Potentiale von etwa 30 bis 80 V an. Um die geringe Löschblechspannung auf hohem Grundpotential messen zu können, kommt eine potentialfrei arbeitende Lichtwellenleiterübertragungsstrecke (HERO-Link; 2 Kanäle mit je 15 MHz Bandbreite) zum Einsatz. Die Potentialdifferenz der beiden Löschblechseiten (Kapitel 2.1.3) wird mit einem abgeglichenen Tastkopf (PMT PMTG; 280 MHz; Teilverhältnis 10:1) abgegriffen und mittels der Lichtwellenleiterstrecke zum Oszilloskop übertragen.

### **2.4.2.3. Löschblechpotential**

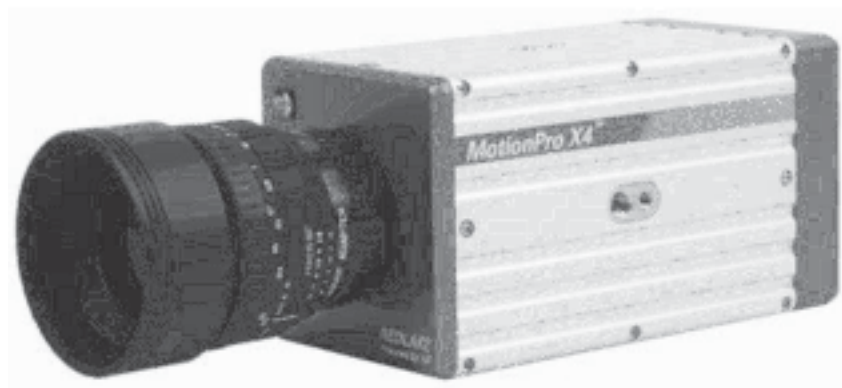
Bei den Versuchen mit massiven Löschblechen wird das Löschblechpotential  $V_{LB}$  in Bezug auf die kathodische Laufschiene gemessen. Das Löschblechpotential liegt auf Grund der mittigen Löschblechlage innerhalb der Kammer im Bereich der halben Lichtbogenspannung, also maximal bei etwa 60 bis 80 V. Die Messung erfolgt mit einem abgeglichenem Tastkopf (LeCroy PPE 4kV; 400 MHz, Teilverhältnis 100:1), der an eine Lichtwellenleiterübertragungsstrecke (HERO-Link; 2 Kanäle mit je 15 MHz Bandbreite) angeschlossen ist. Diese überträgt das Signal zum Oszilloskop.

#### 2.4.2.4. Teilspannung zwischen den Löschblechen

In den Versuchen mit zwei massiven Löschblechen wurde zusätzlich zum Löschblechpotential die Teilspannung zwischen den Blechen gemessen. Hierfür wurde pro Löschblech jeweils eine der zweikanaligen Lichtwellenleiterstrecke eingesetzt. Die Teilspannung zwischen den Löschblechen wurde im Anschluss an die Messung als Differenz der beiden Löschblechpotentiale errechnet.

#### 2.4.3. Aufnahmen mit der Schnellfilmkamera

Zur optischen Aufzeichnung der Lichtbogenbewegung wurde eine digitale Hochgeschwindigkeitskamera eingesetzt. Das Bild 2.12 zeigt die in den Versuchen verwendete Kamera der Firma Redlake, Modell MotionPro



**Bild 2.12:** Digitale C-MOS Schnellfilmkamera [Red-06]

HS4<sup>1</sup>. Sie besitzt einen 512 x 512 Pixel C-MOS-Sensor mit einer Farbtiefe von 8-bit monochrom. Die minimal einstellbare Shutterzeit liegt bei 1  $\mu$ s. Die Filmaufnahmen werden in einem 2 GB großen, kamerainternen Bildspeicher abgespeichert, der mittels eines USB-Anschlusses ausgelesen werden kann. Über eine Änderung der Kameraauflösung kann die Aufzeichnungsgeschwindigkeit schrittweise bis auf 140 000 Bilder pro Sekunde eingestellt werden. In den Versuchen wurde eine Aufnahmegeschwindigkeit von 34500 oder 38500 Bildern pro Sekunde bei einer Auflösung von 60 x 224 Pixeln gewählt. Die Shutterzeit betrug 1  $\mu$ s.

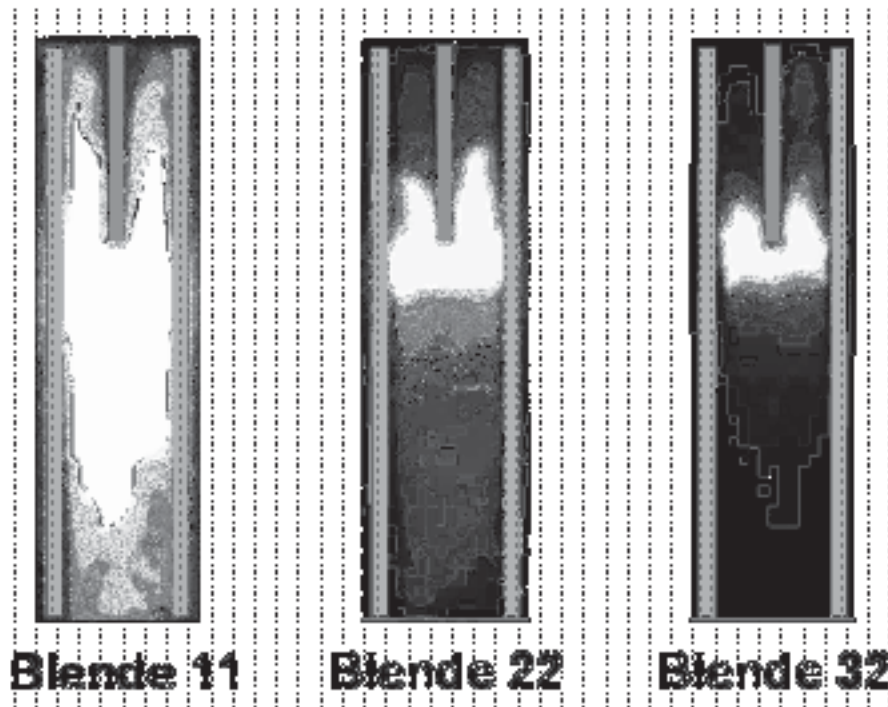
Die Farbaufnahmen des Lichtbogens wurden mit Schnellfilmkameras<sup>2 3</sup> durchgeführt, die im Rahmen von Produktvorführungen kurzzeitig zur Verfügung standen.

<sup>1</sup> Eine identische Kamera stand in der Anfangszeit der Untersuchungen als Leihgabe der Firma E-T-A GmbH, Altdorf, zur Verfügung.

<sup>2</sup> Phantom V7, Vision Research Inc., [www.visionresearch.com](http://www.visionresearch.com)

<sup>3</sup> Photron Fastcam 1024PCI, Photron USA, Inc., [www.photron.com](http://www.photron.com)

Die Filmaufnahmen der Messungen mit zwei Löschblechen wurden mit einer mechanischen Rotationsprismenkamera vom Typ Hitachi HD16 bei einer Bildfrequenz von 16.000 Bildern pro Sekunde durchgeführt.



**Bild 2.13:** Einfluss der Objektivblende auf die aufgezeichnete Lichtbogenkontur; Aufnahmen mit 40.000 Bildern pro Sekunde bei einer prospektiven Stromstärke von 1000 A

Der Lichtbogen erscheint auf den Filmaufnahmen je nach untersuchter Stromstärke als mehr oder weniger stark leuchtendes Band innerhalb der Modellkammer. Je höher die untersuchte Stromstärke, desto stärker ist die Leuchtintensität des Lichtbogens. Die Belichtungsintensität des C-MOS-Sensors wurde daher je nach Höhe des eingestellten prospektiven Stromes mittels einer im Objektiv befindlichen Blende eingestellt. Auf die Verwendung von Filtern wurde verzichtet.

An dieser Stelle sei der Begriff „Lichtbogen“ als der hell leuchtende, heiße Lichtbogenkern definiert. Das diesen Kern umgebende, kältere aber ebenfalls noch heiße und damit noch leitende Plasma wird im Folgenden als „heißes Plasma“ oder als „umgebenes Plasma“ bezeichnet.

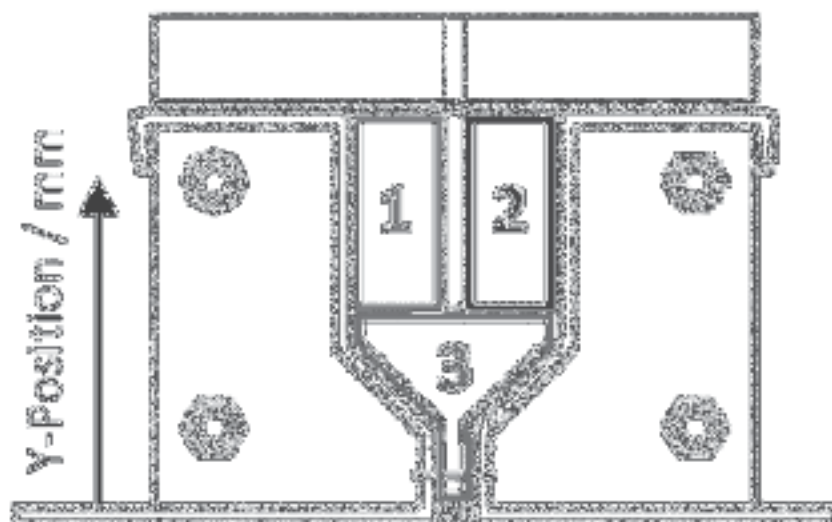
Der Einfluss der Objektivblende auf die aufgezeichnete Lichtbogenkontur ist in Bild 2.13 gut zu erkennen. Es zeigt drei Schaltlichtbögen, die bei Versuchen mit einer prospektiven Stromstärke von 1000 A und einer Geschwindigkeit von 40.000 Bildern pro Sekunde aufgezeichnet wurden. Je weiter die Blende geöffnet ist, das heißt je kleiner die Blendenzahl ist, desto mehr den Lichtbogen umgebendes Plasma und

Plasmaverwirbelungen sind zu erkennen. Im linken Teilbild reichen diese Plasmaschwaden bis fast zum Kammersockel hinab. Bei geringerer Belichtung des Aufnahmesensors, also bei höheren Blendenzahlen, ist das den Lichtbogen umgebende heiße Plasma in den Filmaufnahmen nicht mehr zu erkennen. Bei der Betrachtung der Filmaufnahmen und den Überlegungen hierzu sollte dies immer berücksichtigt werden. Der Vorteil bei den Aufnahmen mit hoher Blendenzahl liegt darin, dass die sehr intensiv leuchtenden Fußpunkte auf den Laufschiene und auf dem Löschblech nicht zur Überbelichtung des Aufnahmesensors führen, sondern klar und scharf umrissen abgebildet werden.

### 2.4.3.1. Lichtbogenkontur

Die optische Untersuchung der mit der Schnellfilmkamera aufgezeichneten Lichtbögen erfolgte mit Hilfe mehrere Computerprogramme. Die Vorgehensweise bei der Auswertung bzw. bei der Konturbestimmung ergibt sich wie folgt.

Zunächst werden die Filmaufnahmen mit dem Programm Corel PhotoPaint® geöffnet

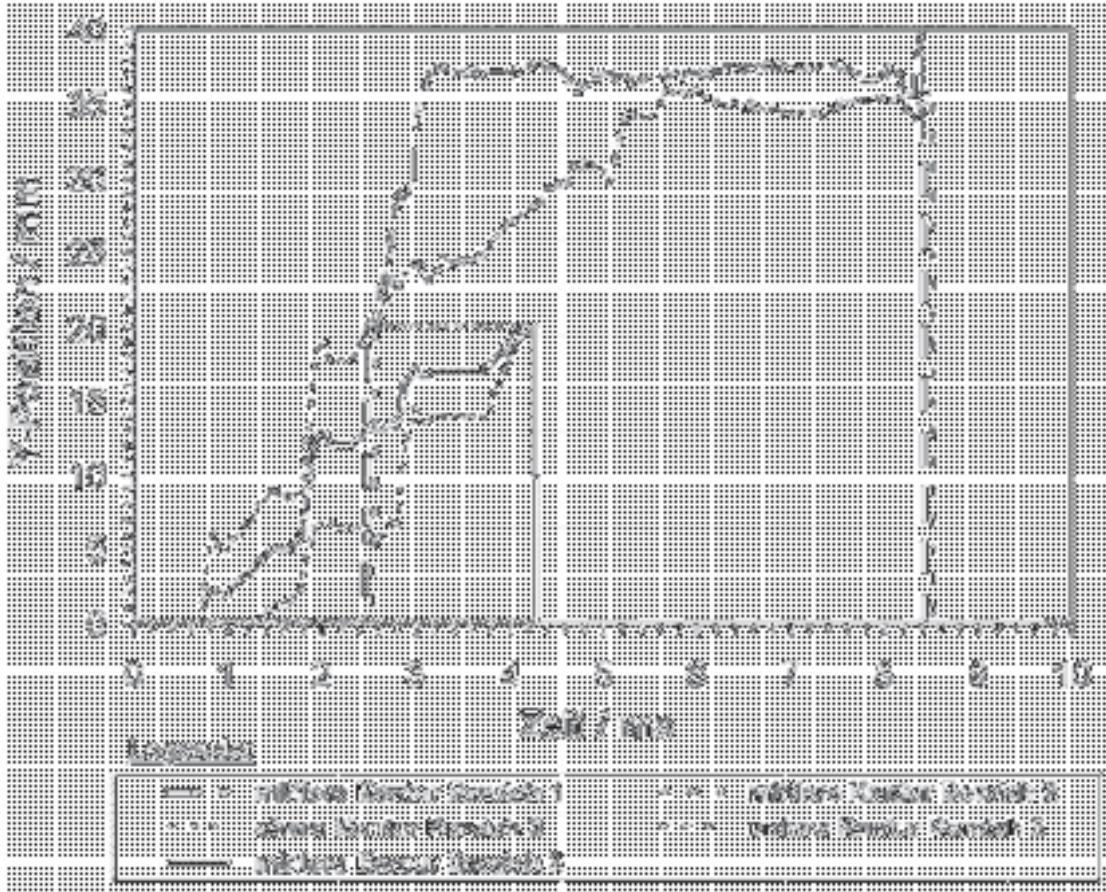


**Bild 2.14:** Bereiche der Lichtbogenkontursuche in einer Kammer mit divergierenden Laufschiene und einem Löschblech

und mit Hilfe einer Programmeinstellung die Kontur des in den Filmaufnahmen zu sehenden Lichtbogens markiert. Da der Lichtbogen in den Filmaufnahmen als Band innerhalb der Modellkammer liegt, wird sowohl die obere (Lichtbogenfront, in Bewegungsrichtung gesehen vordere) als auch die untere (Lichtbogenrücken, in Bewegungsrichtung gesehen hintere) Kontur betrachtet.



Zur Auswertung werden die Kammern mit einem Löschblech zusätzlich in die drei im Bild 2.14 eingezeichneten Bereiche unterteilt. In jedem Bereich wird jeweils die Lichtbogenkontur untersucht.



**Bild 2.15:** Verlauf der Lichtbogenkontur in einer Modellschaltkammer mit divergierenden Laufschienen und einem Löschblech

Pro Einzelbild wird die Position der jeweils obersten und des untersten Konturpunktes in jedem der drei Kammerbereiche markiert und notiert. Dies wird für alle Bilder der Filmaufnahme durchgeführt. Trägt man nun die Position der oberen oder unteren Konturpunkte über der Zeit, d. h. über der Filmbildfolge auf, so ergibt sich ein Kurvenverlauf, der der Bewegung der Lichtbogenkontur entspricht. Diese Kurven werden im Folgenden als Konturverlauf bezeichnet.

Innerhalb einer Versuchsreihe mit gleicher prospektiver Stromstärke können die obere und untere Kontur direkt miteinander verglichen werden. In den Versuchsreihen mit unterschiedlichen prospektiven Stromstärken ist dies nicht möglich. Hier sind die Schnellfilmaufnahmen mit unterschiedlichen Objektivblenden

durchgeführt worden, welche direkten Einfluss auf die aufgezeichnete Lichtbogenbreite (Kontur) haben.

Um dennoch eine vergleichbare Größe zu erhalten, wurde eine mittlere Kontur errechnet. Diese ergibt sich als arithmetischer Mittelwert der beiden betrachteten Punkte.

Im Bild 2.15 sind die obere und untere Kontur und die daraus berechnete mittlere Kontur für den unteren Kammerbereich 3, sowie der mittlere Kontur im Bereich 1 und 2 einer Messung dargestellt.

### 2.4.3.2. Strömungsmessungen

Die Strömungsvorgänge innerhalb einer Schaltkammer spielen eine entscheidende Rolle für die Lichtbogenwanderungsprozesse. So wird dem Lichtbogen beispielsweise durch eine geeignete Umströmung mit kühlendem Umgebungsmedium (in Niederspannungsschaltgeräten in der Regel Luft) Energie entzogen. Dieser Energieentzug wird durch eine erhöhte Leistungsaufnahme kompensiert, indem sich bei gleich bleibendem Strom die Lichtbogenfeldstärke erhöht [Lin-87], [Burk-85]. Die Folge ist ein Ansteigen der Lichtbogenspannung.

Wichtig ist die Strömung auch, da sie für einen geeigneten Druckabbau während einer Lichtbogenphase innerhalb der Schaltkammer sorgen. Die während einer Schaltphase entstehenden Druckwellen bestimmen die Strömungsverhältnisse innerhalb der Schaltkammer, wodurch sie das Schaltverhalten wesentlich beeinflussen.

Es wurden daher Versuche durchgeführt, die Strömungen bzw. Strömungsverhältnisse in den dieser Arbeit zugrunde liegenden experimentellen Anordnungen näher zu untersuchen.

Mit den Methoden der PIV<sup>4</sup> bzw. PTV<sup>5</sup> [Raf-98] wurden erste Ansätze untersucht, um das Strömungsverhalten sowohl inner- als auch außerhalb der Modellschaltkammern zu betrachten. Hierbei werden der zu untersuchenden Strömung Partikel, das so genannte Seeding oder auch Tracer-Partikel genannt, zugegeben. Die Partikel sind sehr leicht und haben einen kleinen Durchmesser, wodurch sie der zu

---

<sup>4</sup> Particle Image Velocimetry

<sup>5</sup> Particle Tracer Velocimetry

beobachtenden Strömung nahezu trägheitsfrei folgen. Die längs zur Strömungsrichtung beobachtete Ebene wird durch einen zuvor aufgefächerten Laserstrahl „gebildet“. Die Position der anhand der Lichtstreuung sichtbaren Partikel wird seitlich durch eine Kamera aufgezeichnet. Diese Positionserfassung der Partikel erfolgt durch zwei kurzzeitige Laserpulse zu den Zeitpunkten  $t$  und  $t'$ . Während der Zeitspanne zwischen  $t$  und  $t'$  haben sich die Partikel mit der Strömung weiterbewegt. Bei geringer Partikeldichte in der Beobachtungsebene können die Bewegungsrichtungen einzelner, klar voneinander unterscheidbarer Partikel ausgewertet werden. Diese Methode nennt sich PTV, „particle tracking velocimetry“. Mittlere bis hohe Partikeldichten erfordern statistische, rechnergestützte Auswertungen. Als Ergebnis dieser Auswertungen ergibt sich dann ein Bild des in der betrachteten Ebene herrschenden Strömungsfeldes.

[Puf-01] untersuchte die Heißgasströmung in einem SF<sub>6</sub>-Selbstblassechaltermodell bei Strömen von 955 und 1237 A im Bereich ab 2 ms vor dem natürlichen Stromnulldurchgang. Die Messungen erfolgten im bogennahen Randbereich mit Tracer-Partikeln, deren Zuführung in den Beobachtungsraum Puffer nicht erwähnt. Möglicherweise stammen die Partikel vom Abbrand des Düsenmaterials. Puffer stellte fest, dass die für die Strömungsvisualisierung benötigten Partikel nicht gleich verteilt im Beobachtungsraum vorliegen. Um ein gesamtes Geschwindigkeitsfeld zu erhalten, führte er deshalb 20 bis 30 Messungen unter gleichen Voraussetzungen durch und setzte die Geschwindigkeitsfelder der Einzelmessung zu einem Gesamtgeschwindigkeitsfeld zusammen.

[Zet-05] untersuchte Strömungsprozesse an WIG und MAG-Schweisslichtbögen und stellte fest, dass die Beobachtung der Strömung im Schutzgas möglich ist, im Lichtbogen hingegen, auf Grund der hohen Temperaturen, nicht. Neben der Temperaturbeständigkeit, dem prozessneutralen Verhalten und der Partikeldichte ergibt sich enorme Schwierigkeit bei der Partikelzuführung in das Strömungsmedium. Wie sie die Partikel zugeführt haben, und welche der von ihnen aufgeführten ist [Zet-05] nicht zu entnehmen.

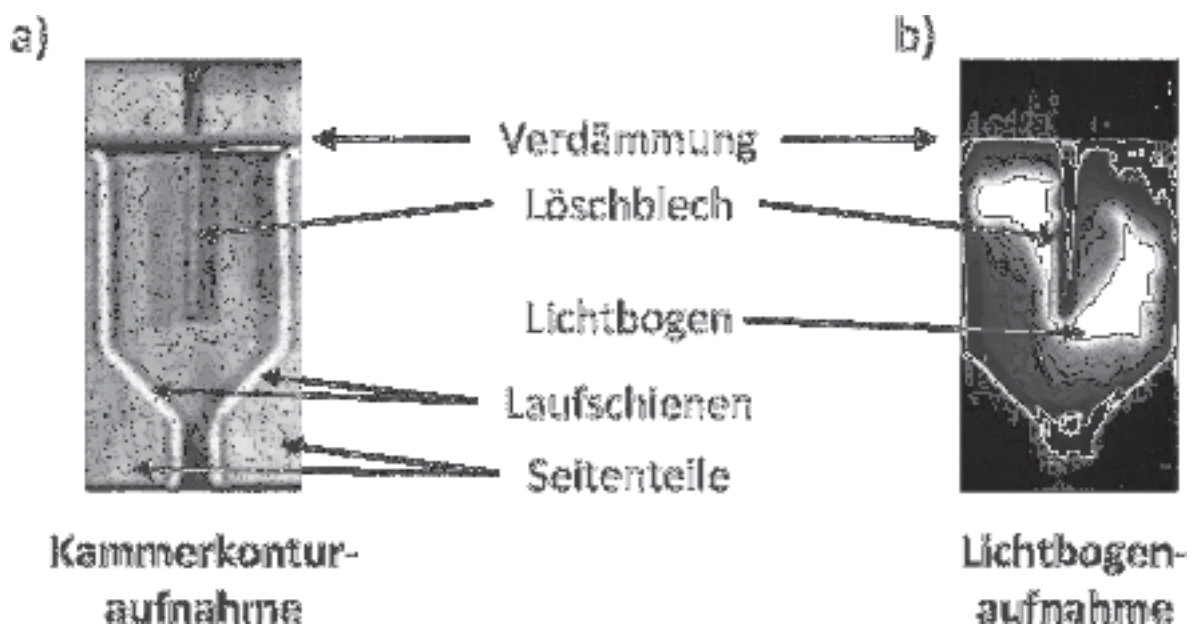
#### **2.4.4. Löschblechaufschmelzungen**

Die durch die Fußpunkte entstandenen Aufschmelzungsspuren auf den Löschblechen können zum einen durch ihre Form und ihr Aussehen Aufschluss über die Wanderungsgeschwindigkeit der Lichtbögen bzw. Fußpunkte geben [Amft-75], zum anderen sagen sie durch ihre Größe etwas über die Stromdichten in den Fußpunkten aus. Um die Löschblechoberflächen dahingehend zu untersuchen, werden die Ansichten der Löschblechkathode und der Löschblechanode mittels eines Scanners digitalisiert und ausgewertet. Es werden die Aufschmelzungsschwerpunkte lokalisiert und die prozentual aufgeschmolzenen Anteile (unter anderem an der Gesamt-Löschblechfläche) errechnet. Nähere Angaben hierzu finden sich im Kapitel 2.5.2.3.

## 2.5. Definitionen und Auswertungsmethoden

Alle Versuche wurden – wenn nicht anders erwähnt – mit vorbelasteten Laufschienen durchgeführt [Hes-59]. Dies führt zu einer größeren Beweglichkeit der Lichtbogenfußpunkte auf den Laufschienen, da die alten Lichtbogen Spuren die Oberflächenrauheit der Laufschienen erhöhen [Burk-71]. Die Laufschienen wurden je nach Abnutzungsgrad, d. h. je nach Höhe der untersuchten Stromstärke, nach etwa 5-10 Schaltungen gewechselt. Das Löschblech wurde nach jeder Messung gewechselt. Die Kammer und die Laufschienen wurden nach jeder Schaltung gesäubert, das heißt von Kupfer- und Eisenspratzern und von der Seitenscheibe stammenden abgeplatzten Glasstückchen befreit.

Vor der Lichtbogenzündung wurde bei den Aufnahmen mit der digitalen Schnellfilmkamera die präparierte und auf dem Versuchstisch befestigte Modellschaltkammer in einer beleuchteten Aufnahme ohne Lichtbogen aufgezeichnet. Hierdurch ist die Kontur der Modellschaltkammer bei maximaler Beleuchtung sehr gut zu erkennen. Eine solche Konturaufnahme ist in Bild 2.16 a dargestellt.



**Bild 2.16:** Aufnahmen a) der Kammerkontur vor einem Versuch und b) des Lichtbogens während eines Versuches

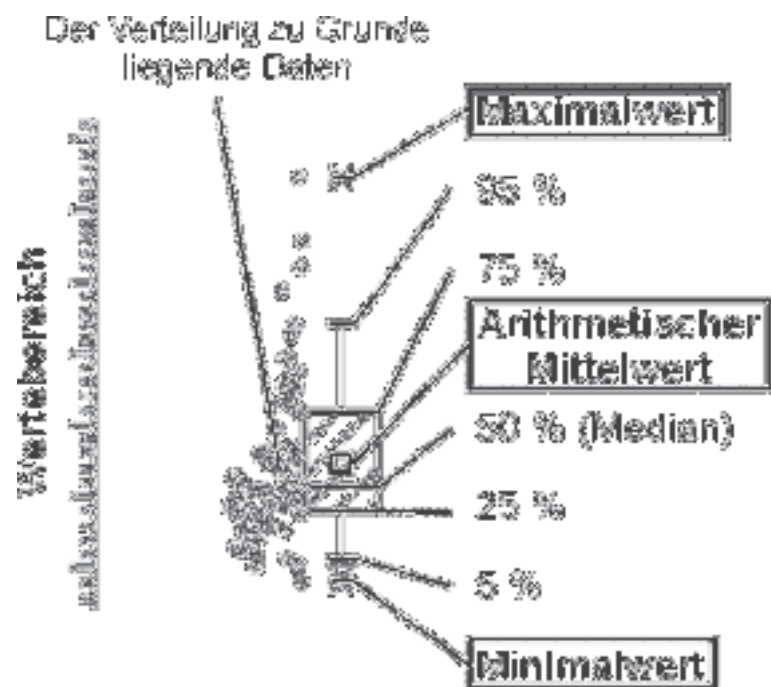
Im Anschluss an die Konturaufnahme erfolgte die Aufzeichnung der Lichtbogenbewegung während des Versuches. Hierfür musste die Blende (der entsprechenden prospektiven Stromstärke angepasst) unterschiedlich stark geschlossen werden. Wegen des intensiv leuchtenden, hellen Lichtbogens ist in den Aufnahmen kaum etwas von der Kammerkontur zu erkennen wie Bild 2.16 b zeigt.

### 2.5.1. Auswertungen

Zur Rohdatenbearbeitung wurden VisualBasic® Skripte verwendet. Neben den Berechnung der Übertragungsfaktoren wurden Offsetspannungen/-ströme abgezogen.

Zur Darstellung des zeitlichen Messgrößenverlaufs und zum manuellen Auslesen bestimmter, nicht von Skript ausgewerteter Größen, wurde das Programm Origin® der Firma Additive benutzt.

Bei der Auswertung einiger Daten wurde ein Box-Plot-Diagramm verwendet [Orig-03]. Der Boxplot ist eine quantitative Methode der deskriptiven Statistik, um möglichst viele Informationen eines Datensatzes übersichtlich zu veranschaulichen. Das Bild 2.17 zeigt mit dem rechts abgebildeten Balken und den angetragenen Werten ein Beispiel eines Box-Plot-Diagramms. Der Box-Plot ist im Bild links um den dazugehörigen Datensatz und einer an die Messpunkte des Datensatzes angehängten Verteilungsfunktion ergänzt.



**Bild 2.17:** Beispiel eines Box-Plot-Diagramms

Zur Ermittlung des Box-Plots müssen die Daten zuerst nach der Größe sortiert und in einem Datensatz der Länge 0 % bis 100 % eingeordnet werden. Die eigentliche Box gibt den Bereich zwischen den beiden Quantilen (25 % und 75 %) an mit dem Median (50 %) als Boxteiler. Das kleine Quadrat entspricht dem arithmetischer Mittelwert. Die Abschlussstriche an den Enden der Box geben die 5 bzw. 95 %-Grenzen an. Die unteren und oberen 5% aller Datenwerte werden als Ausreißer (extreme Datenwerte) eingestuft. Abgeschlossen wird der Boxplot mit einem oberen und einem unteren Strich, der den Minimal- oder den Maximalwert des Datensatzes angibt.

Die Bearbeitung der Filmaufnahmen und der digitalisierten Löschblechoberflächen erfolgte mit dem Programm Corel Photo-Paint®. Die Skripte zur Erkennung und Auswertung der Lichtbogenkontur sowie die zur Erkennung der Löschblechaufschmelzungen wurden eigens hierfür geschrieben.

Für die Flächenberechnung zur Bestimmung der Fußpunktstromdichten in Kapitel 3.7 wurde das Programm AxioVision® der Firma Carl Zeiss Imaging Solutions GmbH verwendet.

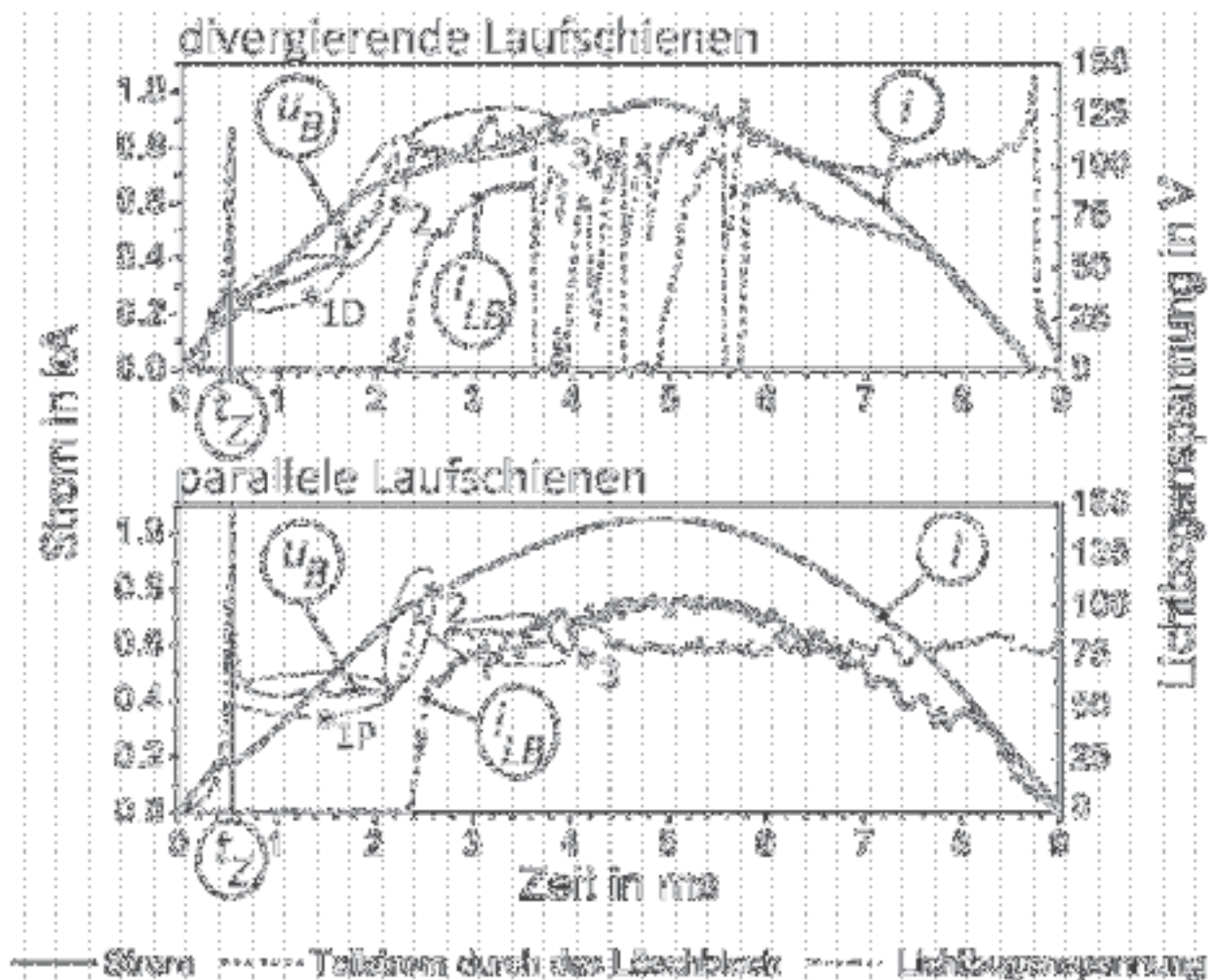
## **2.5.2. Definitionen**

### **2.5.2.1. Elektrische Größen**

Die aufgezeichneten elektrischen Größen werden anhand beispielhafter Oszillogramme aus jeweils einem Versuch mit divergierenden und mit parallelen Laufschienen in Bild 2.18 erläutert.

Die Zündung des Lichtbogens wird durch die Explosion des 0,1 mm dicken Zünddrahts verursacht. Da zu dessen „Verdampfung“ zunächst ein bestimmtes Stromquadrat-Integral notwendig ist, fallen der Stromflussbeginn und der Zündmoment des Lichtbogens zeitlich nicht zusammen. In den Oszillogrammen markiert der Zeitpunkt  $t = 0$  ms - wenn nicht anders erwähnt - den Moment des Stromflussbeginns. Der Momentanwert der Stromstärke, bei der der Zünddraht explodiert, wird im Folgenden als Zündstromstärke bezeichnet.

Beim Überschreiten der Zündstromstärke zum Zeitpunkt  $t_z$  bildet sich schlagartig ein Plasmakanal/Lichtbogen zwischen den beiden Laufschiene aus. Die Zündung ist anhand einer Spitze in der Lichtbogenspannung  $U_B$  erkennbar.



**Bild 2.18:** Verlauf der elektrischen Größen in beispielhaften Versuchen mit divergierenden Laufschiene (oben) und mit parallelen Laufschiene (unten), Stromstärke in den Versuchen 1 kA

Nach der Lichtbogenzündung setzt die Lichtbogenwanderung entlang der Laufschiene ein. In den Messungen mit divergierenden Laufschiene verharret der Lichtbogen dabei an der Knickstelle zum divergierenden Bereich. Die Lichtbogenspannung steigt bis zu diesem Zeitpunkt nur mäßig an. Nun erfolgt die Lichtbogenverlängerung und -wanderung entlang des divergierenden Laufschienebereiches, wodurch die Lichtbogenspannung (Bild 2.18, \*1D) ansteigt.



Zeitgleich berührt die Bogensäule in den 40 mm hohen Kammern mit einem Löschblech durch die Aufwölbung entlang des divergierenden Bereiches die Löschblechunterkante. Dies ist in den Filmaufnahmen zu erkennen. In der 50 mm hohen Kammer mit zwei Löschblechen wird die gleichzeitige Verlängerung und Berührung des Löschblechs durch die Erhöhung des Abstandes der Löschblechunterkante/-n zum divergierenden Kammerbereich zeitlich entzerrt. Hier zeigen die Filmaufnahmen, dass der Lichtbogen während der Aufwölbung im divergierenden Bereich nicht sofort die Löschblechunterkante berührt.

Im Falle der parallelen Laufschienegeometrie wird die Lichtbogenwanderung bis zur Löschblechunterkante nicht durch Verlängerung der Bogensäule entlang einer Laufschieneaufweitung beeinflusst. Die Lichtbogenspannung verläuft während des Wanderungsvorgangs auf einem relativ gleichmäßigen, konstanten Niveau (Bild 2.18, \*1P).

Ab dem Moment der Berührung der Löschblechunterkante steigt die Lichtbogenspannung an (Bild 2.18, \*2). Nach der Aufteilung in zwei bzw. drei Teillichtbögen liegt die mittlere Lichtbogenspannung um die Anzahl der Spannungsbedarfe der auf den Löschblechen neu gebildeten Fallgebiete höher als vor der Unterteilung (Bild 2.18, \*3) (Kapitel 1.4.2). Während des Unterteilungsvorgangs wird bei den präparierten „normalen“ Löschblechen der Teilstrom  $i_{LB}$  durch das Löschblech, und bei den massiven Löschblechen das Löschblechpotential  $V_{LB}$  gegenüber der kathodischen Laufschiene gemessen.

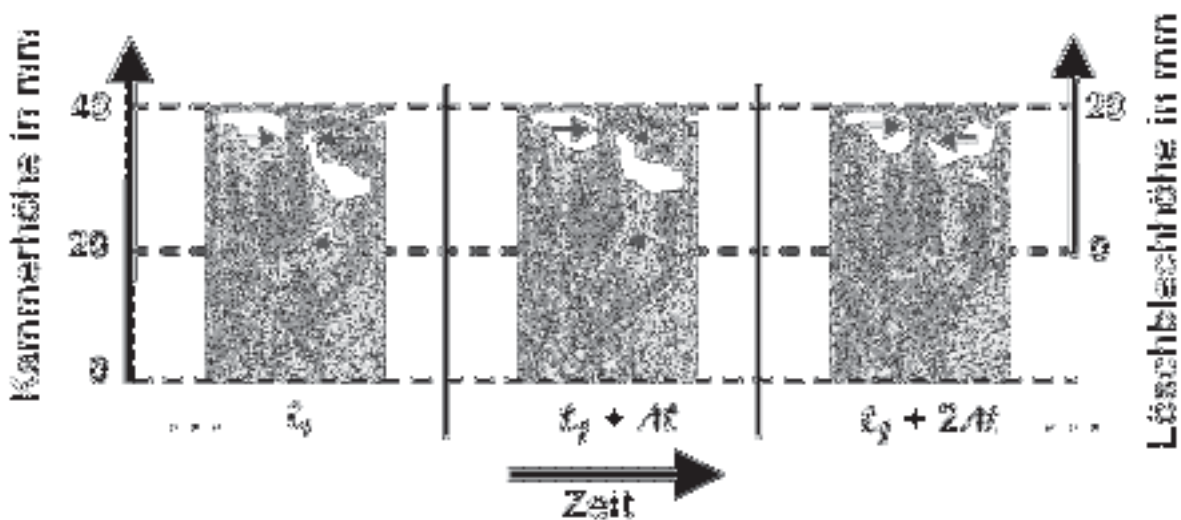
Bei den Messungen mit zwei Löschblechen wird zusätzlich der Spannungsabfall zwischen den Löschblechen  $v_{12}$  errechnet und ausgewertet. Der Teilspannungsabfall  $v_{12}$  zwischen den Löschblechen entspricht jedoch nur dann der Lichtbogenspannung des mittleren Teillichtbogens, wenn sich tatsächlich ein Lichtbogen zwischen den Blechen gebildet hat. Dies setzt einen Stromfluss über Fußpunkte an beiden Löschblechen voraus. Andernfalls, d. h. wenn sich gar kein oder lediglich ein Fußpunkt auf einem Blech bildet, entspricht die mittlere Teilspannung  $v_{12}$  irgendeiner Potentialdifferenz des Plasmas. Dabei nehmen die beiden Löschblechinnenseiten gemäß Plasmauntersuchungen mit metallischen elektrischen Sonden [Lang-26] [Hudd-65] jeweils ein gegenüber dem realen Plasmapotential negativeres Potential an. Da dies allerdings für beide Löschbleche gilt, ist auch diese Potentialdifferenz einigermaßen genau erfasst.

### 2.5.2.2. Filmaufnahmen

Die Filmaufnahmen während der Lichtbogenphase werden mit den elektrischen Größen durch den Zeitpunkt der Lichtbogenzündung synchronisiert. Der konstante Bildabstand der einzelnen Teilbilder liegt bei einer Aufnahmegeschwindigkeit von 34.500 Bildern pro Sekunde bei  $\Delta t_{Bild} = 28,9855 \mu s$ . Für die Versuche mit einer maximalen Stromflussdauer von 10 ms (unbeeinflusste, netzfrequente 50 Hz-Halbschwingungen) ergibt sich eine maximale Bildanzahl von 345. Die Belichtungsdauer liegt bei allen Aufnahmen mit der digitalen Schnellfilmkamera bei 1  $\mu s$  pro Bild.

Der Film der Lichtbogenwanderung und der Film der Modellschaltkammerkontur werden in dem Programm Corel® Photo-Paint überlagert, um die jeweilige Lichtbogen- bzw. Fußpunktposition innerhalb der Schaltkammer genau feststellen zu können.

Es folgt die automatische Bestimmung der oberen und unteren Lichtbogenkontur und die Analyse der Konturwanderung in den drei Kammerbereichen, rechts, links und unterhalb des Löschblechs (Kapitel 2.4.3.1, Bild 2.14).



**Bild 2.19:** Bestimmung der Fußpunktlage auf dem Löschblech am Beispiel von drei Teilbildern einer Filmaufnahme

Anschließend werden die Fußpunkte auf den Löschblechoberflächen markiert und deren Anzahl und genaue Höhe auf dem Löschblech bestimmt. Bild 2.19 zeigt dies für drei Teilbilder einer Schnellfilmaufnahme in einem Versuch mit divergierenden Laufschienen. In den ersten beiden Bildern zeigen sich zwei parallele Fußpunkte auf

etwa 1 und 17 mm Löschblechhöhe auf der rechten Löschblechseite und ein Fußpunkt auf etwa 17 mm Löschblechhöhe auf der linken Seite. Im dritten Bild ist der untere Fußpunkt bei 1 mm Höhe auf der rechten Löschblechseite verloschen und es zeigt sich nur noch der Fußpunkt auf 17 mm Löschblechhöhe. Die Fußpunkte auf den Laufschiene werden in diesem Beispiel nicht betrachtet.

Einige Autoren [Merc-91], [Brd-02], [Rümp-05], [Rei-06] messen die Stromdichteverteilung mittels Induktionsspulen und schließen anhand der daraus bestimmten Stromdichtemaxima auf die Lage der Fußpunkte auf den Laufschiene. Dies ist jedoch nur aussagekräftig, solange sich nur ein Fußpunkt auf den Laufschiene befindet. Bei der Parallelexistenz von Fußpunkten wird die Lage mittels Induktionsspulen falsch bestimmt. Die eigenen Untersuchungen zeigen insbesondere bei hohen Stromstärken die Existenz von parallelen Fußpunkten sowohl auf den Laufschiene als auch auf dem Löschblech, weshalb von der Messung mit Induktionsspulen abgesehen wurde.

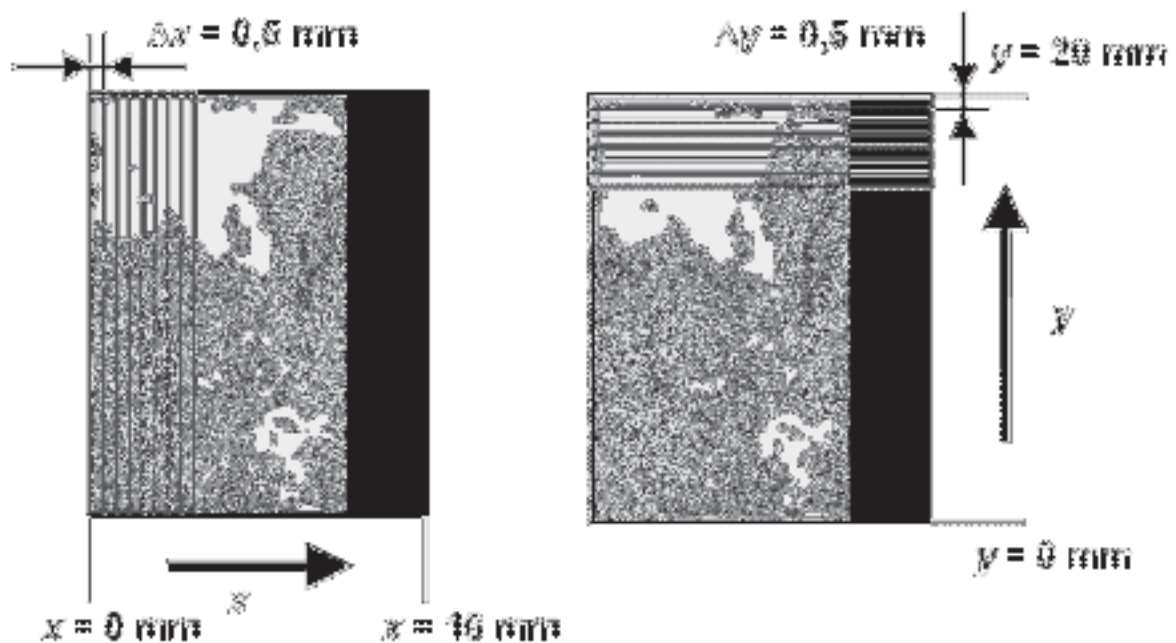
### 2.5.2.3. Löschblechoberflächen

Um genauere Aussagen über die Lage und Größe der Löschblechaufschmelzungen treffen zu können, wurden die Löschblechoberflächen untersucht.

Im Bild 2.20 ist die Vorgehensweise anhand einer Beispiellöschblechoberfläche dargestellt. Bei der „Abtastung“ der Löschblechoberfläche wird wie folgt vorgegangen:

Nach dem Digitalisieren der Löschblechoberflächen werden diese zunächst mit einer Maske belegt, welche die nicht interessierenden Bereiche mit einer schwarzen Füllung abdeckt. Dies ist in erster Linie der 4 mm breite Bereich, durch den das Löschblech in der Klammerrückwand fixiert ist. Des Weiteren wird ein 0,5 mm breiter Rand um das Löschblech gelegt, der Verfälschungen durch das Einscannen abdeckt. Im dritten Schritt werden auf dem verbleibenden Bild die Ränder der Löschblechaufschmelzungen gesucht und markiert. Dies geschieht in mehreren Schritten: Zunächst wird das Bild in die einzelnen Farbkanäle rot, blau und grün zerlegt, so dass sich drei Bilder ergeben. Pro Bild (Kanal) erfolgt nun eine Glättung durch „verschmieren“ der Farbspitzen mit anschließender Rauschentfernung auf Grundlage der maximalen Farbwerte. Im Anschluss werden scharfe Ränder und

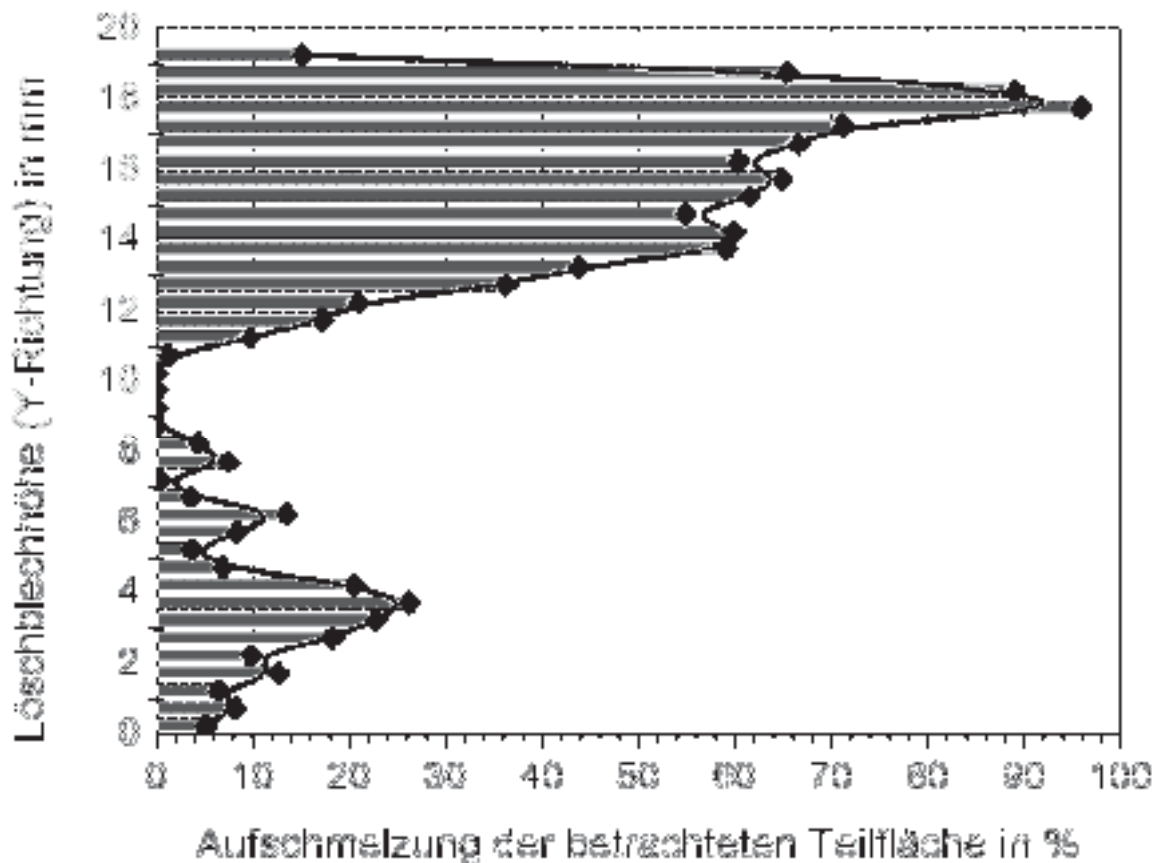
Details in den Bildern (Farbkanälen) entfernt, der durch den Rand der Aufschmelzungen erkannte Bereich „gefüllt“ und die drei Bilder bzw. Farbkanäle wieder überlagert. Die Summe der in den Einzelbildern markierten Aufschmelzungen wird gelb markiert und ergibt die Gesamtaufschmelzung der Löschblechoberfläche.



**Bild 2.20:** Koordinaten und Abtastung der untersuchten Löschblechoberflächen

Um die Aufschmelzungen auf dem Löschblech nach ihrer örtlichen Lage zu untersuchen und zu gewichten, wird die Löschblechoberfläche im vierten Schritt sowohl in x-, als auch in y-Richtung in 0,5 mm-Schritten abgetastet. Für den jeweils betrachteten Streifen wird dann der aufgeschmolzene Bereich in  $\text{mm}^2$  und prozentual zur Streifenfläche berechnet, wodurch sich eine Verteilung der Aufschmelzungen über die beiden Löschblechrichtungen „Tiefe“ (Abtastung in x-Richtung) und „Höhe“ (Abtastung in y-Richtung) aufstellen lässt.

Die Werte werden nach Abtastrichtung getrennt in ein Textfile geschrieben. Die Gesamtfläche in  $\text{mm}^2$  wird durch Addition der Streifenflächen berechnet und kann durch Vergleich des Flächenwertes für die x- und für die y-Richtung überprüft werden.



**Bild 2.21:** Verlauf der prozentual aufgeschmolzenen Löschblechoberfläche entlang der Löschblechhöhe des Blechs aus Bild 2.20

In Bild 2.21 ist der Verlauf der Aufschmelzungen für die y-Richtung der Löschblechoberfläche aus Bild 2.20 dargestellt. Die rot gefüllten Säulen zeigen die jeweiligen prozentualen Aufschmelzungen im betrachteten Bereich. Die schwarze Linie stellt den mittels eines kubischen B-Splines an die Säulen angenäherten Verlauf dar [Orig-03]. Der approximierter Verlauf bildet die lokalen und globalen Schmelzmaxima und Schmelzminima gut ab.

Die Verteilung der Aufschmelzungen in x-Richtung der betrachteten Löschblechoberflächen wird analog zur y-Richtung dargestellt und ausgewertet.

### 3. Versuchsschalter mit divergierenden Laufschiene

Zunächst werden die Untersuchungen an Modellschaltkammern mit divergierenden Laufschiene unterschiedlichen Kammervolumens vorgestellt. Neben Untersuchungen zur Fußpunktbildung zum Vergleich mit den Simulationen von Mutzke [Lin-03], [Lin-04], [Lin-05a], [Lin-05b], [Mut-07] in Kapitel 8 dieser Arbeit liegt die Datengewinnung für zukünftige Simulationen im Vordergrund.

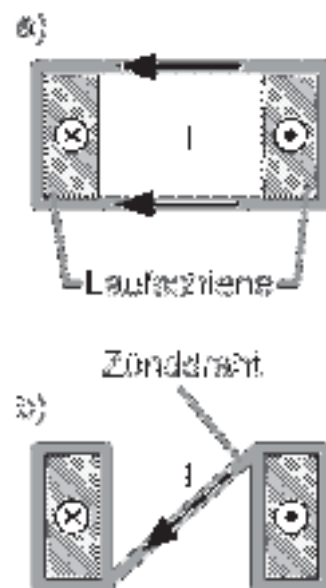
Entsprechend des zeitlichen Ablaufs eines Versuches werden folgende Phasen untersucht und besprochen:

- Lichtbogenzündung- und -wanderung an die Löschblechunterkante,
  - Bogenexpansion und Wanderung der Bogenfront und des Bogenrückens
- Lichtbogenunterteilung am Löschblech,
  - Anzahl der Fußpunkte
  - Erhöhung der Spannung durch Schleifenbildung
- Wanderung der Teillichtbögen,
- Aufschmelzung der Löschblechoberfläche.

#### 3.1. Lichtbogenzündung / Zündzeitpunkt

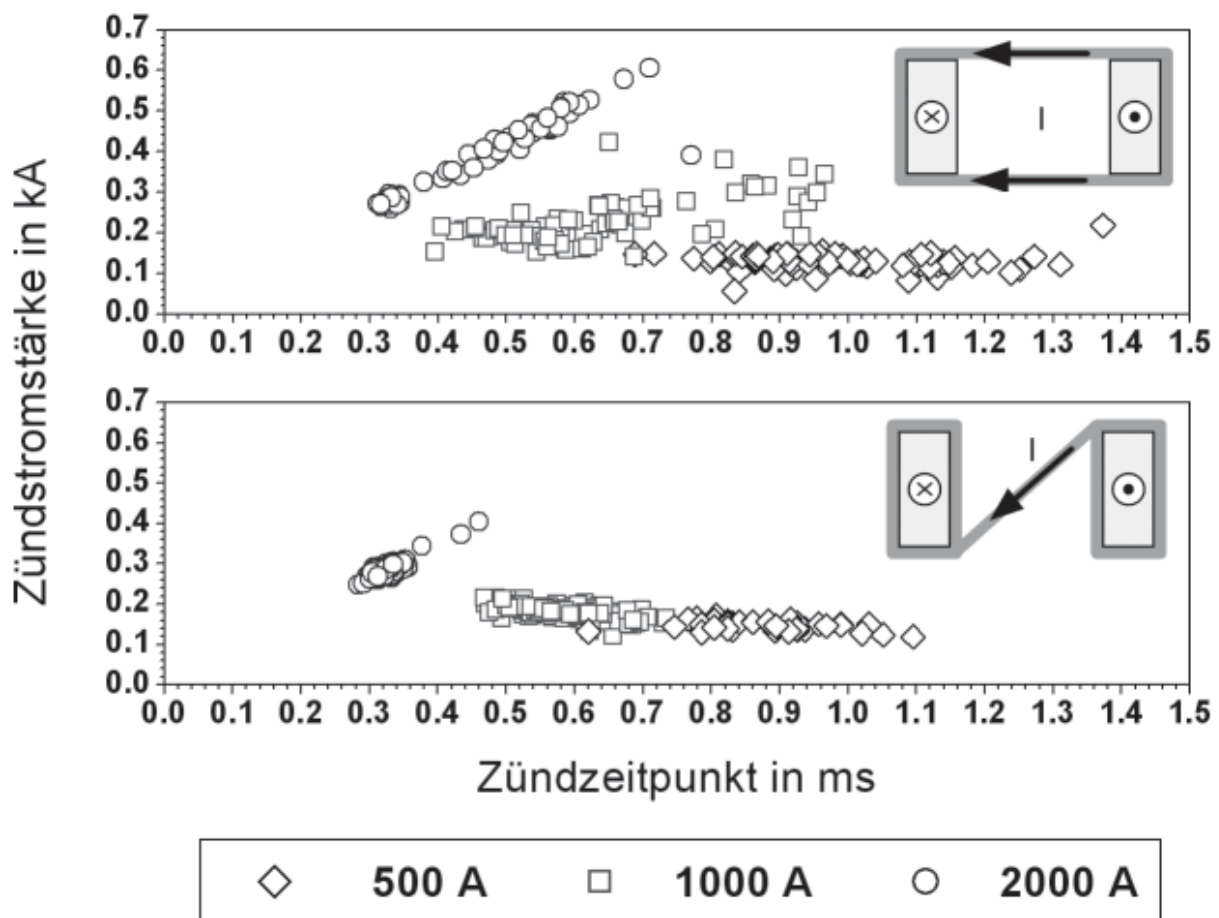
Das Bild 3.1 zeigt schematisch die beiden untersuchten Zünddrahtlagen. Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Zündstromstärke und zum Zündzeitpunkt sind in den nächsten drei Bildern 3.2 bis 3.4 dargestellt. Es sei daran erinnert, dass als Zündstromstärke der Momentanwert des Stromes bezeichnet wird, bei dem der Zünddraht verdampft und der Verlauf der Lichtbogenspannung eine Zündspitze aufweist.

Das Bild 3.2 zeigt die Verteilung der Zündstromstärke mit dem dazugehörigen



**Bild 3.1:** Zünddrahtlage mit a) zwei parallelen und b) einem quer gespannten Zünddraht

Zündzeitpunkt aus Versuchsreihen mit unterschiedlicher Zünddrahtlage bei Stromstärken von 500, 1000 und 2000 A. Pro Stromstärke und Zünddrahtlage sind mindestens 50 Einzelmessungen ausgewertet worden. Insbesondere die Messwerte der 2000 A-Messungen geben den Verlauf der sinusförmigen Stromkurve, auf der ja die momentanen Zündströmwerte bei unterschiedlichen Zündzeitpunkten liegen müssen, gut wieder. Der sinusförmige Verlauf der Messwerte der 500 und 1000 A-Messung sticht aufgrund des auf der Ordinate dargestellten Strombereiches nicht so stark hervor ist jedoch vorhanden.

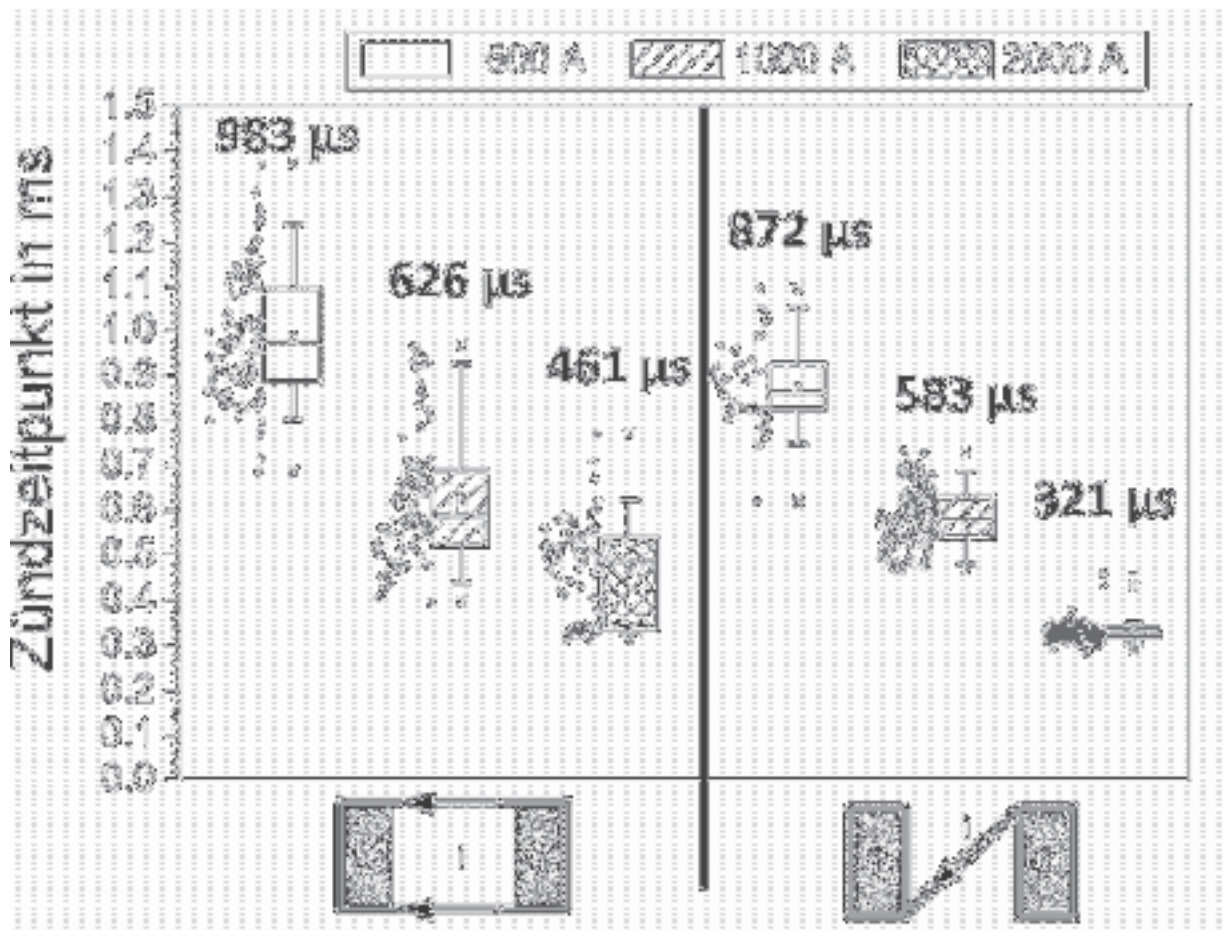


**Bild 3.2:** Verteilung der Zündzeitpunkte in Abhängigkeit der Zündstromstärke bei unterschiedlicher Zünddrahtlage und Stromstärke

Bei der Betrachtung der Zündstromstärken der 1000 A-Messungen mit paralleler Zünddrahtführung erscheint es zunächst widersprüchlich, dass zu einem bestimmten Zündzeitpunkt zwei unterschiedlich hohe (Momentan)-Zündstromwerte vorliegen. Der gleiche Zündzeitpunkt sollte bei gleicher Stromstärke einem gleichen Strommomentanwert entsprechen. Die Ursache hierfür findet sich in dem jeweiligen Betrag und der „zeitlichen Dauer“ der Zündspannungsspitze im Moment der

Lichtbogenzündung. Diese liegt meist über der treibenden Netzspannung und begrenzt damit bereits den Stromfluss (Kapitel 1.2). Die parallele Zünddrahtführung verstärkt diesen Effekt durch die Ausbildung von sogar zwei Zündspitzen. Im Falle des quer gespannten Zünddrahtes kommt es zu nur einer Zündspitze, wodurch die Zündstromstärken bei gleichem Zündzeitpunkt weniger stark streuen jedoch nach wie vor unter dem Einfluss der Zündspannungshöhe zu betrachten sind.

Werden die Messwerte aus Bild 3.2 in ihrer jeweiligen statistischen Verteilung in einem Box-Plot-Diagramm dargestellt (Kapitel 2.5.1), so ergeben sich die Verteilungen für die Zündzeitpunkte in Bild 3.3 und für die Zündstromstärken in Bild 3.4.



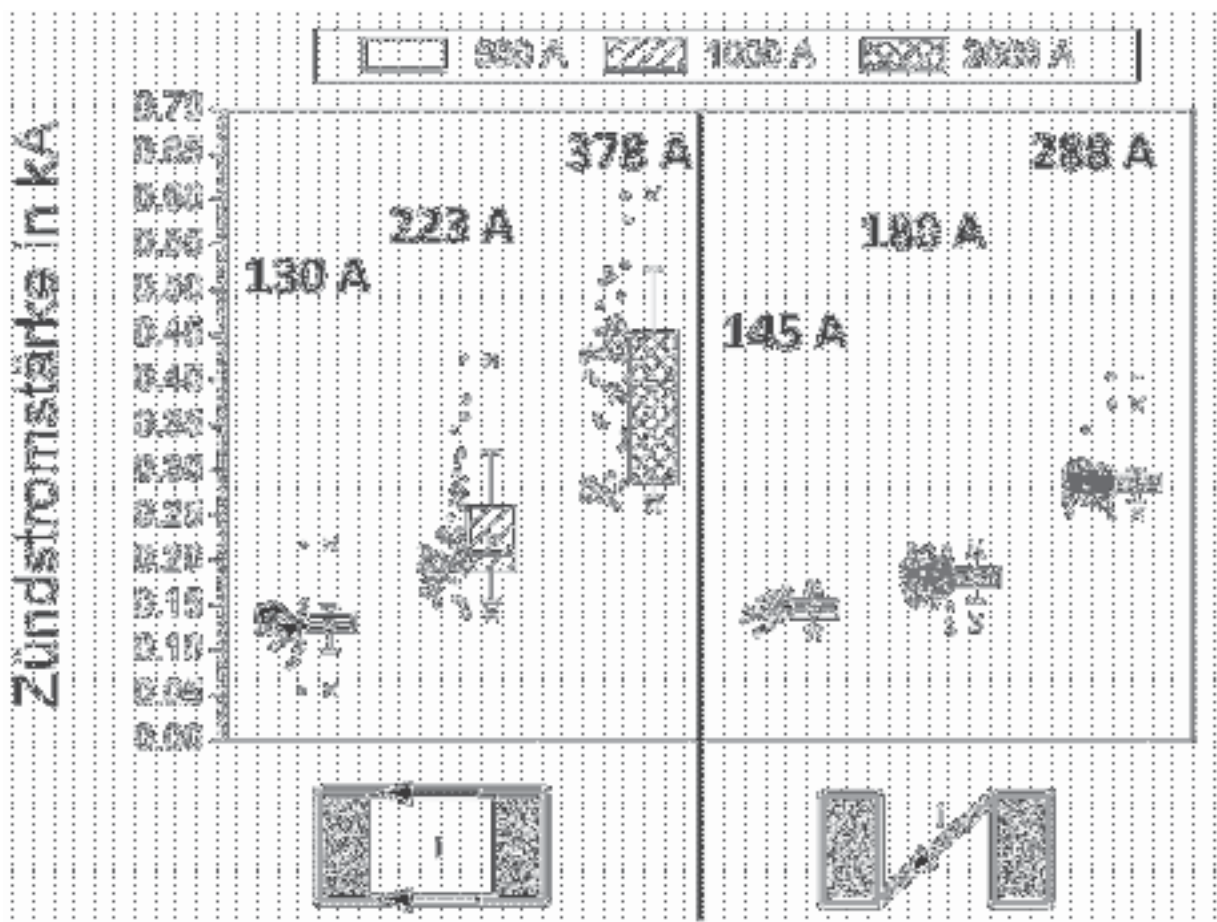
**Bild 3.3:** Statistische Verteilung der Zündzeitpunkte in Abhängigkeit der Zünddrahtlage und der Stromstärke

Es zeigt sich, dass die Zündzeitpunkte im Bild 3.3 bei paralleler Zünddrahtführung nahezu gleichförmig stark streuen. Mit zunehmender Stromstärke sinkt der mittlere Zündzeitpunkt, da der sinusförmige Strom steiler ansteigt und somit früher höhere



Strommomentanwerte erreicht werden. Die sinkenden Zündzeiten zeigen sich auch bei der Ausführung mit quer gespanntem Zünddraht, wobei jedoch die Streuung mit zunehmender Stromstärke abnimmt.

Die Verteilung der Zündstromstärken im Bild 3.4 zeigt eine hohe Streuung bei paralleler Zünddrahtführung, wobei die Streuung mit zunehmender Stromstärke deutlich zunimmt. Der quer gespannte Zünddraht zeigt eine durchgehende, stromstärkeunabhängige, niedrige Streuung der Zündstromwerte.



**Bild 3.4:** Statistische Verteilung der Zündstromstärken in Abhängigkeit der Zünddrahtlage und der Stromstärke

Die Streuung hat mehrere Ursachen. Zum einen sind die Zünddrähte (in beiden Anordnungen) lediglich um die Laufschienen gewickelt. Eine feste Kontaktierung und somit ein gleich bleibender Übergangswiderstand zwischen Laufschiene und Zünddraht liegen daher nicht vor. Vielmehr hängt die Kontaktgabe (Kontaktfläche) davon ab, wie straff der Zünddraht um die Laufschienen gelegt wurde. Zum anderen variieren die Drahtdurchmesser geringfügig, so dass auch hier Streueffekte

verursacht werden. Dies gilt für alle untersuchten Stromstärken. Die parallele Zünddrahtführung führt zusätzlich dazu, dass sich der Strom in zwei Pfade aufteilt, wobei mehr Strom durch den Zünddrahtweg mit dem geringeren Übergangs-/Durchgangswiderstand fließt. Dies führt durch Erwärmung zu einem steigenden Widerstand, wodurch sich der Stromfluss im parallelen, niederohmigeren Pfad erhöht. Der Vorgang wiederholt sich. Das „Pendeln“ wirkt sich verzögernd auf die Drahtzündung aus.

Im Falle eines quer gespannten Zünddrahtes kann der erforderliche Zündstrom früher und mit weniger zeitlicher Streuung erreicht werden.

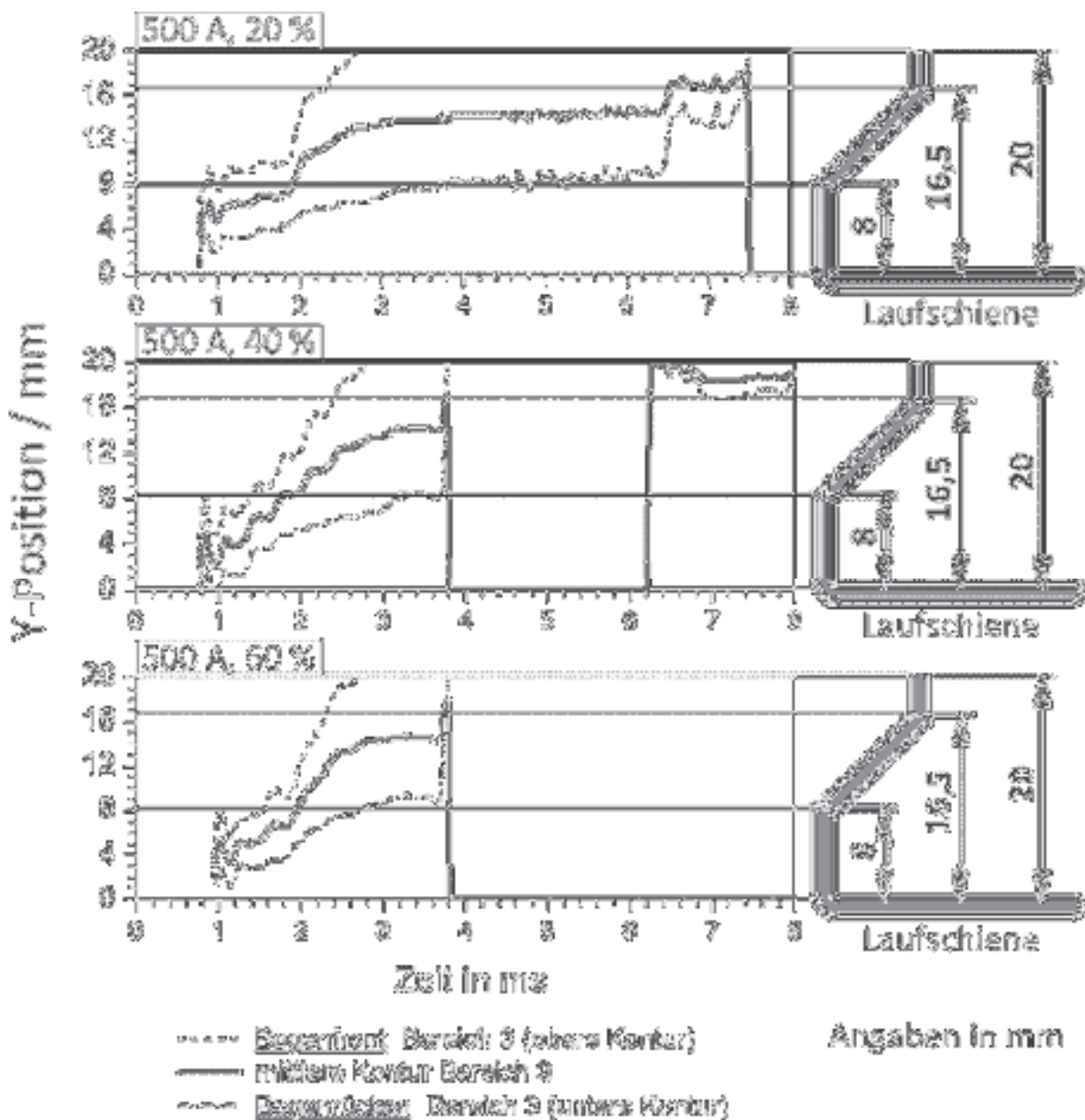
An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die durch den Zünddraht und die Momentanstromstärke bedingten Zündzeitpunkte in den Experimenten nicht mit den Auslösezeiten in einem mechanischen Schalter zu vergleichen sind. Letztere sind um einige Faktoren höher.

### **3.2. Bogenwanderung unterhalb des Löschblechs**

Der nach der Lichtbogenzündung in der Kammer befindliche Bogen nimmt – abhängig von der Stromstärke - einen gewissen Säulenquerschnitt ein und füllt den Kammerraum mehr oder weniger stark aus [Paul-97].

Die Zündung bzw. das schlagartige Verdampfen des Zünddrahtes führt zu einer raschen Expansion heißen Gases, wodurch sich eine Druckwelle ausbildet, die sowohl in Richtung des Kammersockels als auch in Richtung der Verdämmung wandert. Am Kammersockel wird die Druckwelle aufgrund der Nähe zur Zündstelle rasch reflektiert und unterstützt das Abwandern des Lichtbogens von der Zündstelle [Wei-88]. In den Auswertungen der Konturaufnahmen ist dies anhand des schnellen Ansteigens der oberen Lichtbogenkontur bis in den Bereich des ersten Laufschienenknicks kurz nach der Zündung zu erkennen. Die an der Verdämmung reflektierte Welle wandert in Richtung der Lichtbogenfront zurück und deformiert die Bogenfront beim Auftreffen in Richtung Kammersockel. In der 4 mm tiefen Kammer erfolgt nun die fast vollständige Reflexion der Druckwelle am Plasma, da der Lichtbogen den kompletten Kammerquerschnitt ausfüllt und „abdichtet“. Die Druckwelle läuft erneut in Richtung Verdämmung und die Reflexionen wiederholen sich. Zur Reflexion von Druckwellen in Modellschaltkammern führten [Cle-89], [Schi-

94], [Schü-61] und [Wei-88] umfangreiche Untersuchungen durch, die die Bogendeformation durch an der Bogenfront auftreffenden Druckwellen bestätigen.



**Bild 3.5:** Verlauf der Bogenfront, des Bogenrückens und der mittleren Lichtbogenkontur (links) und dazugehöriger Kammerabschnitt (rechts) in den 500 A-Versuchen der 4 mm tiefen Kammer bei unterschiedlichem Öffnungsquerschnitt

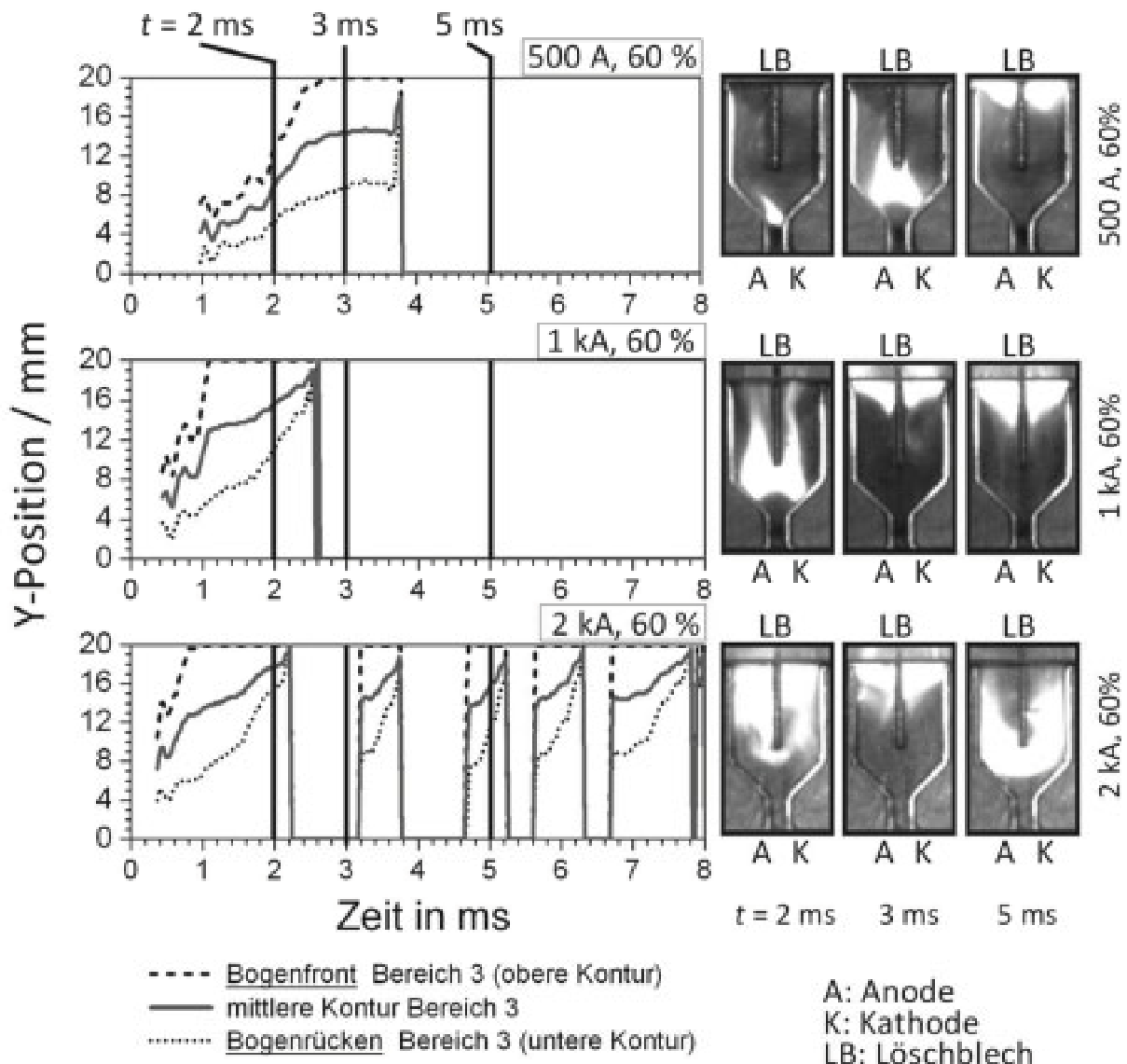
In Bild 3.5 ist die Druckwellenwanderung an der Schwingung zu erkennen, die dem (steigenden) Verlauf der mittleren Kontur überlagert sind. Zur Ausbildung von Schwingungen und Druckwellen innerhalb einer Schaltkammer gibt Paulke [Paul-97] eine ausführliche Übersicht, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll. Im Fall

eines größeren Kammerquerschnitts sind diese Druckwellen am Verlauf der Lichtbogenkontur nicht zu erkennen: Die von der Verdämmung reflektierte Druckwelle kann den Lichtbogen besser umströmen und deformiert die Bogenfront daher nicht so stark. Die Druckwellen sind jedoch nach wie vor vorhanden, wie Messungen von Paulke [Paul-97] zeigen.

Nach der Zündung und während der Phase der Schwingungen bzw. Druckreflexionen wandert der Lichtbogen an die Knickstelle der Laufschiene. In Bild 3.5 ist anhand der Zeit, in der sich die untere Lichtbogenkontur auf der Höhe der ersten Laufschiene knickstelle bei 8 mm Kammerhöhe verweilt zu erkennen, dass der Lichtbogen am Übergangsbereich hängen bleibt.

Während die Bogenfront abhängig von der Verdämmungsöffnung in Richtung des oberen Kammerbereiches wandert bzw. sich der Lichtbogen entlang des divergierenden Laufschienebereiches verlängert (aufweitert), stoppt der Bogenrücken an der Knickstelle und wandert nach einer bestimmten Verzugszeit nach. Je weiter die Verdämmung geöffnet ist, desto kürzer ist die Verharzeit des Bogenrückens an der Knickstelle.

Der Einfluss der Verdämmung auf die Lichtbogenwanderung nimmt mit steigender Stromstärke zu: Im Falle hoher Stromstärken erreicht die obere und mittlere Lichtbogenkontur bei weit geöffneter Verdämmung schneller die Löschblechunterkante als bei geringen Stromstärken. Höhere Stromstärken führen durch die erhöhte Leistungszufuhr in das Plasma zu einer stärkeren vertikalen Lichtbogenausdehnung und ergeben so eine erhöhte Anzahl an Rückzündungen (Bild 3.6, unterer Verlauf). Die Kammer füllt sich stärker mit Plasma bzw. der Lichtbogen liegt als breites Band innerhalb der Kammer. Dies zeigen die Filmaufnahmen in Bild 3.6

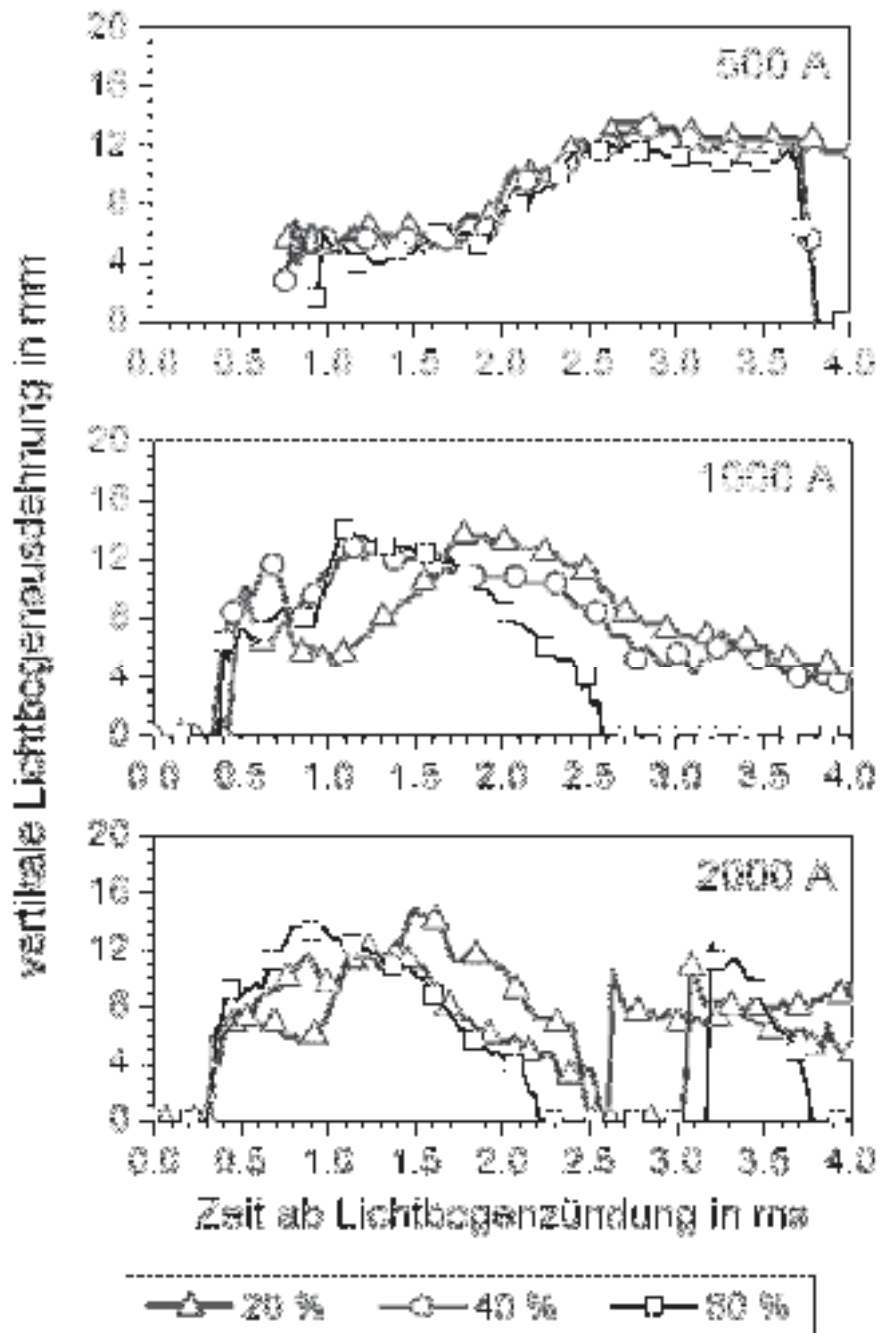


**Bild 3.6:** Verlauf der Bogenfront, des Bogenrückens und der mittleren Lichtbogenkontur (links) und Teilbilder der dazugehörigen Schnellfilmaufnahme zum Zeitpunkt 2, 3 und 5 ms nach Lichtbogenzündung (rechts) in Versuchen der 4 mm tiefen Kammer bei unterschiedlicher Stromstärke

Der zeitliche Verlauf der Lichtbogenhöhe direkt nach der Zündung ist in Bild 3.7 in Abhängigkeit von der Verdämmungsöffnung dargestellt.

Die Kurven entsprechen der Differenz des oberen und des unteren Konturverlaufes im Kammerbereich 3.

Die vertikale Lichtbogenausdehnung und damit das Plasmavolumen direkt nach der Zündung nimmt mit steigender Stromstärke zu.



**Bild 3.7:** vertikale Lichtbogenausdehnung im divergierenden Kammerbereich in Abhängigkeit der Stromstärke und der geöffneten Verdämmung in der 4 mm tiefen Kammer

Es zeigt sich, dass die Lichtbogenbreite bis zum einem globalen Maximum ansteigt und anschließend wieder bis auf den Wert Null absinkt. Diese im Zeitverlauf

abnehmende vertikale Lichtbogenausdehnung bedeutet dabei, dass die obere Lichtbogenkontur aus dem unteren Kammerbereich abgewandert ist, d. h. den Bereich 3 verlässt: Der Lichtbogen beginnt sich um das Löschblech zu legen. Die Lichtbogenbreite **im unteren Kammerbereich** nimmt nun kontinuierlich ab, da der Bogenrücken (die untere Bogenkontur) weiter in Richtung Kammeroberseite wandert bzw. der Querschnitt der Bogensäule durch Kühlung und Anpressen an der Blechunterkante abnimmt. Ist die Lichtbogenbreite auf den Wert Null zurückgegangen, dann bedeutet dies, dass sich der Lichtbogen am Löschblech in zwei Teillichtbögen unterteilt hat.

Die Lichtbogenunterteilung am Löschblech erfolgt umso eher, je größer die Stromstärke und je weiter die obere Kammerverdämmung geöffnet ist.

Neben der Stromstärke und den in der Verdämmung angebrachten Ausblasöffnungen hat der Kammerquerschnitt, durch den sich der Lichtbogen während der Wanderungsphase hindurchbewegt, einen Einfluss auf das Wanderungsverhalten [Erk-74].

Die Diagramme in Bild 3.8 zeigen die Änderung der anfänglichen Ausdehnungsgeschwindigkeit der Bogenfront und des Bogenrückens im divergierenden Kammerbereich. Ausgewertet wurden einzelne Versuche der drei untersuchten Kammertiefen.

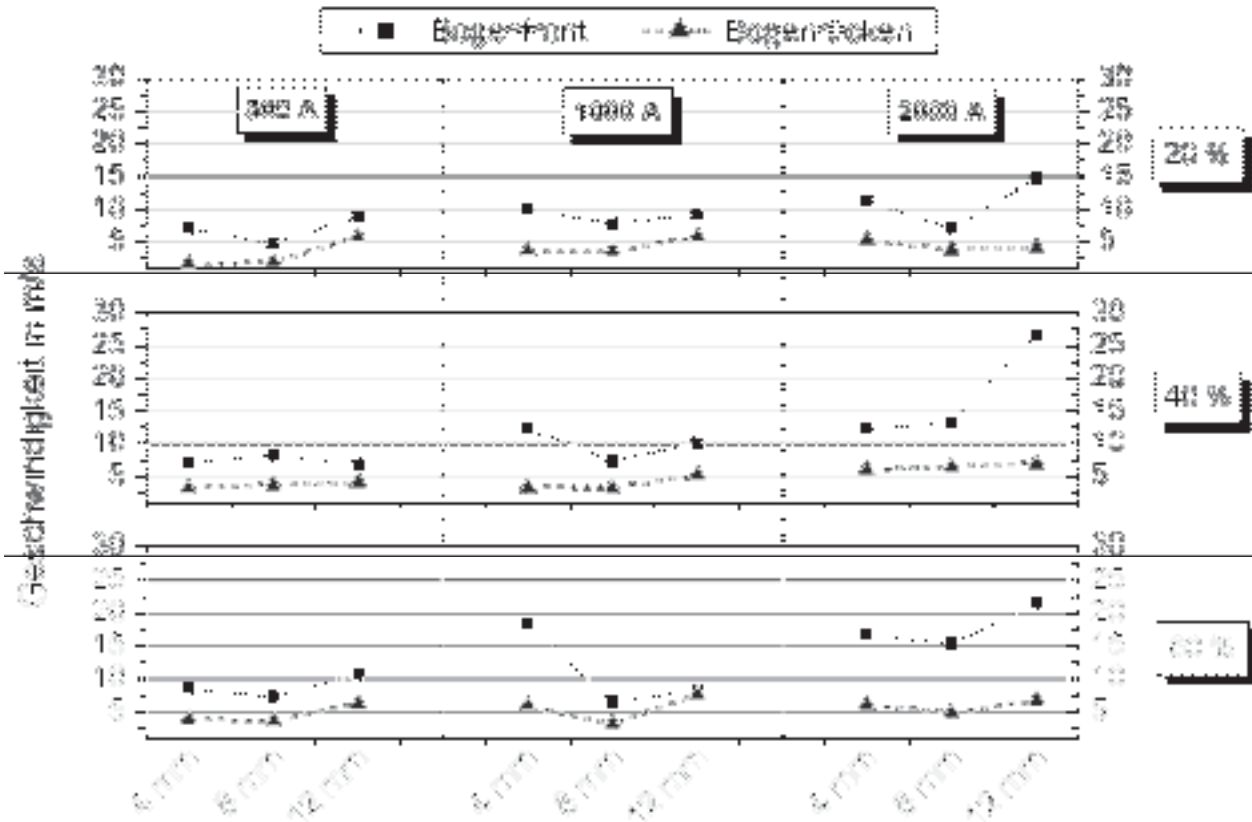
An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die in der Abbildung aufgeführten Werte der mittleren Geschwindigkeiten der nach der Lichtbogenzündung expandierenden und an die Löschblechunterkante wandernden Bogenkontur entsprechen. Diese sagen nichts über die jeweiligen Momentangeschwindigkeiten des Lichtbogens, insbesondere der Lichtbogenfußpunkte aus. Man sollte daher eher von einer kombinierten „Expansions- und Wanderungsgeschwindigkeit“ sprechen.

Es kann festgestellt werden, dass sich die Lichtbogenfront bei gleich bleibendem Kammervolumen und mit zunehmender Stromstärke schneller in der Kammer ausbreitet und daher rascher an die Löschblechunterkantekante wandert bzw. diese berührt. Dies ist eindeutig in den 4 mm tiefen Kammern für einen zunehmenden Öffnungsquerschnitt der 1000 A und der 2000 A Messungen zu erkennen.

Die Erhöhung der Kammertiefe auf 8 mm führt in fast allen Anordnungen zu einer sinkenden Geschwindigkeit der Lichtbogenfront. Eine Erhöhung des

Öffnungsquerschnitts führt lediglich bei den 2000 A Messungen zu einer eindeutigen Erhöhung der Geschwindigkeit der Bogenfront.

In der 12 mm tiefen Kammer steigt die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Bogenfront wieder an. Mit zunehmender Verdämmungsöffnung breitet sich die Lichtbogenfront – insbesondere bei den 2000 A-Messungen – schneller aus.



**Bild 3.8:** Anfängliche, mittlere Wanderungsgeschwindigkeit der Bogenfront und des Bogenrückens im divergierenden Kammerbereich



### **3.3. Lichtbogenunterteilung am Löschblech**

Zur Untersuchung der Bogenunterteilung durch Schleifenbildung um das Löschblech werden vorwiegend Messungen mit geringen Stromstärken betrachtet. Hier liegen zum einen auf Grund der geringen magnetischen Antriebskräfte des Lichtbogens sehr geringe Wanderungsgeschwindigkeiten vor. Zum anderen bilden sich bei geringen Stromstärken zunächst nur einzelne, in den Filmaufnahmen gut zu erkennende Fußpunkte auf dem Löschblech aus. Bei den Untersuchungen mit höheren Stromstärken zeigen die Filmaufnahmen sehr diffuse, breit verteilte Gebiete mit Plasma, die zur sofortigen Ausbildung von mehreren parallelen Fußpunkten auf der Löschblechoberfläche führen.

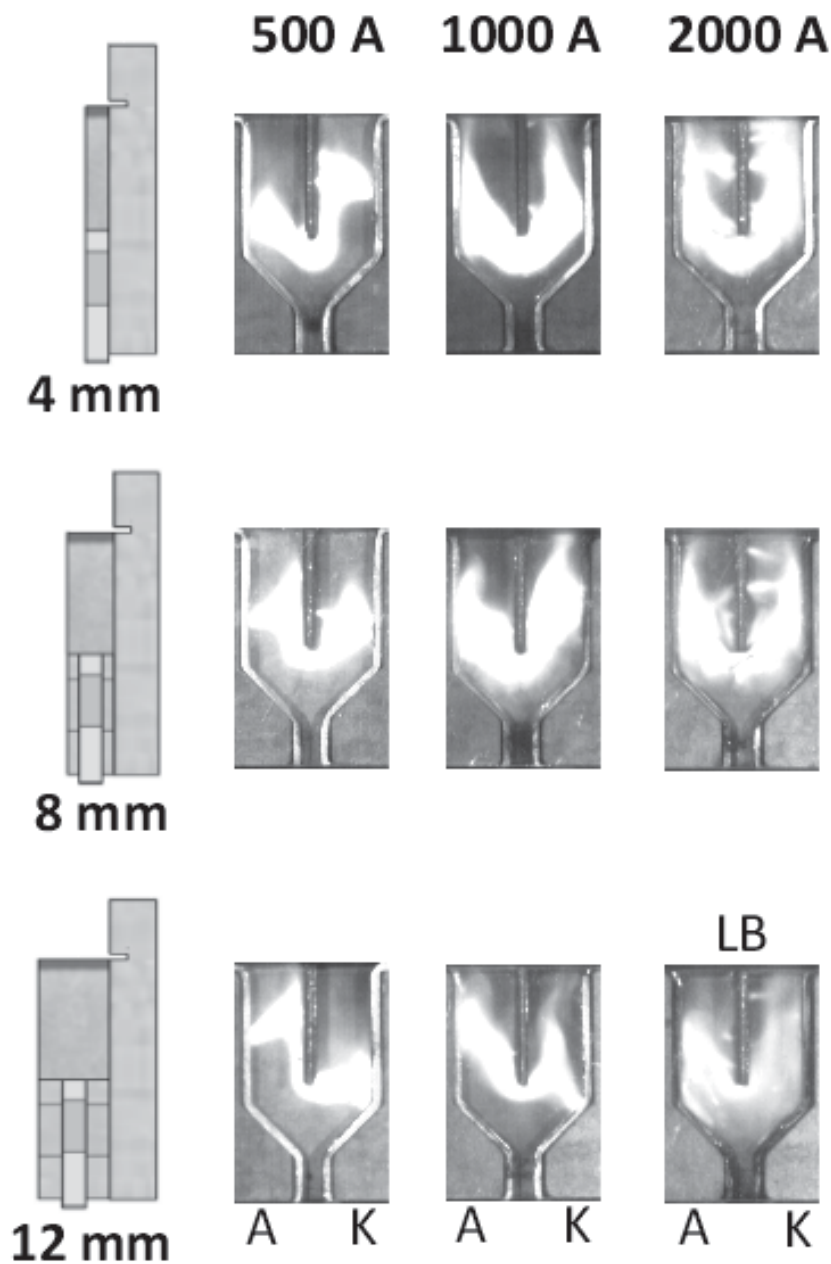
Geringe Stromstärken ermöglicht daher eine zunächst genauere Betrachtung der Vorgänge während des Unterteilungsvorgangs.

#### **3.3.1. Schleifenbildung und Fußpunkte auf dem Löschblech**

Im Bild 3.9 sind Filmbilder zum Zeitpunkt der ersten erkennbaren Fußpunktbildung auf dem Löschblech dargestellt. Die Bilder entstammen Filmaufnahmen aus Versuchen mit den in der Abbildung angegebenen Bedingungen.

Es ist zu erwarten, dass die Schleifenbildung um das Löschblech bei etwa gleicher Wanderungsgeschwindigkeit des anodischen und des kathodischen Lichtbogenansatzes an den Laufschiene relativ gleichförmig erfolgt, wodurch der Lichtbogen eine U-förmige Struktur aufweist. Die Fußpunkte auf dem Löschblech bilden sich dann auf etwa derselben Höhe. In Anordnungen mit divergierenden Laufschiene bewegen sich die Lichtbogenansätze hingegen durch Verharzeiten an den Laufschieneknickstellen teilweise unterschiedlich schnell, wodurch es zu einer Schräglage des Lichtbogens innerhalb der Schaltkammer kommt. Dies geschieht sowohl in Fällen, bei denen der anodische Fußpunkt rasch in Richtung der Verdämmung wandert während der kathodische Fußpunkt noch am Ende des divergierenden Laufschienebereiches verweilt, als auch anders herum. Es konnte keine Polaritätsabhängigkeit der Schräglage des Lichtbogens nachgewiesen werden.

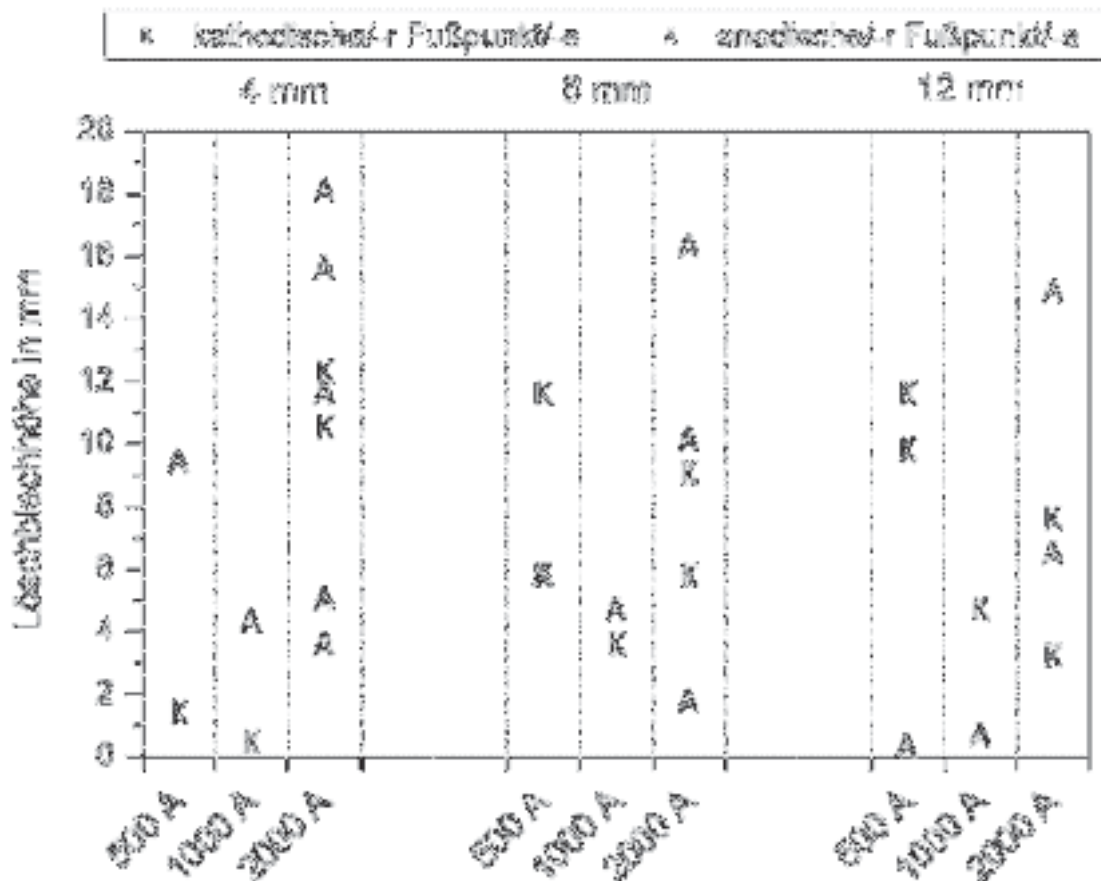
Durch die Schräglage des Lichtbogens, bildet sich in der überwiegenden Anzahl der Versuche ein Löschblechfußpunkt nahe der Blechunterkante, während sich der andere auf etwa der halben Blechhöhe bzw. etwas oberhalb dieser bildet.



**Bild 3.9:** Lichtbogen zum Zeitpunkt der ersten Fußpunktbildung auf normalen Löschblechen; alle Versuche bei einem Öffnungsquerschnitt von 20 %

Gessner [Ges-62] konnte die Zündung von Fußpunkten nahe der Löschblechunterkante für kathodische Blechfußpunkte bei 1200 A Gleichstromlichtbögen beobachten und führt dies auf die dort herrschende Spannungsdifferenz zwischen Bogensäule und Löschblech zurück, die an eben jener Kante die höchste Feldstärke ergibt. Der anodische Löschblechfußpunkt bildet sich in Gessners Untersuchungen dann weiter hinter der Löschblechkante. Dies bedeutet

jedoch nicht, dass für die anodische Fußpunktbildung eine höhere Spannung benötigt wird. Es ist lediglich ein Indiz dafür, dass der kathodische Fußpunkt die Lichtbogenunterteilung durch Zündung nahe der Löschblechunterkante einleitet. Zur ausreichenden Erhöhung der Lichtbogen Spannung bedarf es anscheinend trotzdem noch einer zusätzlich Verlängerung der Bogensäule durch die Umwölbung entlang der anodischen Löschblechoberfläche.



**Bild 3.10:** Höhe des ersten Fußpunktes / Plasmastrahls auf jeweils einem Löschblech bei jeweils einem Versuch, Alle Versuche bei einem Öffnungsquerschnitt von 20 %

Die Betrachtung des Ortes der ersten Fußpunktbildung auf jeweils einem Löschblech bei einem einzigen Versuch aus einigen Messungen mit 20 % geöffneter Verdämmung führt zu dem im Bild 3.10 dargestellten Diagramm. Hierbei handelt es sich um die Auswertung von jeweils einer Schaltung pro Kamertiefe und Stromstärke.

Aufgrund der Struktur des Lichtbogens kurz vor der Unterteilung am Löschblech bilden sich die Fußpunkte nicht immer auf derselben Blechhöhe. In den Versuchen mit hoher Stromstärke und geringer Tiefe ist die Kammer so rasch und so stark mit hoch leitfähigem, heißen Plasma gefüllt, dass das Löschblech fast auf der gesamten Höhe damit in Berührung kommt. Folglich herrschen entlang der kompletten Löschblechhöhe sehr günstige Voraussetzungen für die Ausbildung bzw. Zündung von Fußpunkten. Dabei spielen laut Kapitel 1.2 die Verhältnisse an der Löschblechkathode die maßgebliche Rolle zur Ausbildung von Fußpunkten. Hat sich erst einmal ein kathodisches Fallgebiet beispielsweise an einer Mikrospitze auf dem Blech ausgebildet, so geschieht sofort danach die Ausbildung eines oder mehrerer paralleler anodischer Fallgebiete. Dies zeigen die eigenen Messungen. Da die Bildung anodischer Fußpunkte einfacher erfolgen kann (Kapitel 1.2), entstehen diese sofort **nach** der Ausbildung der kathodischen Fußpunkte an mehreren Stellen entlang der Löschblechhöhe. Durch die lokale Erhöhung der Stromdichte sowohl im anodischen als auch im kathodischen Fußpunkt bilden sich klar erkennbare Plasmastrahlen aus. Je geringer die Kammertiefe ist und je höher die untersuchte Stromstärke ist, desto mehr anodische Fußpunkte bilden sich weiter oberhalb der Löschblechunterkante aus.

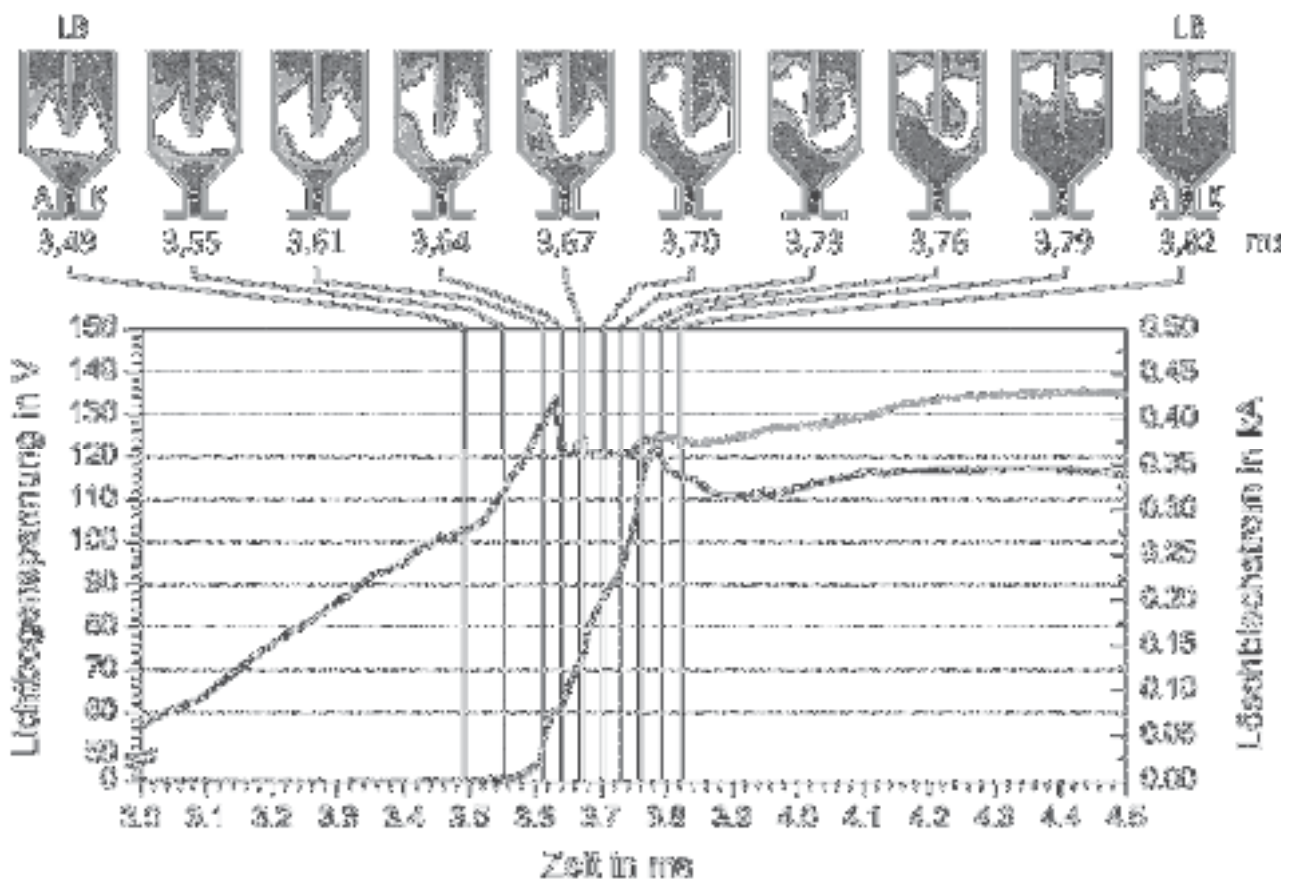
### **3.3.2. Lichtbogenspannung / Zündspannung**

Der genaue Betrag der Spannungserhöhung zur Bildung von Fußpunkten auf der Löschblechoberfläche ist in Kammern mit divergierenden Laufschiene nicht einfach zu ermitteln. Insbesondere durch den geringen Abstand der Löschblechunterkante zum divergierenden Kammerbereich kommt es dazu, dass der Lichtbogen zusätzlich zur raschen Säulenverlängerung mehr oder weniger sofort mit dem Löschblech (der Löschblechunterkante) in Berührung kommt. Die Kombination von Bogenverlängerung durch die Laufschiene und sofortiger Bogenkühlung durch das Löschblech führt zur raschen Erhöhung der Lichtbogenspannung. Dieser energetisch ungünstige Zustand hoher Lichtbogenspannung wird im Folgenden durch mehrfache Rückzündungen im (noch) hochleitfähigen, bereits durchwanderten Gebiet mit kurzem Schienenabstand aufgelöst. Der eigentliche Ablauf der Spannungserhöhung durch Schleifenbildung des Lichtbogens um das Löschblech mit anschließender Fußpunktbildung und Unterteilung wird durch die starken Spannungsschwankungen der Rückzündungen überlagert.

Die im Folgenden vorgestellten Untersuchungen zeigen jeweils Einzelmessungen. Die Lage der Fußpunkte während der Zündung auf dem Löschblech ist in allen Versuchsanordnungen nicht polaritätsabhängig reproduzierbar.

### 3.3.2.1. Einfluss der Kammertiefe

Im Falle der untersuchten Stromstärke von 500 A ist die anfängliche Wanderungsgeschwindigkeit des Lichtbogens ausreichend klein, so dass sowohl in den Filmaufnahmen als auch im Verlauf der Lichtbogenspannung ein diskreter Start- und Endzeitpunkt der Spannungserhöhung durch die Schleifenbildung/Fußpunktbildung bestimmt werden kann. Im folgenden Kapitel wird daher die Schleifenbildung in der 40 mm hohen Kammer anhand der Versuche mit geringer Stromstärke untersucht.



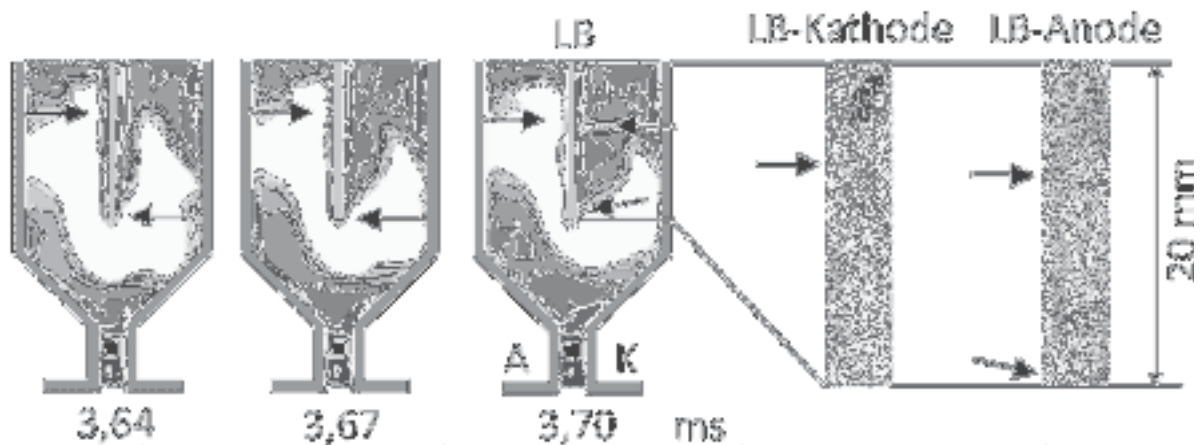
**Bild 3.11:** Lichtbogenunterteilung in einer 40 mm hohen, 4 mm tiefen Kammer mit einem normalen Löschblech,  $I = 500 \text{ A}$ , Öffnungsquerschnitt: 40 %

Das Bild 3.11 zeigt das Oszillogramm und die Teilbilder einer Lichtbogenunterteilung bei einem Versuch mit 500 A in einer 4 mm tiefen Kammer. Der gleichmäßige Spannungsanstieg im Bereich von 3,08 bis 3,46 ms entspricht der Verlängerung der Lichtbogensäule entlang des divergierenden Laufschienebereiches. Während des gesamten Zeitraumes der Bogenverlängerung kommt die Bogensäule mit der Blechunterkante in Kontakt, wodurch der Spannungsanstieg den Anteil, der durch diesen zusätzlichen Energieentzug aus dem Plasma verursacht wird, beinhaltet. Ab etwa 3,5 ms wandern beide Laufschienefußpunkte entlang des oberen parallelen Kammerbereiches in Richtung der Verdämmung. Der Lichtbogen legt sich schleifenförmig um das Löschblech und die Lichtbogenspannung steigt von 104 auf 128 V (3,62 ms) an.

Die Erhöhung um 24 V führt zur Zündung von Fußpunkten auf dem Löschblech, wodurch der Löschblechstrom merklich anzusteigen beginnt. Beim leichten Anstieg des Löschblechstromes im Bereich von 3,54 bis 3,62 ms handelt es sich nicht um einen Messfehler. Vielmehr zeigt sich deutlich, dass bereits ein Teilstrom durch das Löschblech fließt, obwohl noch keine Fußpunkte auf dem Blech zu erkennen sind. Die Ursache für den Stromfluss liegt darin begründet, dass an den beiden Löschblechseiten – bedingt durch die Lichtbogenumwölbung – jeweils ein anderes Potential anliegt, welches bereits vor der sichtbaren Fußpunktbildung einen Strom durch das Löschblech treibt. Erst das lokale Überschreiten einer gewissen Mindeststromstärke bzw. Mindeststromdichte führt zur Ausbildung von gut sichtbaren Plasmastrahlen auf den Löschblechoberflächen, die zu einem rascheren Anstieg des Teilstromes durch das Löschblech führen.

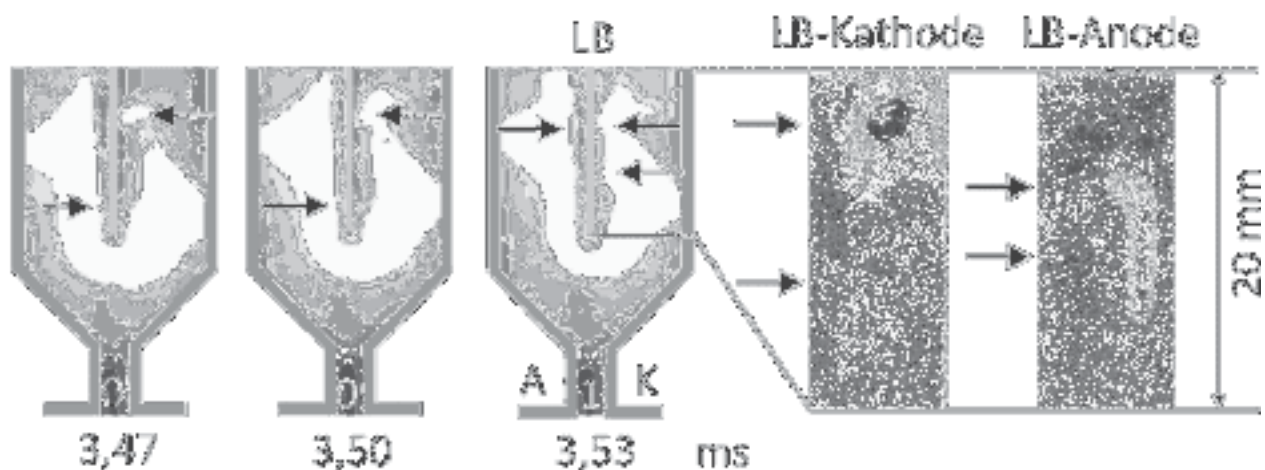
Die Lichtbogenspannung sinkt nach Erreichen eines Maximalwertes von etwa 144 V auf knapp 120 V ab. Während dieses Zeitraumes erfolgt die Ausbildung von Fallgebieten/Fußpunkten auf den Löschblechoberflächen. Der anodische Löschblechfußpunkt bildet sich hierbei im Zeitraum zwischen 3,62 und 3,64 ms fast direkt an der Blechunterkante, der kathodische oberhalb der halben Löschblechhöhe aus. Im Folgenden bildet sich ein zweiter Fußpunkt auf der Löschblechanode wenig unterhalb des kathodischen aus (3,70 ms). Der Strom durch das Löschblech steigt weiter an, während der gut sichtbare Strompfad unterhalb des Löschblechs stetig schmaler wird, bis er bei 3,79 ms vollkommen verschwunden ist. Es befindet sich jedoch immer noch heißes Plasma mit Restleitfähigkeit im divergierenden Bereich vor der Löschblechunterkante, so dass noch ein geringer Anteil des Stromes am

Löschblech vorbei fließt. Die Lichtbogenspannung sinkt nach dem „Aufreißen“ der Lichtbogenschleife und der damit verbundenen Aufteilung langsam von etwa 122 bis auf 110 V ab, steigt dann aber wieder geringfügig mit dem steigenden Löschblechstrom.



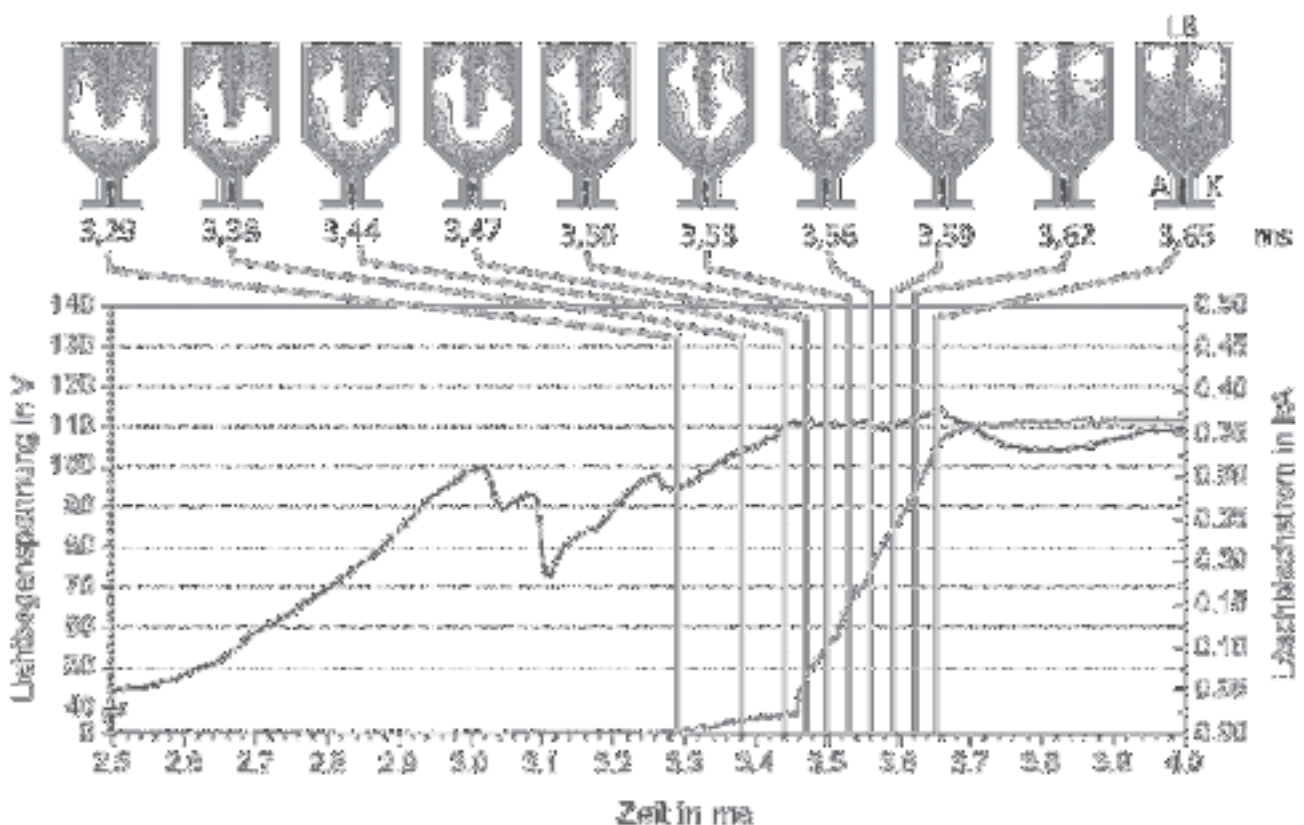
**Bild 3.12:** Lichtbogenunterteilung und Fußpunkte auf den Löschblechoberfläche der Messung aus Bild 3.11

Die Fußpunkte sind in der vergrößerten Darstellung der Teilbilder der Schnellfilmaufnahme und auf den Aufschmelzungen der Löschblechoberfläche im Bild 3.12 gut zu erkennen.



**Bild 3.13:** Lichtbogenunterteilung und Fußpunkte auf den Löschblechoberfläche der Messung aus Bild 3.14

Eine Erhöhung der Kammertiefe auf 8 mm führt bei gleich bleibender Stromstärke im gegebenen Beispiel zu einer fast identischen Unterteilung. Hier bildet sich der anodische Löschblechfußpunkt jedoch genauso wie der kathodische gleich oberhalb der halben Löschblechhöhe (siehe Bild 3.13). Die Lichtbogen­spannung steigt, wie im Oszillogramm des Bildes 3.14 zu erkennen ist, während der Phase der Schleifenbildung im Zeitbereich von 3,29 bis 3,46 ms von 94 bis auf 111 V, also um 17 V an und verbleibt während des gesamten Löschblechstromanstiegs auf diesem Spannungsniveau. Die Ausbildung eines parallelen Fußpunktes auf der Löschblechanode (3,35 ms) führt zu keiner wesentlichen Änderung in der Lichtbogen­spannung. Erst das „Aufreißen“ der Schleife um das Löschblech ab 3,62 ms führt wieder zu einem leichten Abfall der Spannung um etwa 10 V.

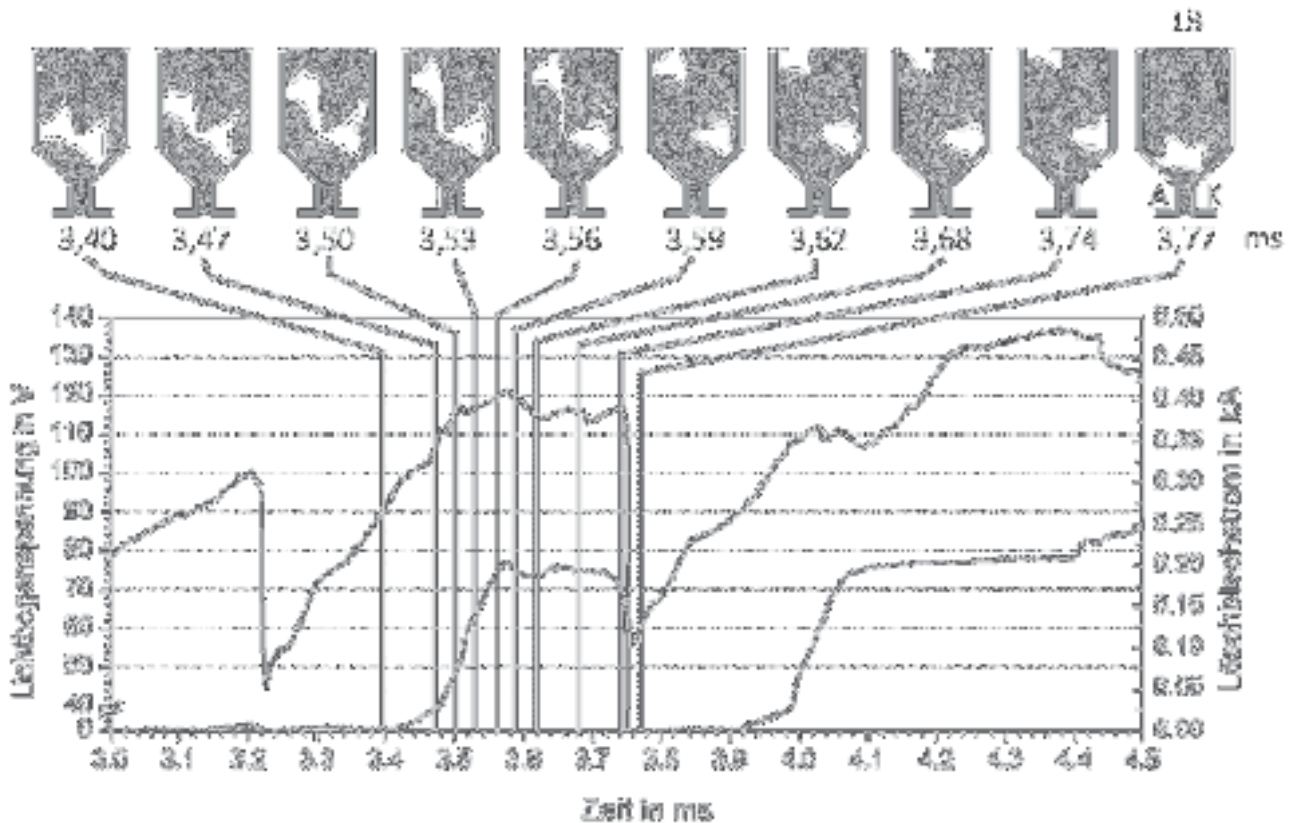


**Bild 3.14:** Lichtbogenunterteilung in einer 40 mm hohen, 8 mm tiefen Kammer mit einem normalen Löschblech,  $I = 500 \text{ A}$ , Öffnungsquerschnitt: 40 %

In einer 12 mm tiefen Kammer (Bild 3.15) beginnt die Schleifenbildung im gezeigten Beispiel ab etwa 3,41 ms durch Abwanderung des anodischen Laufschienenfußpunktes bis auf etwa die halbe Löschblechhöhe. Der kathodische Fußpunkt bewegt sich hierbei nur langsam entlang des divergierenden



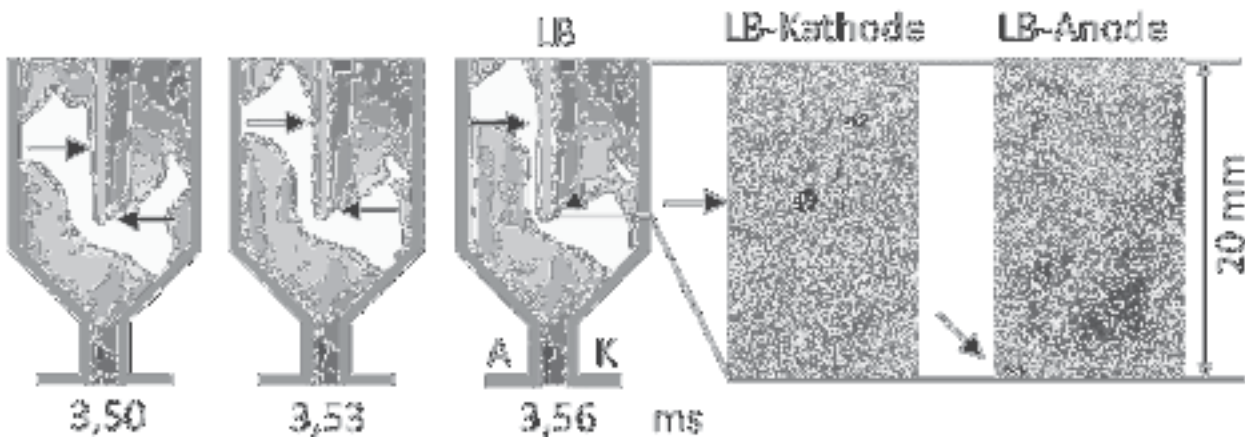
Kammerbereiches. Dies führt zu einer Schräglage des Lichtbogens innerhalb der Schaltkammer.



**Bild 3.15:** Lichtbogenunterteilung in einer 40 mm hohen, 12 mm tiefen Kammer mit einem normalen Löschblech,  $I = 500 \text{ A}$ , Öffnungsquerschnitt: 40 %

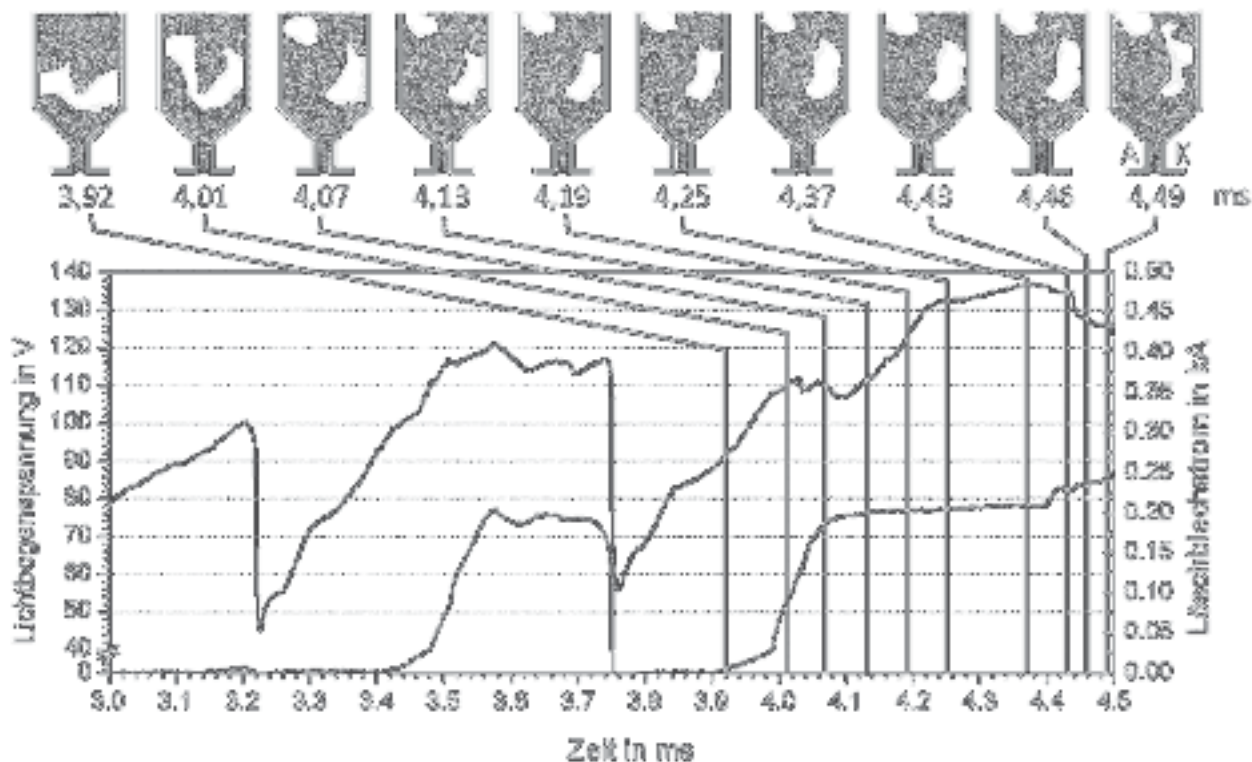
Die Schleifenbildung endet bei etwa 3,50 ms durch Ausbildung der Fußpunkte auf dem Löschblech (Bild 3.16). In Zeitraum der Schleifenbildung steigt die Lichtbogen-Spannung von 93 bis auf 115 V an. Die Schräglage des Lichtbogens führt dazu, dass sich der anodische Löschblechfußpunkt an der Löschblechunterkante und der kathodische oberhalb der halben Löschblechhöhe bilden. Der linke Teillichtbogen wandert bis unter die Verdämmung, wohingegen der rechte Teillichtbogen an der Löschblechunterkante verharrt. Die Ausbildung eines höher liegenden Fußpunktes auf der anodischen Löschblechseite findet zunächst nicht statt, obwohl sich schon ab 3,47 ms ein paralleler, kathodischer Laufschienefußpunkt auf Höhe des unteren Löschblechdrittels befindet und in Richtung des Löschblechs strahlt. An dieser Stelle sei noch einmal gesagt, dass die Lage der Fußpunkte während der Zündung auf dem Löschblech nicht

polaritätsabhängig reproduzierbar ist. Der Strom kommutiert nicht in den weiter oben liegenden Pfad, sondern konzentriert sich vielmehr am Laufschieneknick am Ende des divergierenden Bereiches. Hierdurch wird eine Rückzündung eingeleitet, da der rechte Teillichtbogen den divergierenden Bereich langsam mit heißem, hoch leitfähigem Plasma anfüllt.



**Bild 3.16:** Erste Lichtbogenunterteilung und Fußpunkte auf den Löschblechoberfläche der Messung aus Bild 3.15

Nach der Rückzündung teilt sich der Lichtbogen erneut unter Schleifenbildung (3,92 – 3,99 ms) am Löschblech auf (Bild 3.17). Die Fußpunkte bilden sich an den Stellen auf dem Löschblech, an denen sie zuvor verloschen sind. Während der Phase des Löschblechstromanstieges bleibt die Lichtbogenspannung auf einem nahezu konstanten Wert von etwa 110 V. Der rechte Teillichtbogen verlängert sich im weiteren Zeitverlauf und bildet unter Erhöhung der Lichtbogenspannung einen parallelen Fußpunkt kurz unterhalb der Verdämmung. Dieser liegt dem kathodischen Fußpunkt direkt gegenüber. Im Folgenden verlischt der Strompfad durch den unteren Fußpunkt und der Strom fließt durch die Fußpunkte unterhalb der Verdämmung. Zusammenfassend bleibt festzuhalten, daß sich die Lichtbogenspannung vor der Ausbildung der Fußpunkte auf dem Löschblech in den gezeigten Messungen um 17 bis 24 V erhöht (Tabelle 3.2).



**Bild 3.17:** Lichtbogenunterteilung in einer 40 mm hohen, 12 mm tiefen Kammer mit einem normalen Löschblech,  $I = 500 \text{ A}$ , Öffnungsquerschnitt: 40 %

Strom	Kammertiefe, Verdämmung,	$U_1 / \text{V}$	$U_2 / \text{V}$	$dU / \text{V}$	$t_1 / \text{ms}$	$t_2 / \text{ms}$	$dt / \mu\text{s}$
500 A	4mm, 40 %	104	128	<b>24</b>	3,50	3,62	120
500 A	8 mm, 40 %	94	111	<b>17</b>	3,29	3,46	170
500 A	12 mm, 40 %	93	115	<b>22</b>	3,41	3,50	90
		92	110	<b>18</b>	3,92	3,99	70

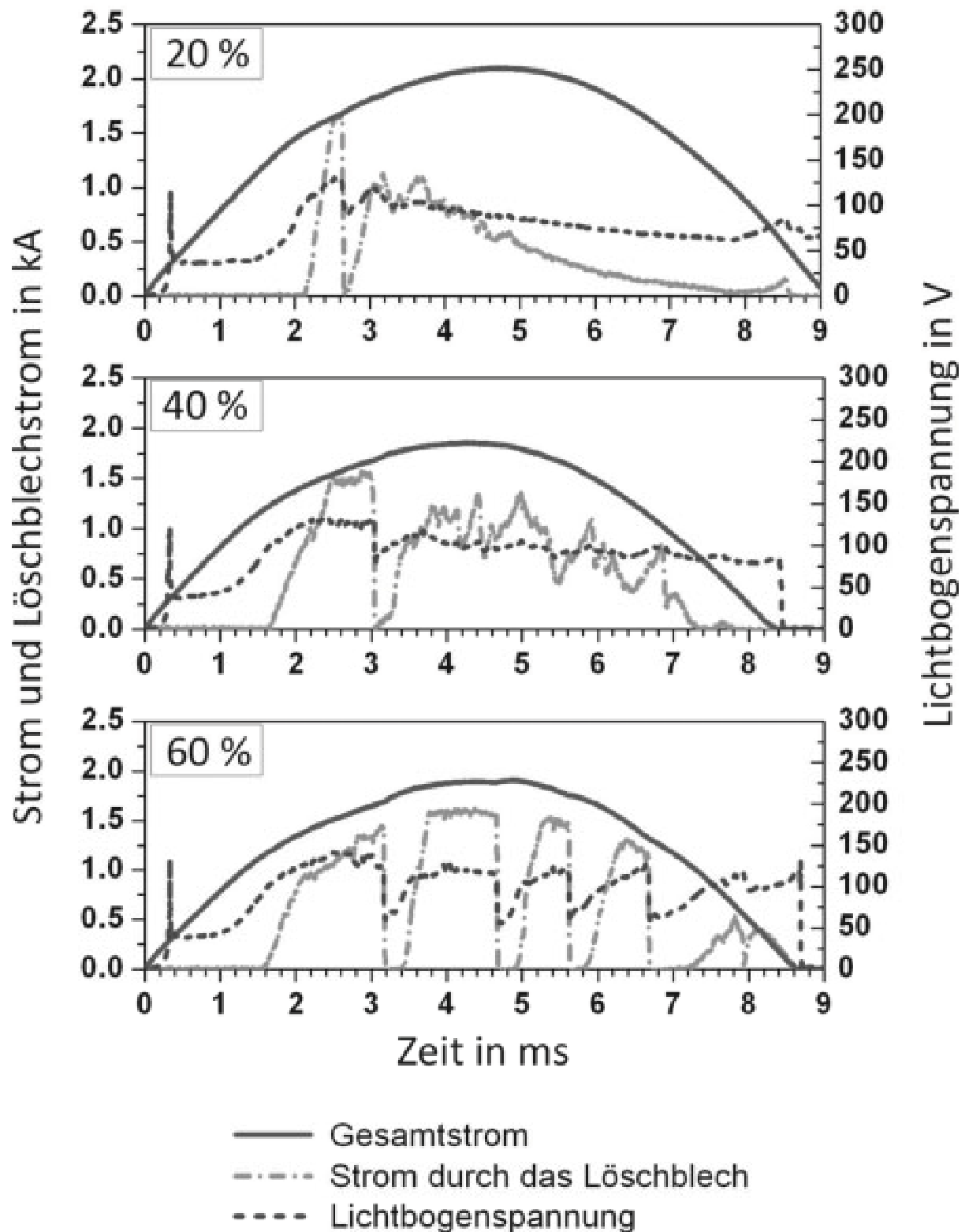
**Tabelle 3.1:** Spannungsanstieg bis zum Zeitpunkt der Fußpunktbildung auf dem Löschblech

### **3.4. Verlauf des Teilstromflusses durch das Löschblech**

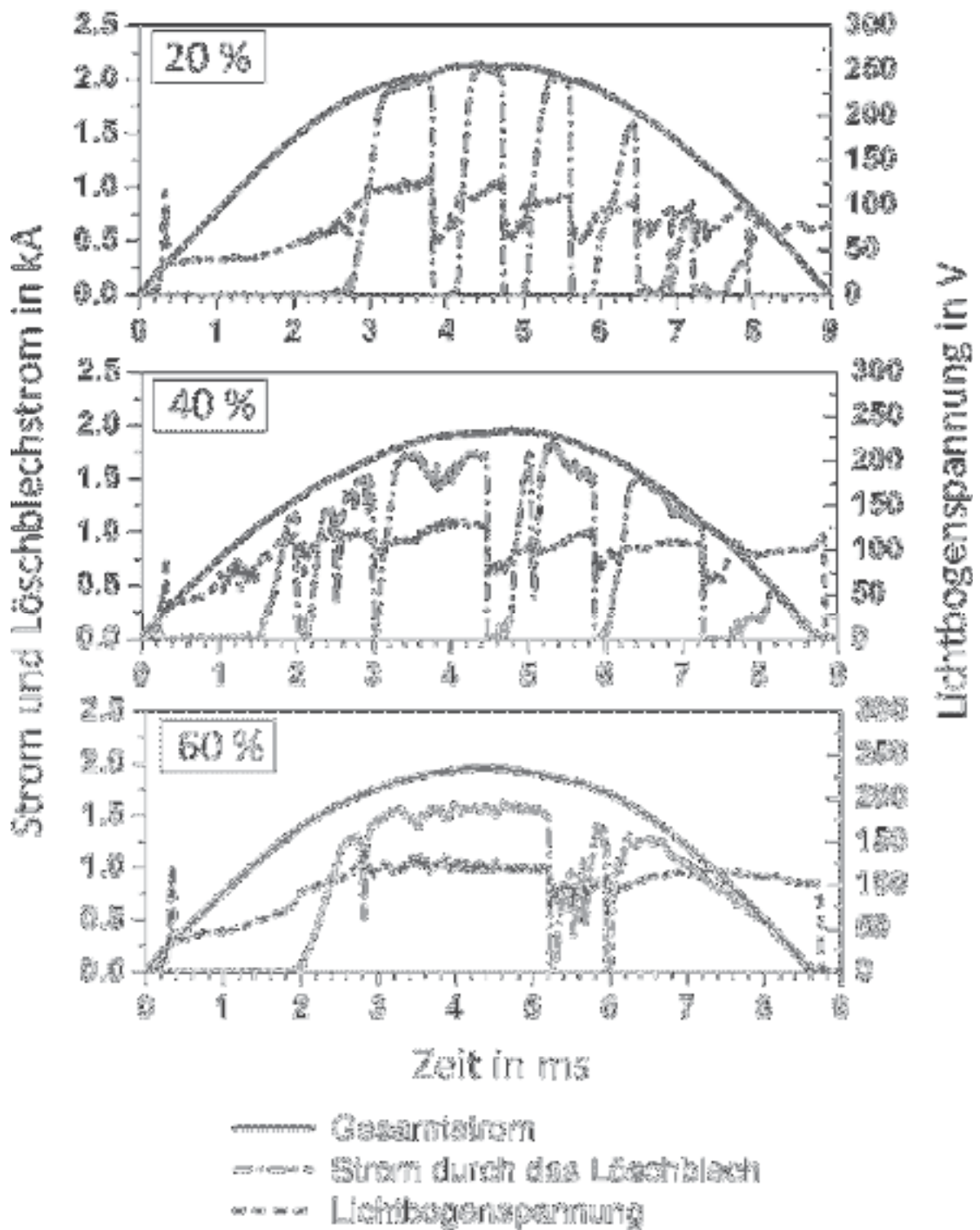
Der Verlauf des Teilstromflusses durch das Löschblech zeigt, dass der Zeitpunkt des Löschblechstromanstiegs in der 4 mm tiefen Kammer (bei gleich bleibender Verdämmung) von der Höhe des prospektiven Stromes abhängt: Je geringer die prospektive Stromstärke, desto später teilt sich der Lichtbogen am Löschblech auf. Des Weiteren hängt der Zeitpunkt des ersten Löschblechstromanstiegs in allen Kammertiefen bei geringen Stromstärken stärker von der Verdämmung ab, als bei hohen Stromstärken, wobei sich die zu 40 und zu 60 % geöffneten Kammervarianten nicht wesentlich voneinander unterscheiden. Hier besteht lediglich ein Unterschied zu den 20 % geöffneten Verdämmungen. Als eine Ursache hierfür sind die mit zunehmender Stromstärke früheren Zündzeitpunkte zu nennen. Der wohl dominierende Faktor ist hingegen das stärkere Eigenmagnetfeld, welches die Lichtbogenwanderung antreibt.

In den Versuchen mit hoher Stromstärke und Kammern geringen Volumens kommt es in den Kammern mit wenig Verdämmungsöffnung dazu, dass der Lichtbogen sich nicht vollständig aufteilt, sondern als breites (hohes) Band den gesamten divergierenden Kammerbereich ausfüllt, so dass nur ein Teilstrom durch das Löschblech fließt. In diesen Fällen wandert der Lichtbogen nicht in zwei Teillichtbögen unterteilt in Richtung der Verdämmung, sondern verharrt im unteren Kammerbereich. Das Oszillogramm einer solchen Messung ist in Bild 3.18 ganz oben dargestellt.

Je weiter nun die obere Verdämmung geöffnet ist, desto besser kann das Plasma vor der Bogenfront aus der Kammer ausströmen, wobei sich der Lichtbogen am Löschblech aufteilt und schnell bis unter die Verdämmung wandert. Hier strömt jedoch sehr viel heißes, leitfähiges Plasma aus dem Bogenrücken in Richtung des divergierenden Kammerbereiches, woraufhin es zu häufigen Rückzündungen kommt.



**Bild 3.18:** Gesamtstrom, Teilstrom durch das Löschblech und Lichtbogenenspannung aus Versuchen mit einem normalen Löschblech in einer 4 mm tiefen Kammer bei 2000 A und unterschiedlich weit geöffneter Verdämmung

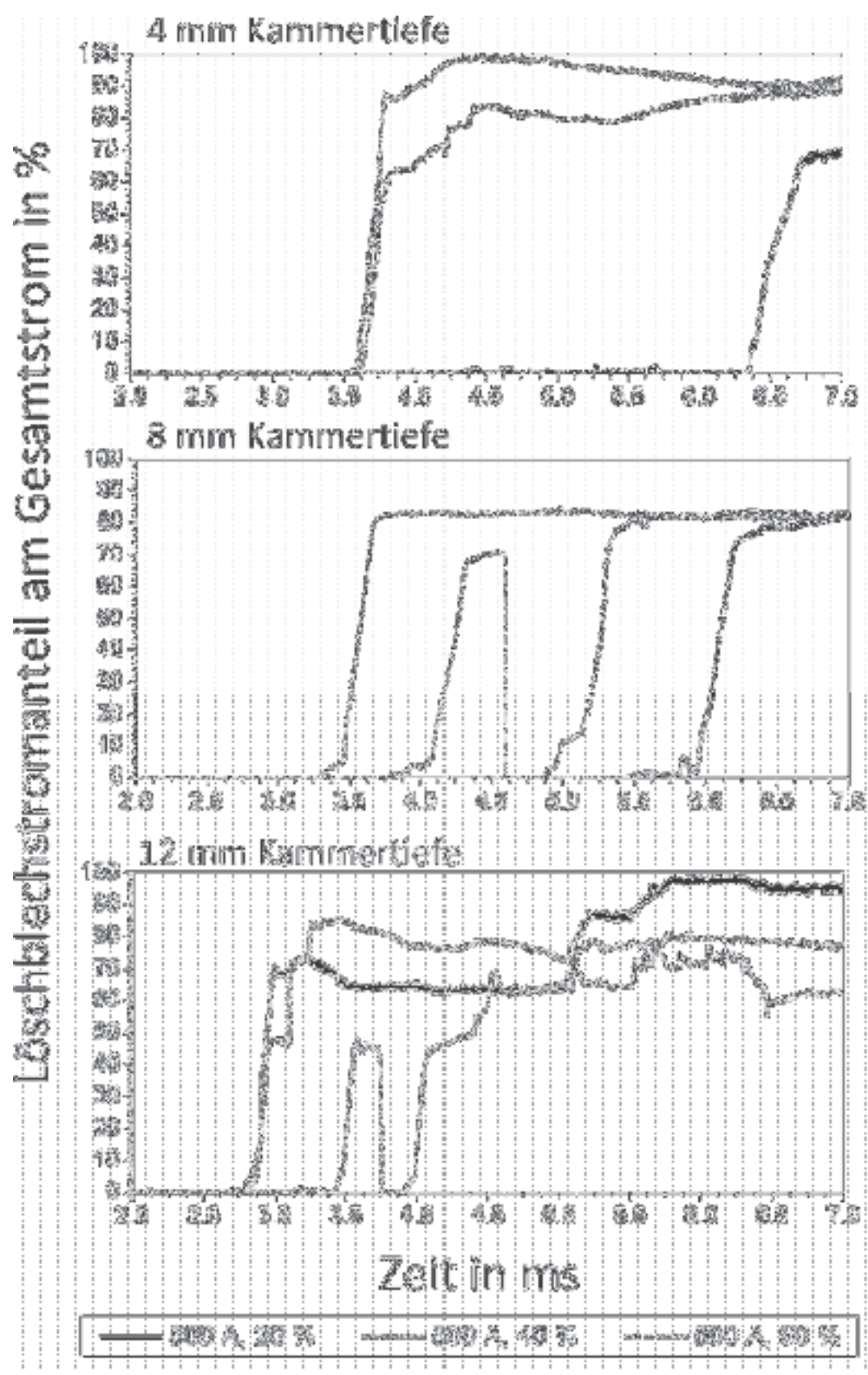


**Bild 3.19:** Gesamtstrom, Teilstrom durch das Löschblech und Lichtbogenspannung aus Versuchen mit einem normalen Löschblech in einer 8 mm tiefen Kammer bei 2000 A und unterschiedlich weit geöffneter Verdämmung

Eine Erhöhung der Kammertiefe auf 8 bzw. 12 mm zeigt in Bild 3.19, dass sich der Lichtbogen bei hohen Stromstärken auch bei geringerer Verdämmungsöffnung aufteilt und nicht unterhalb des Löschblechs verharrt. In tiefen Kammern kann die Lichtbogensäule besser umströmt werden, wodurch der Druck vor der Bogenfront durch Strömungen entlang der Kammerrück- und vorderwand in den Bogenrücken besser abgebaut und sich die Lichtbogensäule folglich ungehinderter durch den Kammerquerschnitt bewegen kann [Paul-97]. Eine weitere Ursache der nun stattfindenden Unterteilung findet sich in der Tatsache, dass der Lichtbogen bei Kammertiefen größer als 4 mm auch entlang der Seitenkanten der Laufschiene wandern kann, wodurch sich die „Mobilität“ des Lichtbogens durch rasche, diskontinuierliche Fußpunktwanderung erhöht. Es verbleibt hingegen eine hohe Anzahl von Rückzündungen, die sich zwar mit zunehmendem Öffnungsquerschnitt reduziert, während sich dafür jedoch der Anteil des Stromes, der außerhalb der Kammer oberhalb des Löschblechs fließt, erhöht.

Die Messungen mit Stromstärken von 500 oder 1000 A zeigen unabhängig von der Kammertiefe wenig bis gar keine Rückzündungen und einen sehr stetigen Löschblechstromverlauf.

Betrachtet man den Anteil des Löschblechstromes am Gesamtstrom anhand der rückzündungsärmeren Messungen bei geringeren Stromstärken, so zeigt sich in Bild 3.20, dass zu fast keinem Zeitpunkt der gesamte Strom durch das Löschblech fließt.

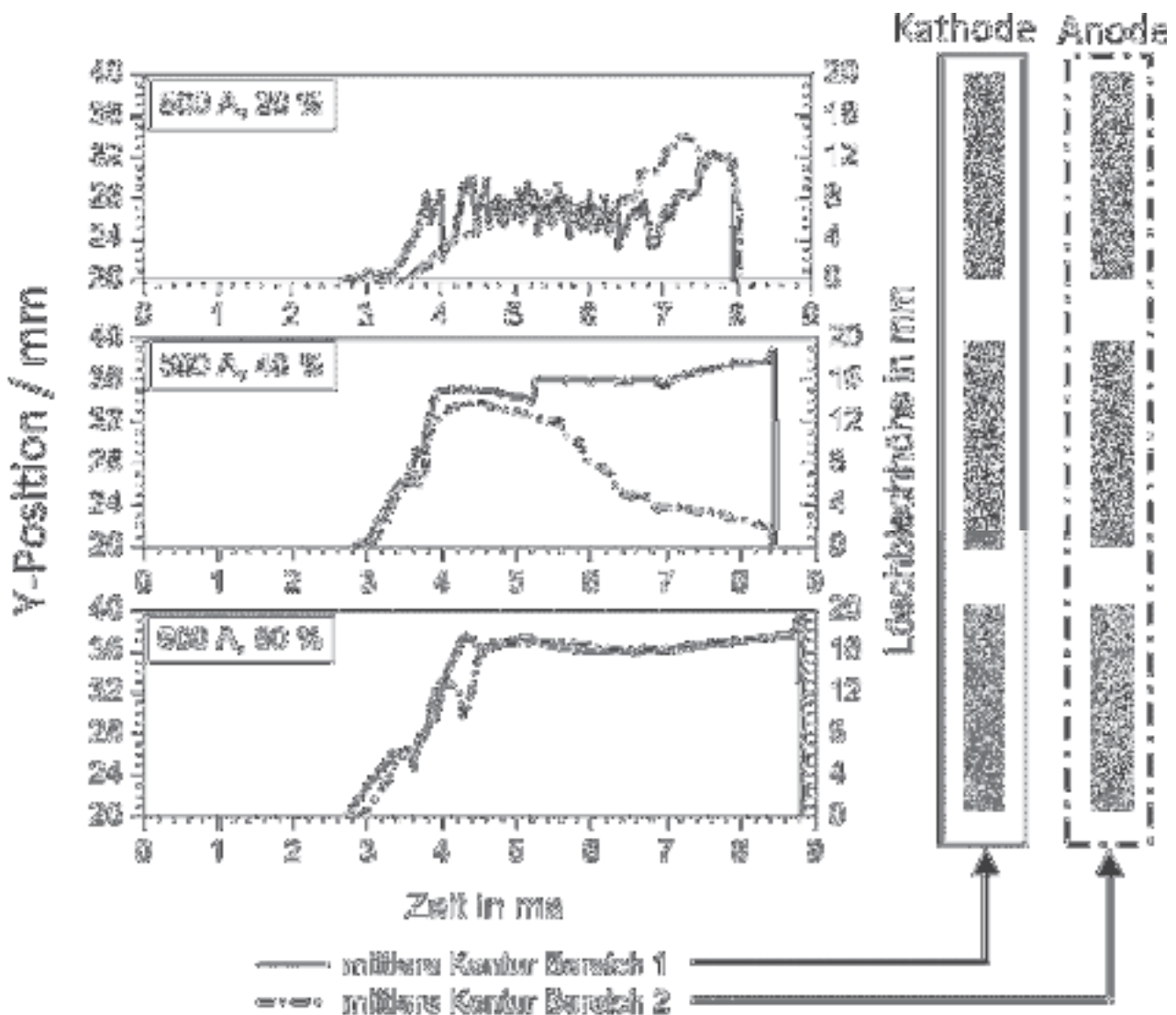


**Bild 3.20:** Anteil des Löschblechstromes am Gesamtstrom bei Messungen mit 500 A in unterschiedlichen Kammertiefen bei unterschiedlich weit geöffneter Verdämmung



### 3.5. Bogenwanderung zw. Laufschiene und Löschblech

Der Anstieg des mittleren Konturverlaufs in den Bereichen rechts und links des mittig in der Kammer liegenden Löschblechs geht mit der Schleifenbildung und der daran anschließenden Unterteilung des Lichtbogens einher. Der Verlauf der Konturlinien zeigt im Folgenden Zeitablauf sowohl die Lage und auch die Wanderung der beiden Teillichtbögen. Die dargestellten Verläufe entstammen Einzelmessungen und sind nicht polaritätsabhängig reproduzierbar.



**Bild 3.21:** Verlauf der mittleren Lichtbogenkontur (links) und Fotos der dazugehörigen Löschbleche (rechts) in den 500 A-Versuchen der 4 mm tiefen Kammer bei unterschiedlichem Öffnungsquerschnitt

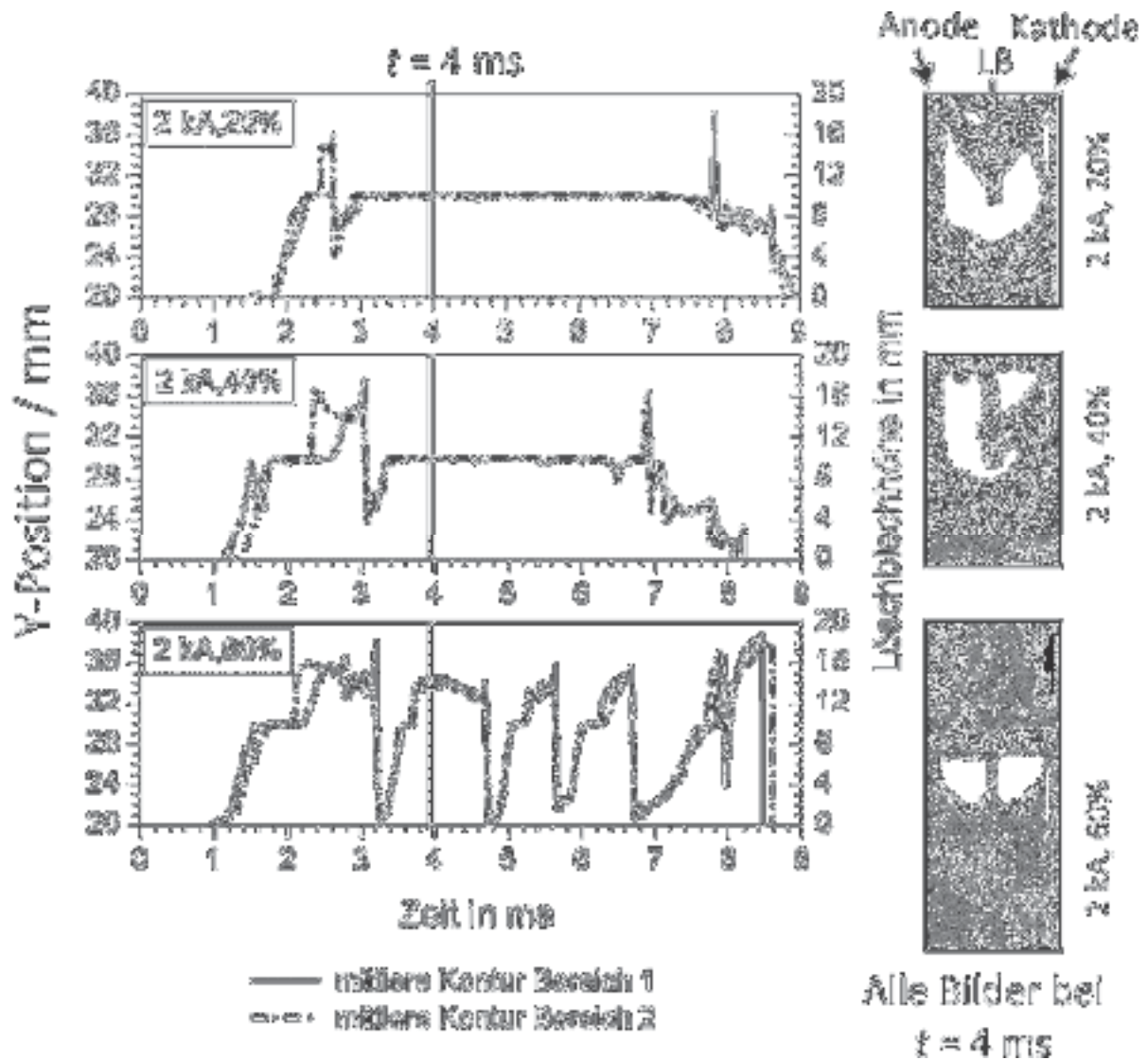
Im Bild 3.21 sind die Konturverläufe aus Messungen bei 500 A in einer 4 mm tiefen Kammer unterschiedlichen Öffnungsquerschnitts zusammen mit den dazugehörigen Löschblechen dargestellt. Die kathodische Löschblechseite liegt im untersuchten Kammerbereich 1, das heißt, der linke Teillichtbogen wandert mit seinem kathodischen Fallgebiet auf der Löschblechoberfläche. Die anodische Löschblechseite liegt im Bereich 2 und zeigt Spuren des anodischen Fußpunktes des rechten Teillichtbogens.

Die Umwölbung beginnt in den dargestellten Verläufen der ausgewerteten Bogenpositionen im Bereich 2,8 bis 3,0 ms nach der Lichtbogenzündung. Bei 20 % geöffneter Verdämmung zeigen die mittleren Konturen einen stark fluktuierenden Verlauf. Der Lichtbogen „steht“ vor der Löschblechunterkante und teilt sich erst ab 6,8 ms – erkennbar am gleichförmigen Anstieg der beiden Konturverläufe – auf. Je weiter die Verdämmung geöffnet ist, desto gleichförmiger wölbt sich der Lichtbogen um das Löschblech, und desto höher wandern die beiden Lichtbögen unter die Verdämmung.

Eine Erhöhung der Stromstärke in der 4 mm tiefen Kammer führt dazu, dass das Kammervolumen sehr stark mit Plasma „angefüllt“ wird. Der Lichtbogen ist in den Filmaufnahmen als Band hoher vertikaler Ausdehnung in der Kammer zu erkennen. Insbesondere bei gering geöffneter Verdämmung kann nicht mehr viel Plasma (an der Bogenfront) durch die Öffnungen in der Verdämmung entweichen. Eine Erhöhung des Ausblasquerschnitts verringert den Plasmastau in der Kammer und führt dazu, dass sich der Lichtbogen rasch aufteilt, und die beiden Teillichtbögen entlang des Löschblechs bis unter die Verdämmung wandern.

Die Diagramme in Bild 3.22 zeigen den Verlauf der Teillichtbogenkonturen in Versuchen mit hoher Stromstärke und kleinem Kammervolumen. Die Filmbilder zeigen die jeweilige Lage des Lichtbogens bzw. der Teillichtbögen zum Zeitpunkt 4 ms. Der sehr glatte und fast identische Verlauf der Konturen auf halber Löschblechhöhe deutet auf eine hohe vertikale Lichtbogensausdehnung hin. Einzelne Fußpunkte – sowohl an den Laufschiene als auch auf dem Löschblech sind in den Filmaufnahmen sehr schwer, wenn nicht sogar gar nicht, zu erkennen. Die Kammer ist so stark mit Plasma angefüllt, dass keine klar abgrenzbare Bogensäule, sondern vielmehr ein breites und hohes Plasmaband vorliegt. Die jeweiligen Oszillogramme zeigen, dass während des gesamten Zeitraumes nur ein Teilstrom durch das

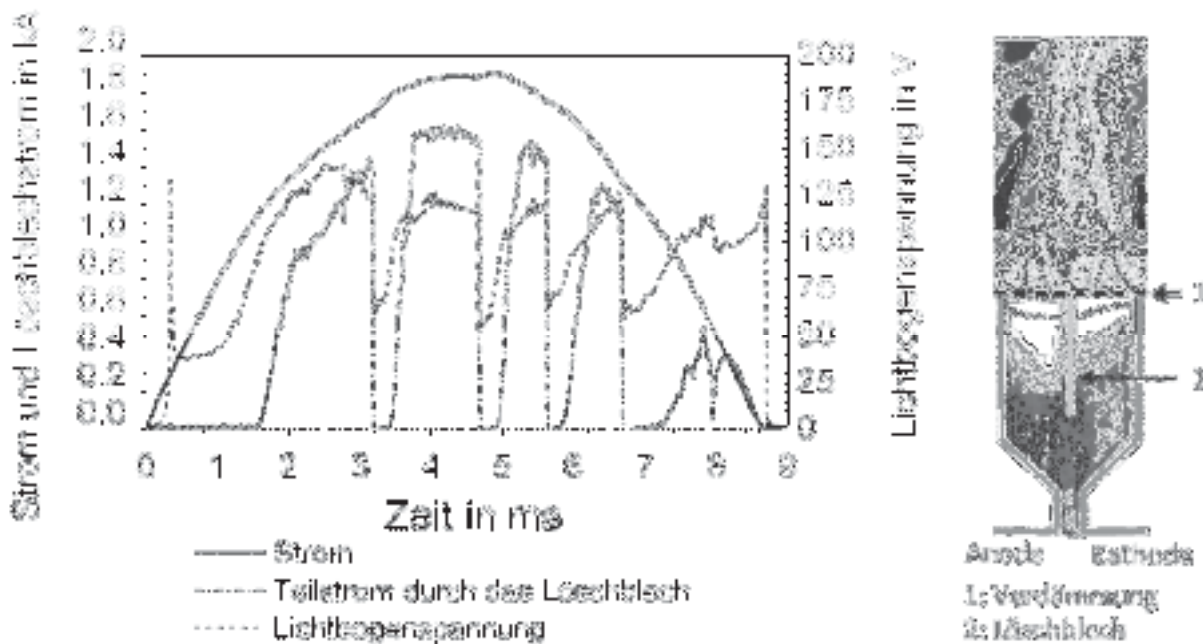
Löschblech fließt. Die Schnellfilmaufnahmen (Bild 3.22, rechts) lassen erkennen, dass der Differenzanteil zum Gesamtstrom entweder innerhalb der Kammer unterhalb des Löschblechs oder außerhalb der Kammer am Löschblech vorbei fließt.



**Bild 3.22:** Verlauf der mittleren Lichtbogenkontur (links) und Teilbild der Schnellfilmaufnahme zum Zeitpunkt  $t = 4 \text{ ms}$  (rechts) in den 2000 A-Versuchen der 4 mm tiefen Kammer bei unterschiedlichem Öffnungsquerschnitt

Bei den Einbrüchen im Konturverlauf der Messung mit 2000 A und zu 60 % geöffneter Verdämmung handelt es sich um Rückzündungen im unteren, divergierenden Kammerbereich. Hierzu ist der Verlauf des Teilstroms durch das

Löschblech sowie die Lichtbogenspannung des Versuches im Oszillogramm im Bild 3.23 dargestellt.

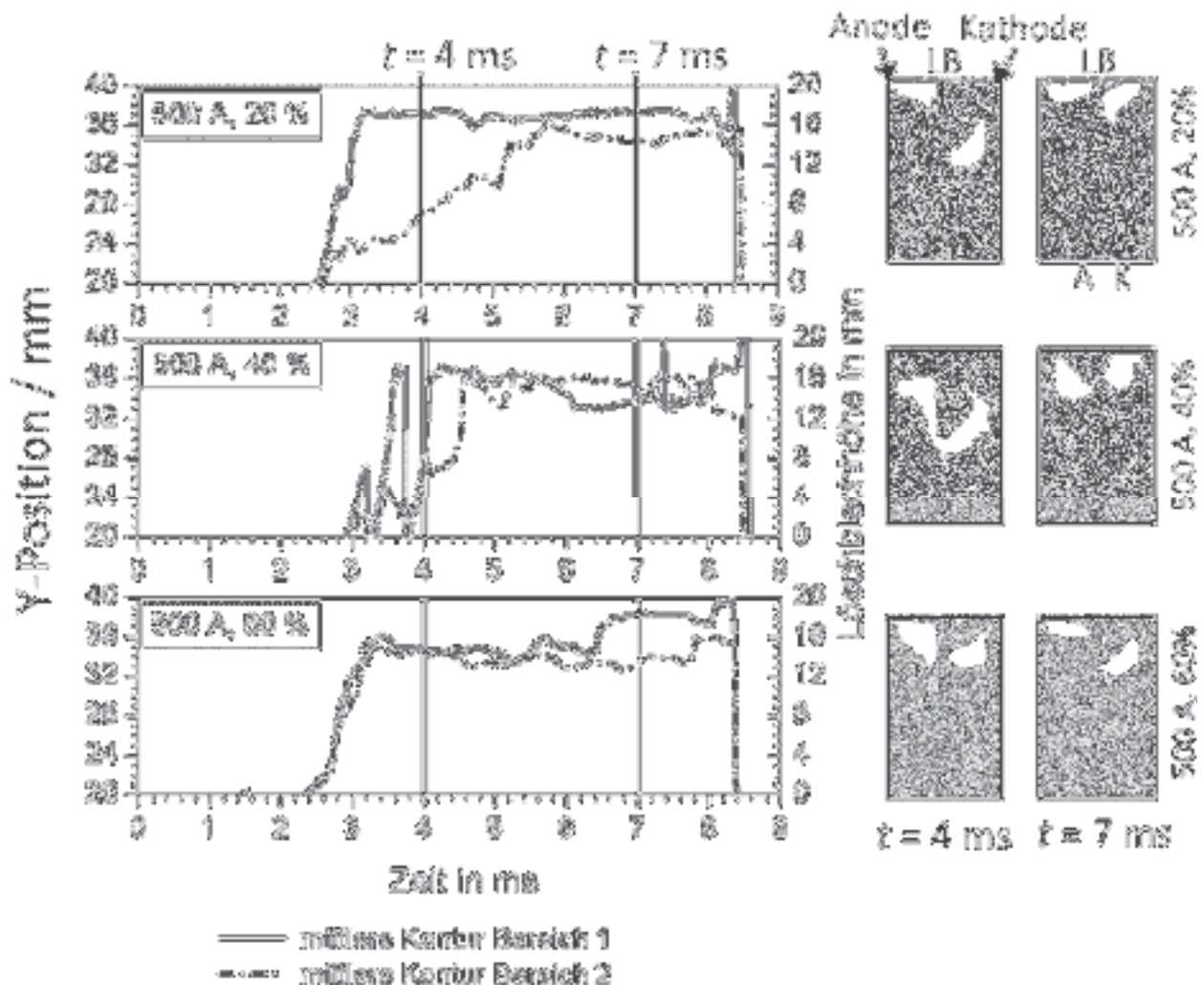


**Bild 3.23:** Verlauf des Gesamtstroms und des Teilstroms durch das Löschblech in einem Versuch mit 2000 A in der 4 mm tiefen Kammer bei 60 % geöffneter Verdämmung (links) und Bild einer Schnellfilmaufnahme zu einem Zeitpunkt des Stromflusses durch das Löschblech

Die Rückzündungen werden durch das stetige Anfüllen des Raumes zwischen der Laufschiene und dem Löschblech mit Plasma eingeleitet. Die Lichtbogenpotential bricht während der Rückzündung auf etwa 60 bis 70 V ein, während der Strom durch das Löschblech ganz bis auf 0 A zurückgeht. Den Rückzündungen folgen jeweils wieder Lichtbogenunterteilungen, bei denen sich die Fußpunkte auf dem Löschblech (und den Laufschiene) an derselben Stelle ausbilden, an der sie zuvor verloschen sind. Dies zeigen die Filmaufnahmen und die mittleren Konturverläufe. Während der Unterteilungsphasen fließt fast nie der gesamte Strom durchs Löschblech. Ein Teil des Stromes fließt oberhalb der Verdämmung außerhalb der Kammer am Löschblech vorbei. Solch ein Strompfad ist im Bild 3.23 rechts anhand eines Teilbildes einer Filmaufnahme markiert.

Eine Erhöhung der Kammertiefe auf 12 mm (Bild 3.24) zeigt bei den Messungen mit 500 A ein gutes Aufteilungsverhalten. Der rechte Teillichtbogen wandert dem linken im Versuch mit 20 und 40 % geöffneter Verdämmung verzögert nach. Insgesamt zeigen die Verläufe einen relativ ruhigen, kaum fluktuierenden Verlauf. Die Schleife

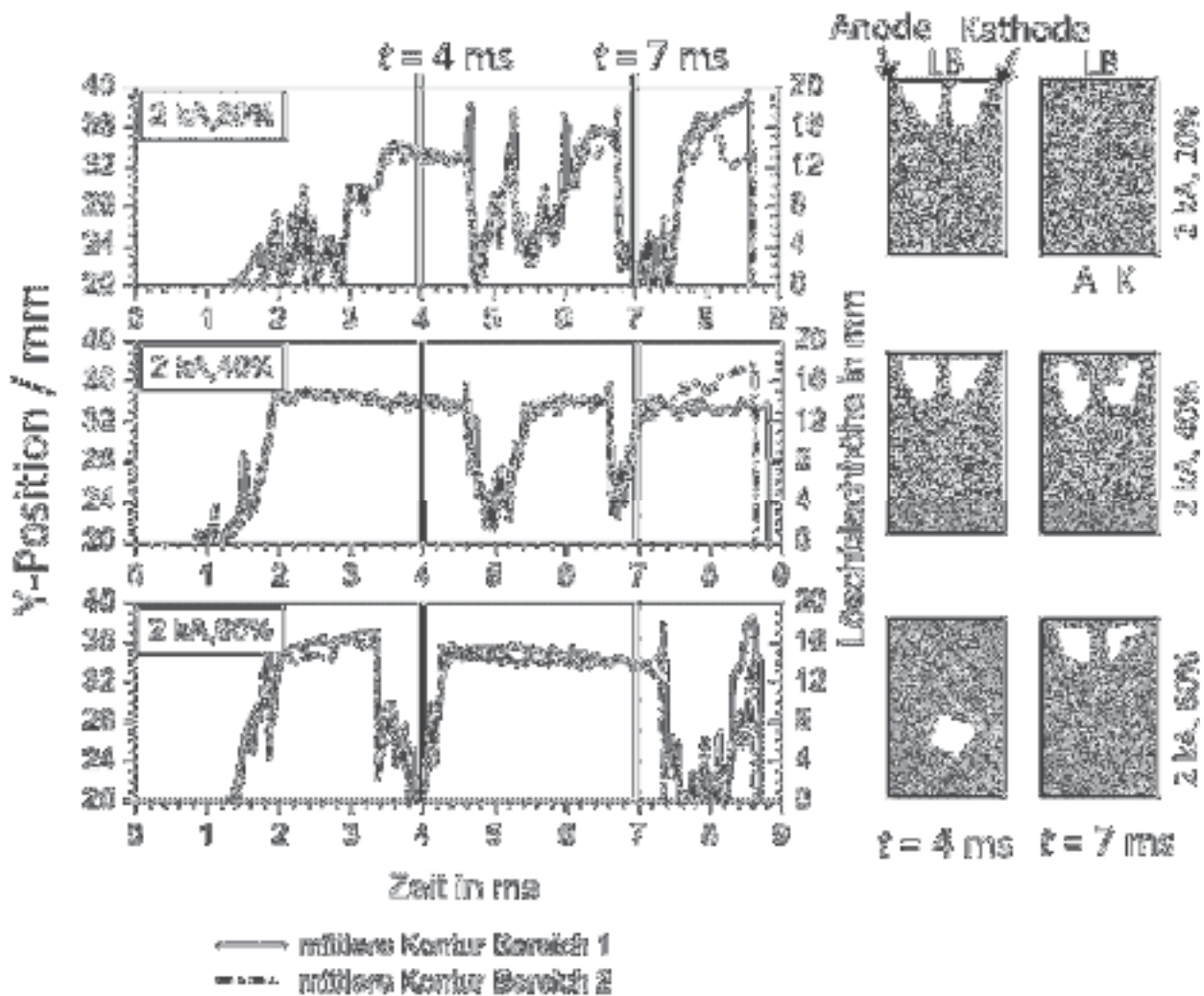
legt sich dabei sehr weit um das Löschblech herum und bildet die Fußpunkte mit zunehmender Verdämmungsöffnung weiter oberhalb der Löschblechunterkante.



**Bild 3.24:** Verlauf der mittleren Lichtbogenkontur (links) und Teilbilder der Schnellfilmaufnahme zum Zeitpunkt  $t = 4$  und  $7$  ms (rechts) in den 500 A-Versuchen der 12 mm tiefen Kammer bei unterschiedlichem Öffnungsquerschnitt

Eine Erhöhung der Stromstärke auf 2000 A (Bild 3.25) zeigt, dass sich der Lichtbogen in der 12 mm tiefen Kammer ausnahmslos aufteilt. Die beiden Teillichtbögen brennen direkt unter der Verdämmung und schmelzen die Löschblechoberflächen sehr stark auf. Dies erzeugt hoch leitfähiges Plasma, welches dem Bereich zwischen Löschblech und Laufschiene langsam in Richtung Kammerunterseite anfüllt. Dies ist an den leicht fallenden Konturverläufen zu erkennen. Das Anfüllen des oberen Kammerbereiches mit Plasma führt in den 12 mm tiefen Kammern zu Strömungen und Verwirbelungen entlang der Rück- und

Vorderseite in Richtung des unteren Kammerbereiches [Paul-97]. Hierdurch kommt es zu Erwärmung und Erhöhung der Leitfähigkeit im unteren divergierenden Kammerbereich, wodurch mehrfach Rückzündungen mit anschließender erneuter Bogenunterteilung eingeleitet werden.



**Bild 3.25:** Verlauf der mittleren Lichtbogenkontur (links) und Teilbilder der Schnellfilmaufnahme zum Zeitpunkt  $t = 4$  und  $7$  ms (rechts) in den 2000 A-Versuchen der 12 mm tiefen Kammer bei unterschiedlichem Öffnungsquerschnitt

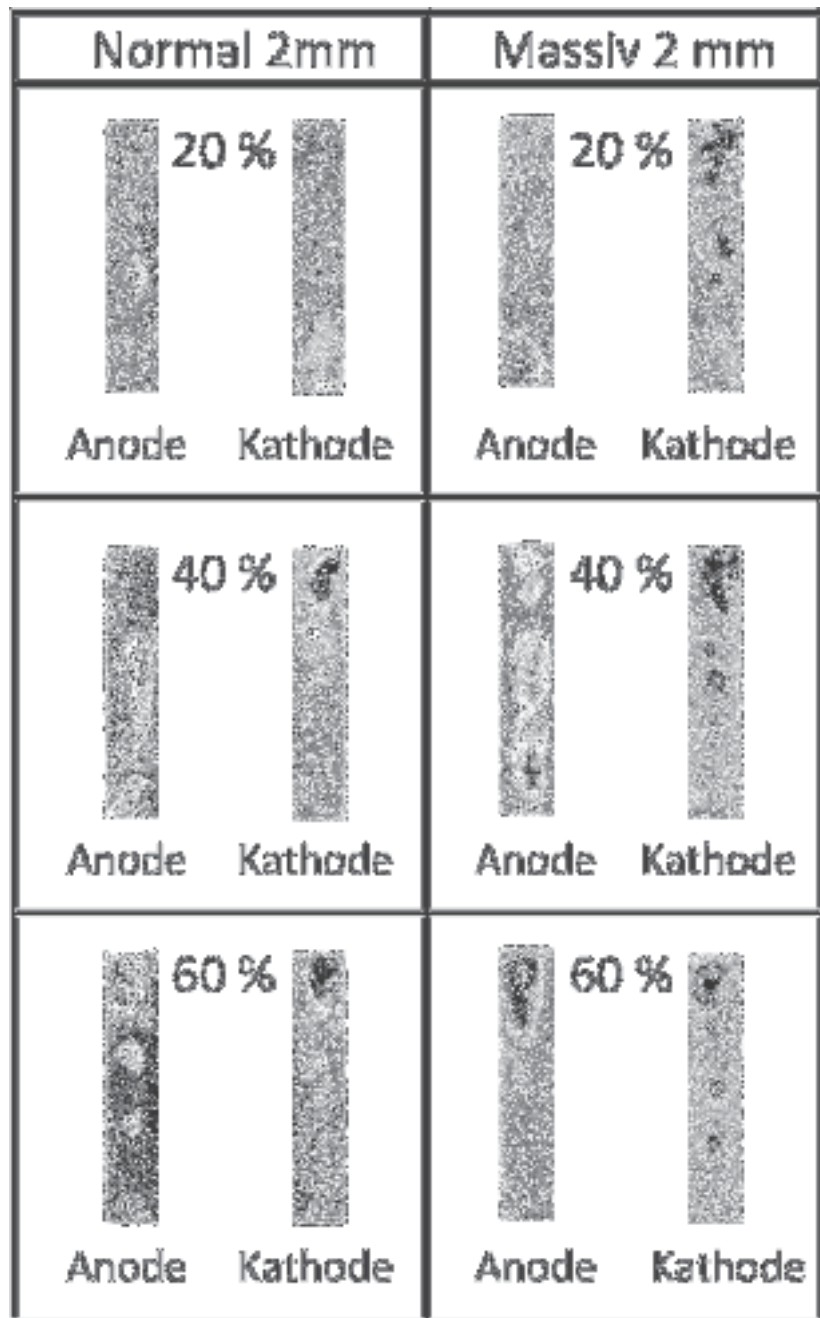
Die Konturverläufe der beiden Teillichtbögen ähneln sich sehr stark und liegen über weite Zeitbereiche fast direkt übereinander. Dies liegt an dem sehr gleichmäßig stark mit Plasma gefüllten Kammervolumen, wodurch es zu einer gleichförmigen „Umwölbung“ des Löschblechs mit Plasma kommt.

### 3.6. Aufschmelzung der Löschblechoberflächen

#### 3.6.1. 4 mm Kammertiefe

Im Bild 3.26 sind die eingescannten Oberflächen normaler und massiver Löschbleche aus jeweils einem Versuche in einer 4 mm tiefen, 40 mm hohen Kammer bei einer Stromstärke von 500 A dargestellt.

Der direkte Vergleich zeigt, dass die Größe, die Form und der Ort der Aufschmelzungen der beiden Löschblechtypen sich nur unwesentlich unterscheiden. Die Spuren, die der Lichtbogen auf der Anodenseite der massiven Löschbleche hinterlässt unterscheiden sich in der Größe und der Lage auf dem Löschblech kaum von denen auf den normalen Löschblechen. Der einzige Unterschied, der festgestellt werden kann ist, dass die Aufschmelzungen auf den massiven Blechen weniger tief und punktuell nicht so stark erscheinen. Sie sind eher großflächiger und nicht so tief in das Blech gebrannt. Die Leistungsabfuhr aus



**Bild 3.26:** Oberflächen normaler und 2 mm dicker massiver Löschbleche der 4 mm tiefen Kammer nach jeweils einer Schaltung mit 500 A

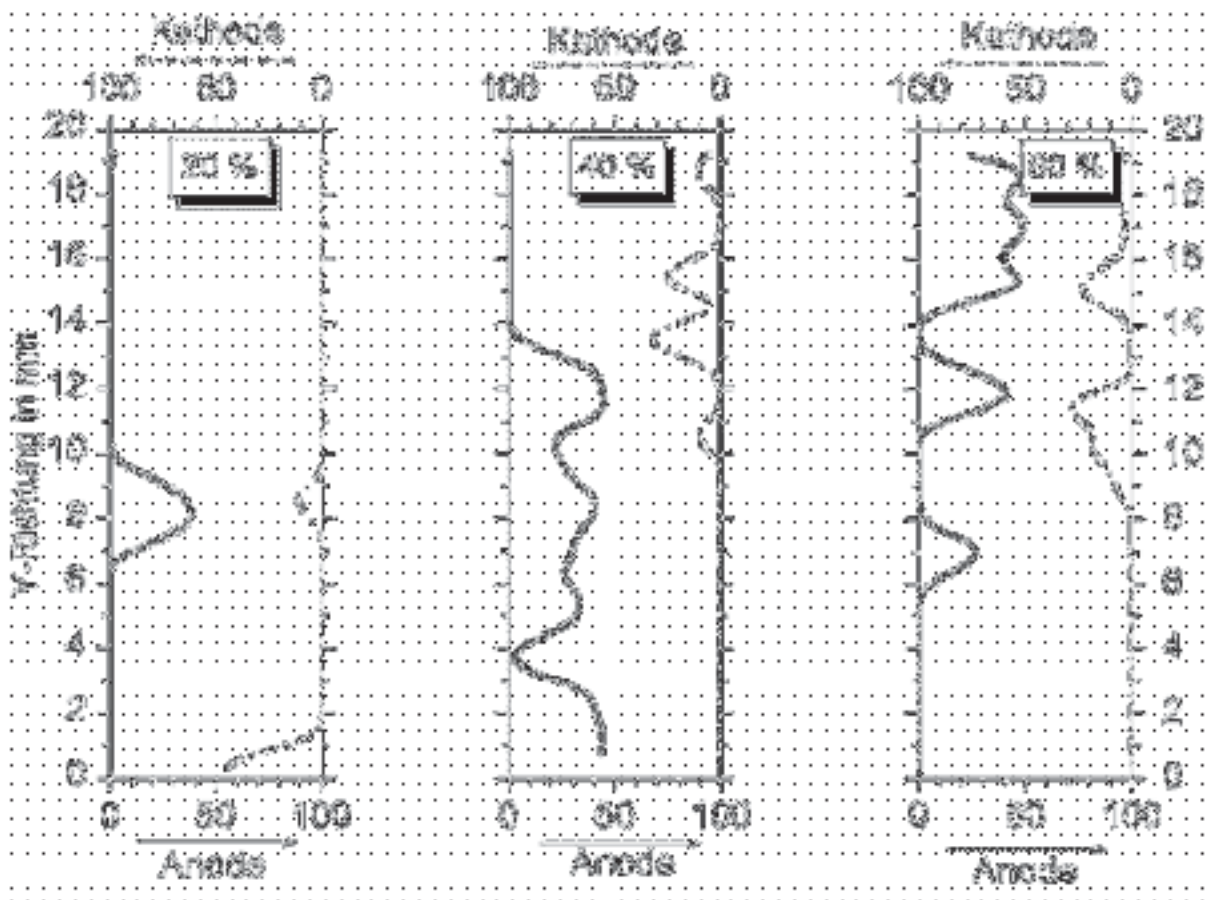
dem Fußpunktgebiet in das Löschblech geschieht überwiegend durch Wärmeleitung, wodurch die Abfuhr in das 2 mm dicke Blechmaterial aufgrund des größeren Materialvolumens besser abläuft als in das nur 0,5 mm dicke Material des präparierten Löschblechs [Car-59]. Die kathodischen Fußpunktspuren auf den normalen und den massiven Löschblechen unterscheiden sich nicht in Form und Größe. Hier ist der Energieeintrag in die kontrahierten Fußpunkte (Kathodenfallgebiete) so hoch, dass auch die 2 mm dicken Löschbleche punktuell sehr stark angeschmolzen werden. Die präparierten Löschbleche zeigen demnach nur einen geringen Einfluss auf die Aufschmelzungen der Löschblechanode. Die Form, der Ort und die Teillichtbogenwanderung unterscheiden sich nicht von denen der massiven Bleche.

Im Bild 3.26 zeigt sich, dass sich die Orte stärkerer Aufschmelzungen mit steigender Verdämmungsöffnung in Richtung Kammeroberseite verlagern, da die Lichtbogenwanderung durch das vor der Lichtbogenfront rascher abströmende Plasma begünstigt wird. Die Fußpunktspuren auf den Löschblechkathoden zeigen durch die regelmäßigen, gleichförmig kleinen punktuellen Aufschmelzungen, dass sich der Lichtbogen bei weit geöffneter Verdämmung schnell durch Sprünge entlang der Oberfläche bewegt.

Um die vertikale Lage der Aufschmelzungen von Anoden- und Kathodenseite eines Löschblechs zu vergleichen, sind die „Aufschmelzungskurven“ der beiden Löschblechseiten in einem Diagramm zusammengefügt und können somit direkt „gegenübergestellt“ werden. Das Bild 3.27 zeigt ein solches Verlaufsdiagramm entlang der Löschblechhöhe für die normalen Löschbleche des Bildes 3.26.

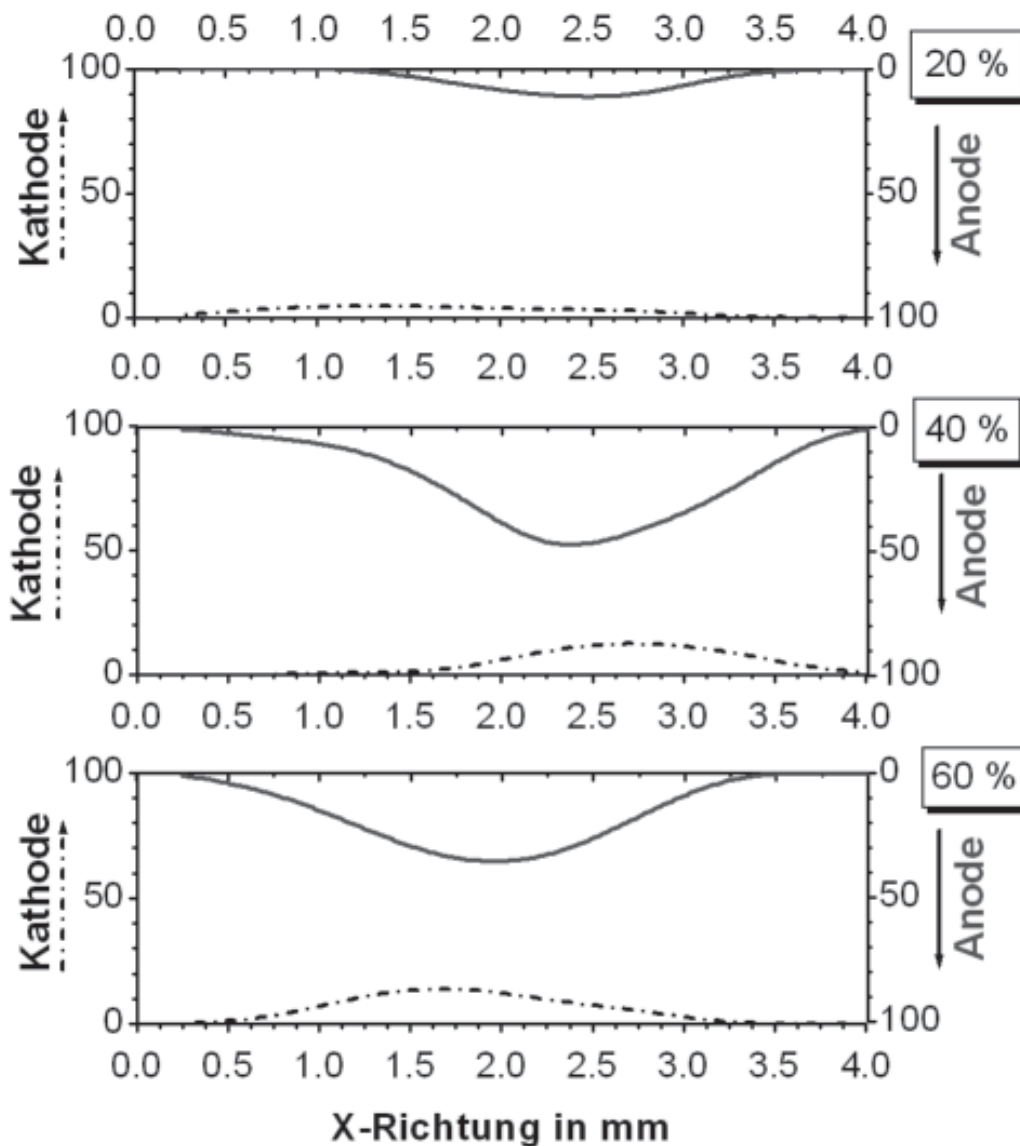
Während es bei gering geöffneter Verdämmung nur zu punktuellen Aufschmelzungen kommt, zeigen sich bei weiter geöffneter Verdämmung größere Bereiche von Aufschmelzungen. Es ist gut zu erkennen, dass sich einige Maxima der Aufschmelzungen auf den Löschblechen auf etwa gleicher Löschblechhöhe gegenüberstehen. Andere Maxima liegen entlang der Löschblechhöhe verteilt. Hieraus lassen sich jedoch keine Aussagen über die jeweilige Lage der Fußpunkte zu bestimmten Zeitpunkten treffen, da die Darstellung der aufgeschmolzenen Fläche dem Gesamtzustand nach einer Schaltung widerspiegelt.





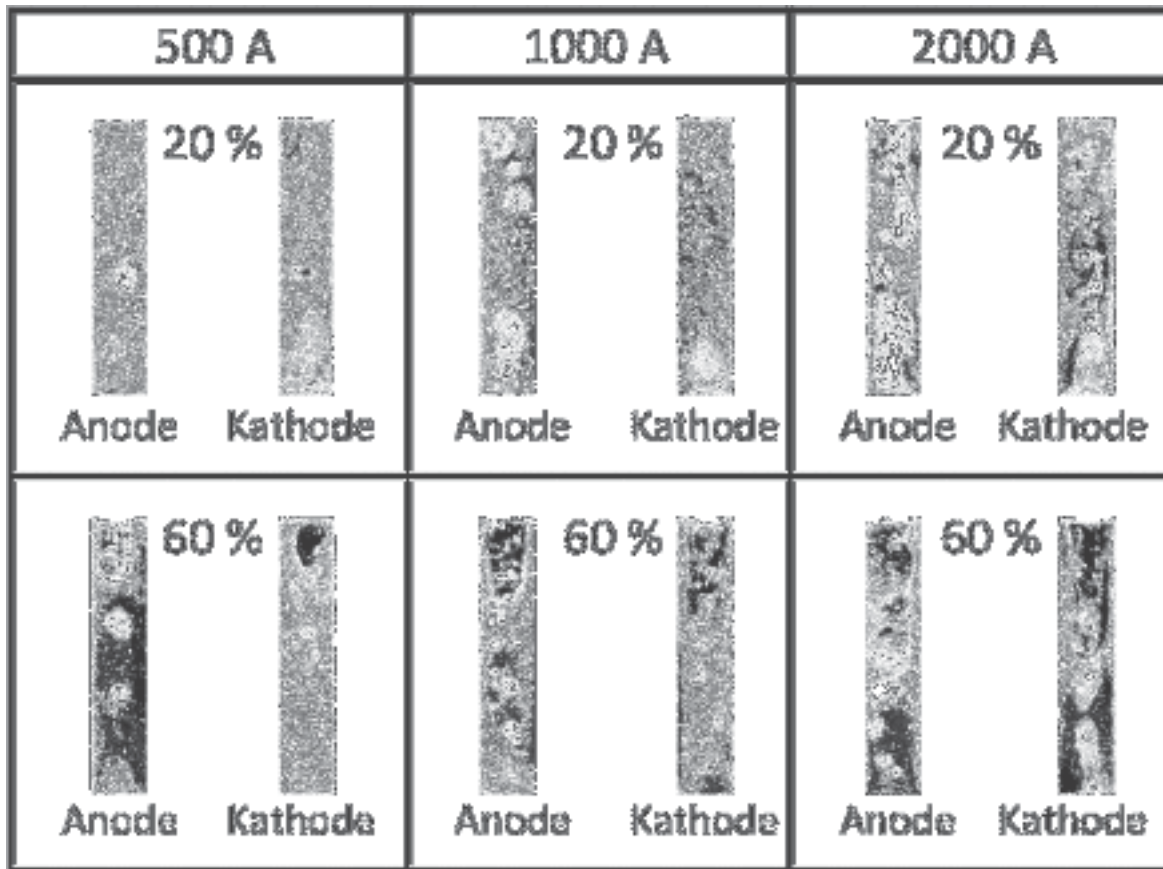
**Bild 3.27:** Aufschmelzungen der Löschblechoberflächen entlang der Löschblechhöhe, 4 mm normale Löschbleche aus Bild 3.26, 500 A, beide Löschblechseiten

Die Betrachtung der Aufschmelzungen entlang der Löschblechbreite ergeben sich die im Bild 3.28 dargestellten Kurvenverläufe. Es zeigen sich in der 4 mm tiefen Kammer relativ gleichförmig verteilte Aufschmelzungen mit Schwerpunkt auf etwa der halben Kammertiefe. Dies ist auch nicht anders zu erwarten: Die Laufschienenbreite entspricht mit 4 mm exakt der Löschblechbreite, weshalb die Teillichtbögen relativ mittig auf den Laufschienen und dem Löschblech wandern. Schwerpunkte rechts oder links der Laufschienenkante bilden sich daher nicht aus. Je weiter die obere Verdämmung geöffnet ist, desto gleichförmiger liegen die Anschmelzungen entlang der Löschblechbreite verteilt. Diese Verteilung stellt sich ein, da der Lichtbogen relativ lange unterhalb der Verdämmung auf dem Löschblech brennt, so dass er diesen oberen Blechbereich über die gesamte Breite anschmilzt.



**Bild 3.28:** Aufschmelzungen der Löschblechoberflächen entlang der Löschblechbreite (Kammertiefe), 4 mm Löschblech aus Bild 3.26, 500 A, beide Löschblechseiten

Eine Erhöhung der Stromstärke führt dazu, dass die aufgeschmolzenen Flächenanteile ansteigen und sich gleichmäßiger entlang der Löschblechhöhe und auch –breite verteilen. So zeigen die Blechoberflächen der 2000 A Schaltungen im Bild 3.29 sehr großflächige Schmelzgebiete, welche sich zum einen durch den höheren Energieeintrag in die Fußpunkte, zum anderen durch den großflächigeren Kontakt des Plasmas mit dem Löschblech ergeben. Die rasche Ausbildung mehrerer paralleler Fußpunkte entlang der gesamten Löschblechhöhe „vergleichmäßig“ die Aufschmelzungen auf der Blechoberfläche.

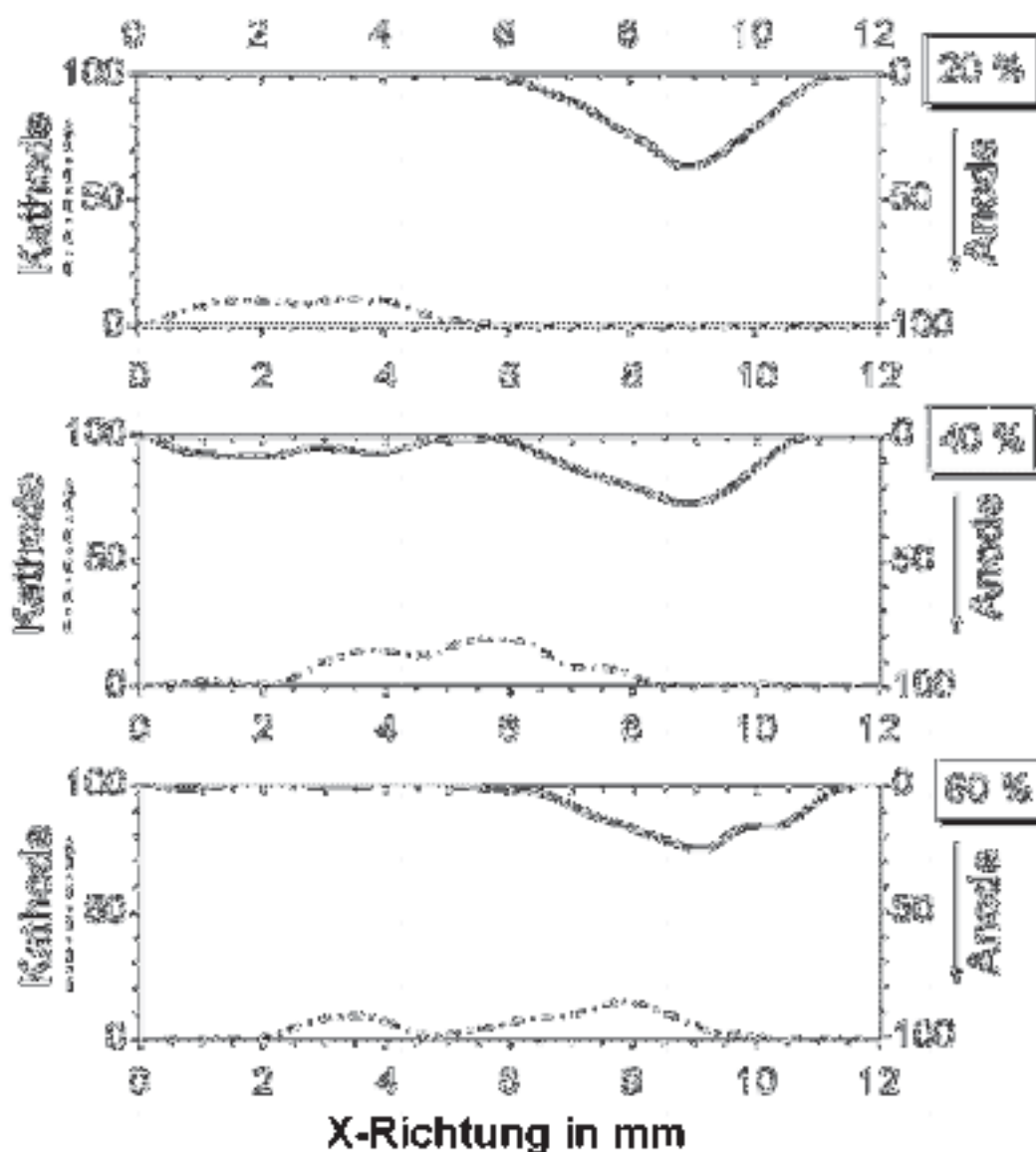


**Bild 3.29:** Aufschmelzungen der Löschblechoberflächen bei unterschiedlicher Stromstärke, 4 mm Löschbleche, 20 und 60 % geöffnete Verdämmung

### 3.6.2. 8 und 12 mm Kammertiefe

Die Löschblechoberflächen aus Schaltungen in der 8 mm und in der 12 mm tiefen Kammer sind in den Bildern A1 – A4 im Anhang dargestellt.

Die Löschbleche in der 8 mm tiefen Kammer zeigen teilweise Aufschmelzungsspuren entlang der Kammerrückwand. Betrachtet man sich den Aufschmelzungsverlauf entlang der Kammertiefe (Löschblechbreite, X-Richtung) in der 12 mm tiefen Kammer im Bild 3.30, so ist auch hier eine Verlagerung des „Schmelzschwerpunktes“ in Richtung der Kammerrückwand bzw. Kammervorderwand zu erkennen. Es ist jedoch keine bevorzugte Richtung herauszustellen.



**Bild 3.30:** Aufschmelzungen der Löschblechoberflächen entlang der Löschblechbreite (Kammertiefe,) 12 mm Löschblech, 500 A, beide Löschblechseiten

Die Beobachtung, dass der Lichtbogen nicht mittig auf dem Löschblech brennt/wandert hat folgende Ursachen:

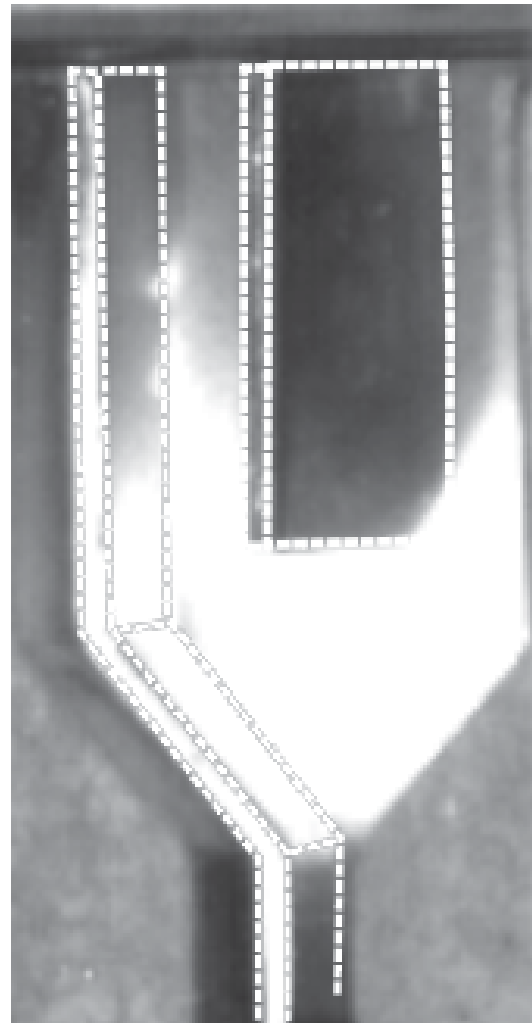
Zunächst wandert der Lichtbogen auf den Laufschiene bevorzugt an den Seitenkanten, und nicht auf den Schienenflächen. Dies ist in dem Teilbild einer Schnellfilmaufnahme im Bild 3.31 zu erkennen. Das mittig liegende Löschblech und die im Hintergrund liegende anodische Laufschiene sind gestrichelt umrandet. Die Laufschiene zeigt zwei sich ausbildende Fußpunkte an der rechten Kante. Der Lichtbogen brennt vorwiegend an der hinteren Laufschiene, wodurch die

Schleife um das Löschblech an der Kammerrückwand liegt. Im Bild 10.6 ist die Umwölbung eines Lichtbogens entlang der Kammervorderseite zu beobachten.

Als Ursache für das bevorzugte Ansetzen von Fußpunkten auf Elektrodenkanten nennt Sudhölter [Sud-75], [Sud-76a], [Sud-76b] das von der Elektrodenmitte zum Rand hin schwächer werdende Magnetfeld, und die reduzierte Strömungsgeschwindigkeit im Randbereich der Kammer. Ferner sind die Verhältnisse zur Feldemission und zur Thermofeldemission, den notwendig Mechanismen zur kathodischen Fußpunktbildung (Kapitel 1.3.2), am relativ scharfkantigen Elektrodenrand sehr günstig, da hier vermehrt Gitterfehlstellen oder Mikrospitzen vorliegen [Paul-97],[Lin-87].

Die Wanderung des Lichtbogens auf den Laufschienecken führt zu einer Schräglage des Lichtbogens innerhalb der Schaltkammer, wodurch der Lichtbogen nicht mittig auf dem Löschblech „ansetzt“.

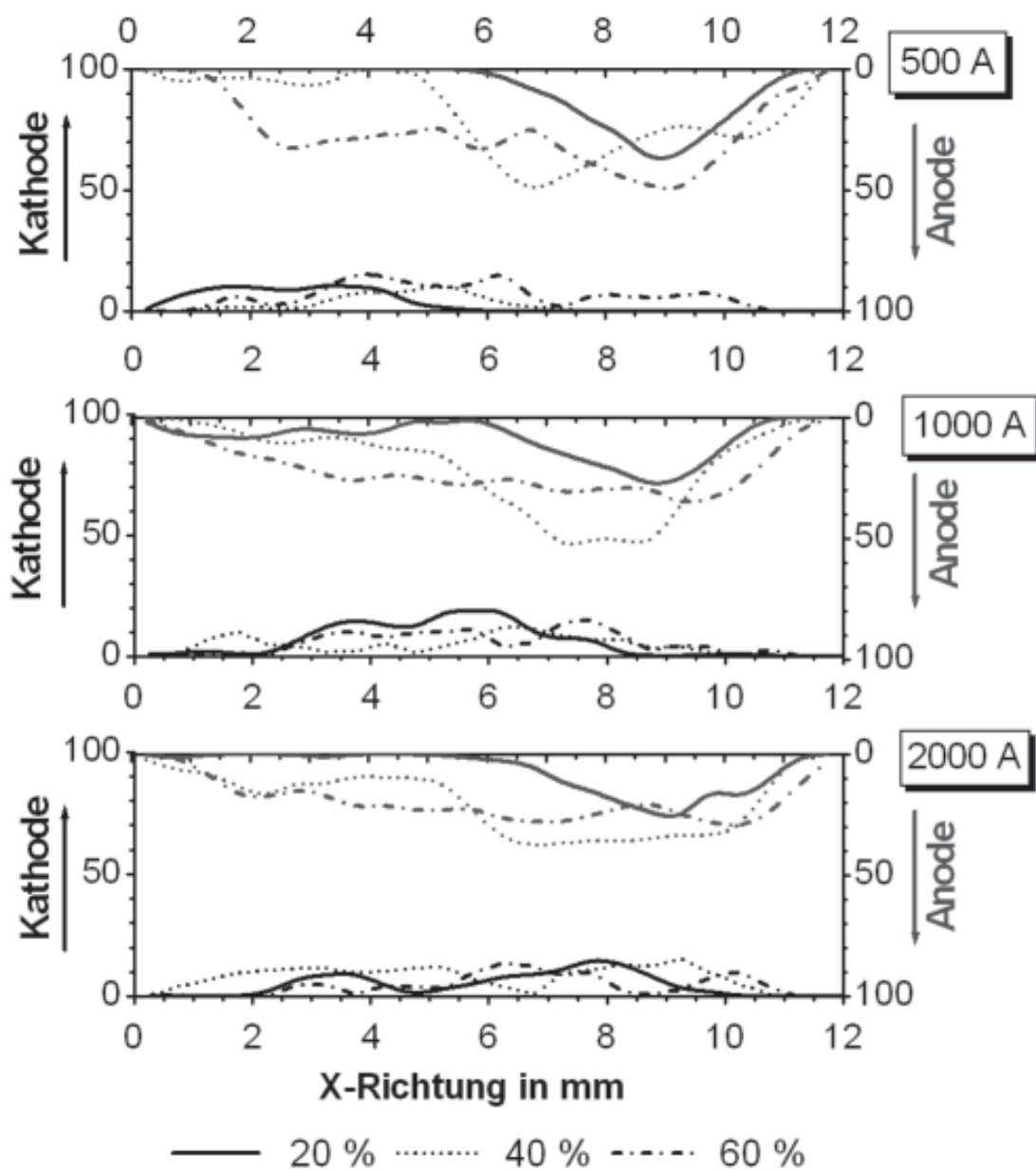
Nach der Ausbildung von Fußpunkten auf dem Löschblech wandern diese entsprechend ihrer Lage zur Symmetrieline unterschiedlich: Ein Fußpunkt neben der Symmetrielinie wird ungleichmäßig mit Strom gespeist, wodurch sich eine Kraft ausbildet, die den Fußpunkt von der Seite der stärkeren Stromzuführung auf den Elektrodenrand abdrängt [Burk-85],[Erk-74]. Da es sich bei dem Löschblech auch um ein Art Flächenelektrode handelt, wird auch hier bei nichtsymmetrischer Stromspeisung des Fußpunktes eine Kraft auf diesen ausgeübt, wodurch er sich in Richtung der Löschblechkante bewegt. Bei der Verwendung von ferromagnetischen



**Bild 3.31:** Schrägsichtaufnahme in eine 12 mm tiefen Kammer mit einem normalen Löschblech, Stromstärke 1000 A

Materialien wirkt nach Burkhard [Burk-85] eine weitere Kraftkomponenten, die den Fußpunkt bei geringen Stromstärken von mehreren hundert Ampere in Richtung der Elektrodenmitte (Blechmitte) treibt. Bei höheren Stromstärken nimmt diese zusätzliche magnetische Kraftkomponente hingegen wieder ab. So ist das Wanderungsverhalten von Fußpunkten auf ferromagnetischen Stoffen bei hohen Stromstärken nicht von dem auf nichtferromagnetischen Stoffen zu unterscheiden.

Mit zunehmender Stromstärke und zunehmendem Öffnungsquerschnitt schmelzen die beiden Blechseiten entlang der gesamten Kammertiefe gleichförmig stark an,



**Bild 3.32:** Aufschmelzungen der Löschblechoberflächen entlang der Löschblechbreite (Kammertiefe,) 12 mm Löschblech, 500 A, beide Löschblechseiten

wodurch sich der Schmelzschwerpunkt wieder in Richtung der halben Kammertiefe verschiebt. Dies zeigen die Kurvenverläufe im Bild 3.32.

Die Aufschmelzungsschwerpunkte entlang der Löschblechhöhe verschieben sich mit steigender Stromstärke und weiter geöffneter Verdämmung in Richtung der Kammeroberseite. Die Aufschmelzungen liegen schwerpunkthaft in den oberen Löschblechhälften, was durch die zur Bogenunterteilung notwendige Schleifenbildung des Lichtbogens um das Löschblech „eingeleitet“ wird. An den Löschblechunterkanten zeigen sich leichte Anschmelzungen, die von der während des Aufteilungsvorganges an die Löschblechunterkante gedrückten Lichtbogensäule stammen.

Bei höheren Stromstärken und gering geöffneter Verdämmung nehmen die Aufschmelzungen in den unteren Löschblechhälften zu. Die beiden Teillichtbögen brennen unterhalb der Verdämmung, wobei es durch fehlende Ausblasöffnungen zu einem erheblichen Plasmastau kommt, der für eine stetige Ausdehnung des Lichtbogenrückens in Richtung des Kammersockels führt. Das Anfüllen der Bereiche zwischen den Laufschiene und der Löschblechoberfläche verstärkt den Kontakt des Plasmas mit der Blechoberfläche und führt zu Anschmelzungen entlang der gesamten Blechhöhe.

Die Oberflächen der Messungen bei 60 % geöffneter Verdämmung weisen großflächige Aufschmelzungen in der oberen Löschblechhälfte auf.

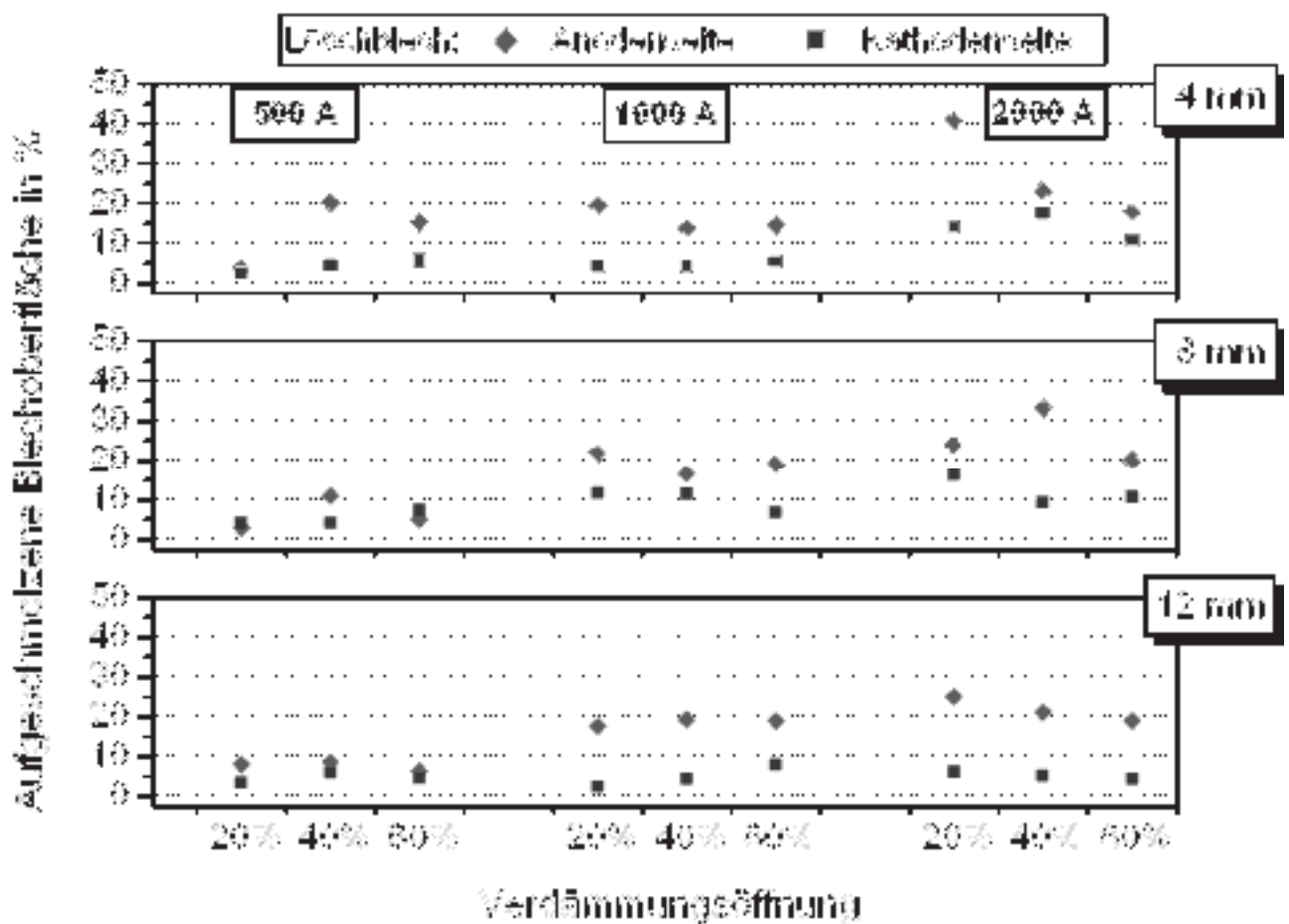
### **3.6.2.1. Vergleich der Aufschmelzungen**

Der Vergleich der untersuchten Löschbleche zeigt im Bild 3.33, dass die prozentuale Aufschmelzung der Löschblechoberflächen geringfügig abhängig vom verwendeten Kammervolumen ist. Je tiefer die Kammer ist, desto dichter liegen die Aufschmelzungsanteile gleicher Löschblechpolarität bei unterschiedlich weit geöffneter Verdämmung beieinander, fallen jedoch - von den 500 A Messungen abgesehen - leicht mit zunehmendem Öffnungsquerschnitt ab. Letzteres ist durch die schon erwähnte Tatsache zu erklären, dass mit zunehmendem Öffnungsquerschnitt der Anteil des Stromes, der außerhalb der Schaltkammer am Löschblech vorbeifließt, zunimmt. Die Belastung der Blechoberfläche wird hierdurch herabgesetzt.

Die aufgeschmolzenen Flächenanteile steigen wie erwartet mit zunehmender Stromstärke an, da sich durch die steigende Stromdichte in den Fußpunkten die Leistungszufuhr in die Blechoberfläche erhöht.

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Anodenseiten der Löschbleche in fast allen Versuchen großflächiger aufgeschmolzen sind als die Kathodenseiten. Diese Tatsache entspricht den Beobachtungen an den massiven „Referenzlöschblechen“.

Bei maximaler Verdämmungsöffnung liegen die prozentualen Schmelzanteile in fast allen Versuchen am dichtesten beieinander: Der hohe Öffnungsquerschnitt führt zu



**Bild 3.33:** Aufschmelzungen der Löschblechoberflächen bei unterschiedlicher Kammertiefe in Abhängigkeit der Stromstärke und der Verdämmungsöffnung

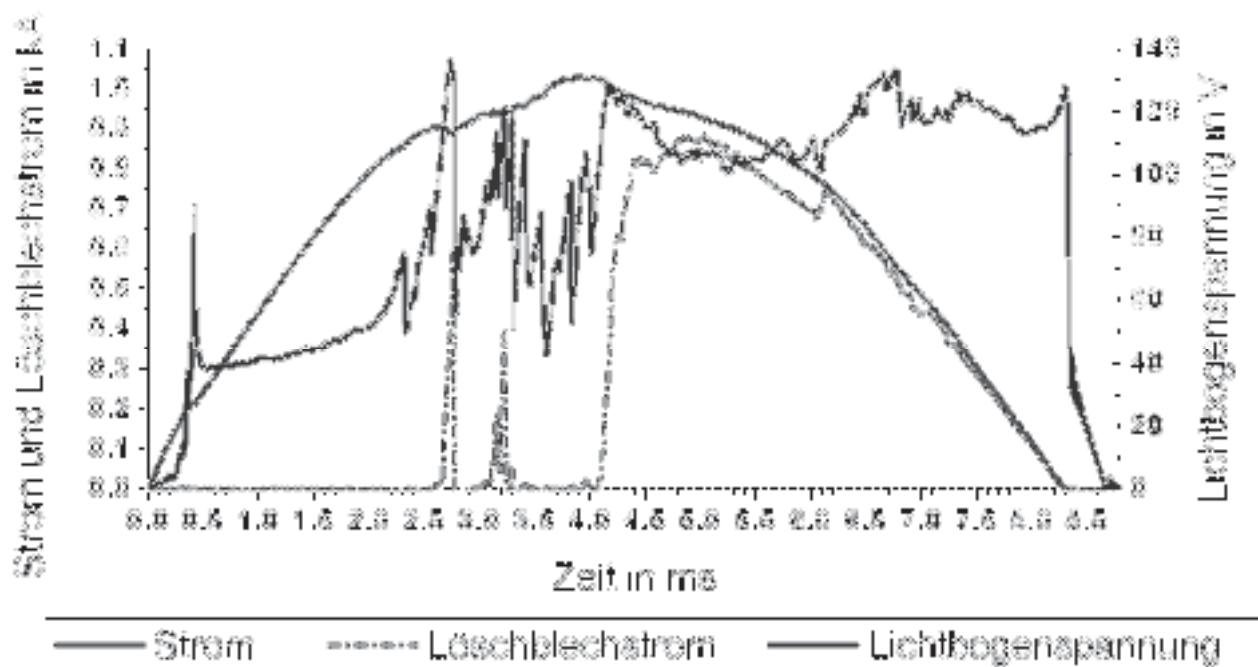
einer raschen Bogenwanderung und – unterteilung, so dass die beiden Teillichtbögen die überwiegende Zeit des Versuches innerhalb der Kammer unterhalb der Verdämmung brennen.



### 3.7. Fußpunktstromdichte

Die im Kapitel 3.6 untersuchten Schmelzspuren ermöglichen zusammen mit dem aufgezeichneten Teilstrom durch das Löschblech die Bestimmung der in den Fußpunkten herrschenden Stromdichten.

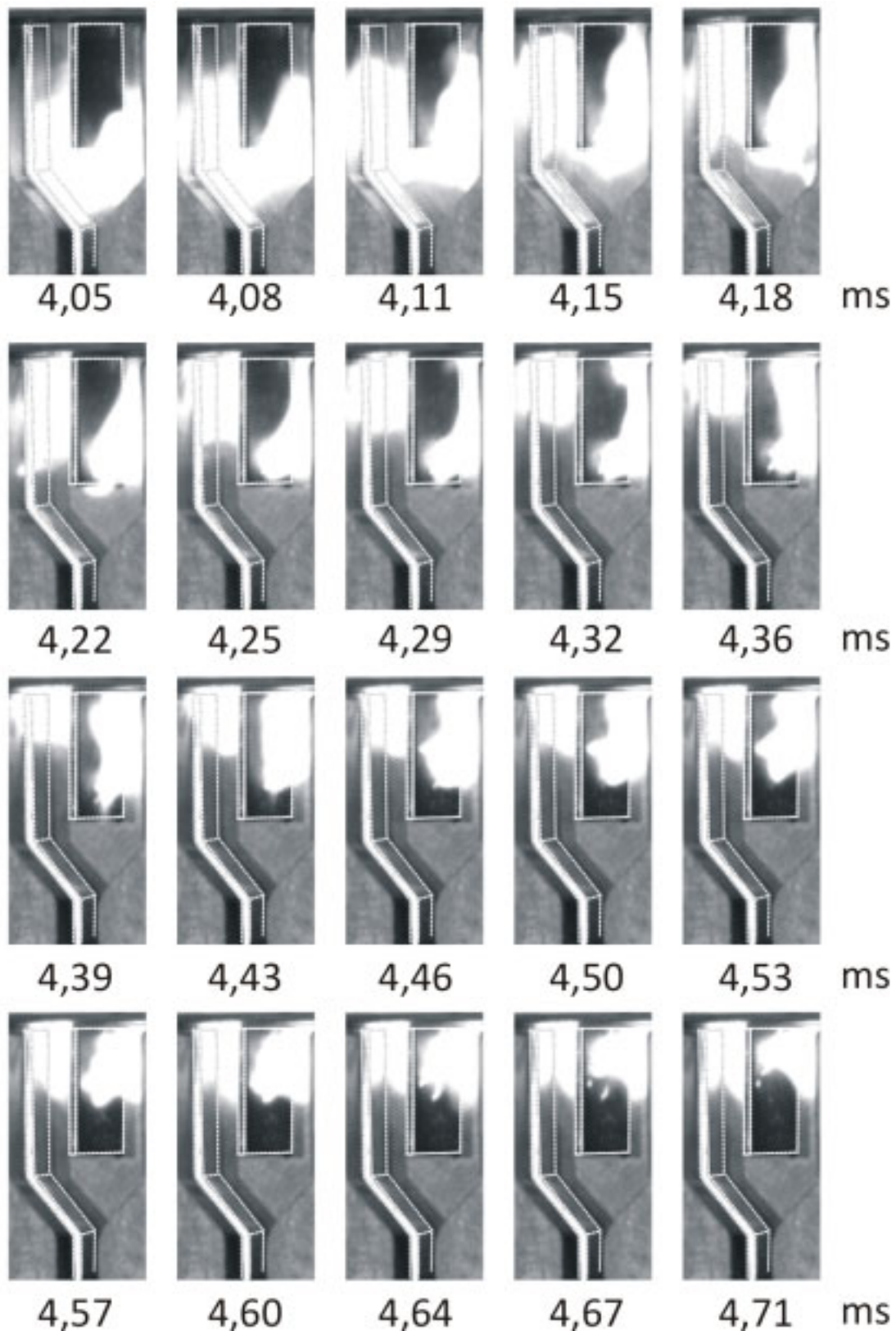
Zunächst wird anhand der Filmaufnahmen der Ort der Fußpunkte auf dem Löschblech zum Zeitpunkt der ersten vollständigen Lichtbogenunterteilung sowie der dazugehörige Momentanwert des Löschblechstromes bestimmt. Im Anschluss wird die Fußpunktfläche, d. h. das auf der Löschblechoberfläche aufgeschmolzene Gebiet berechnet. Der Quotient aus Löschblechstrom und Fußpunktfläche ergibt die gesuchte Stromdichte.



**Bild 3.34:** Oszillogramm einer Messung in einer 12 mm tiefen Kammer bei 1000 A und einer zu 20 % geöffneten Verdämmung

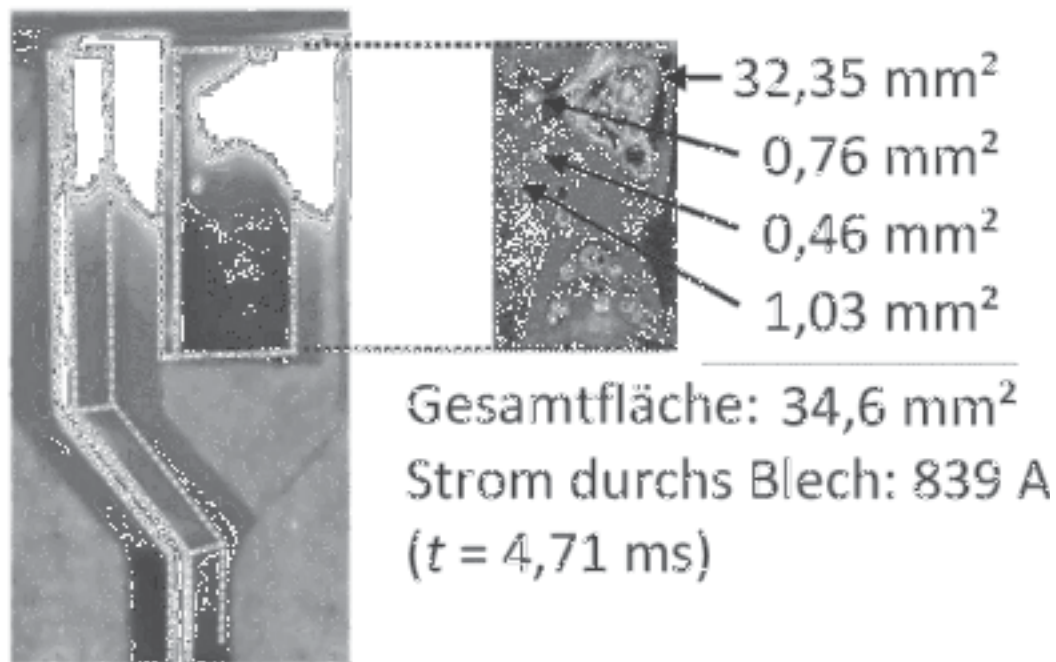
Es bleibt anzumerken, dass der anhand der Fußpunktspuren auf dem Löschblech bestimmte „Aufschmelzbereich“ zumeist einen ringförmigen Kraterrand aus verfestigtem flüssigem Material aufweist, so dass der Durchmesser noch größer erscheint als der Stromflussbereich. Hieraus ergeben sich Unsicherheiten in der Flächenbestimmung, die in die Überlegungen mit einbezogen werden müssen. Untersuchungen von Nachtigall [Nacht-88] ergaben Abweichungen in den Stromdichten für Stahlelektroden um über eine Größenordnung. Hinzu kommt auch,

dass die Größe des Aufschmelzbereichs außer von der Leistungsdichte bzw. Stromdichte auch von der Einwirkzeit bzw. der Wanderungsgeschwindigkeit der Lichtbogenfußpunkte abhängt.



**Bild 3.35:** Blick auf eine Löschblechanode und eine anodische Laufschiene;  
Teilbilder der Schrägsicht-Schnellfilmaufnahme eines Lichtbogens in einer  
12 mm tiefen Kammer bei 1000 A und einer zu 20 % geöffneten Verdämmung

Die Betrachtung eines Unterteilungsvorgangs „schräg von der Seite“ ermöglicht einen Blick auf die vom Lichtbogenfußpunkt „bedeckte“ Löschblechoberfläche. Die Sequenz im Bild 3.35 zeigt die Anodenseite eines normalen Löschblechs und die anodische Laufschiene im Zeitbereich einer Lichtbogenunterteilung in einer 12 mm tiefen Kammer. Das dazugehörige Oszillogramm ist im Bild 3.34 dargestellt.

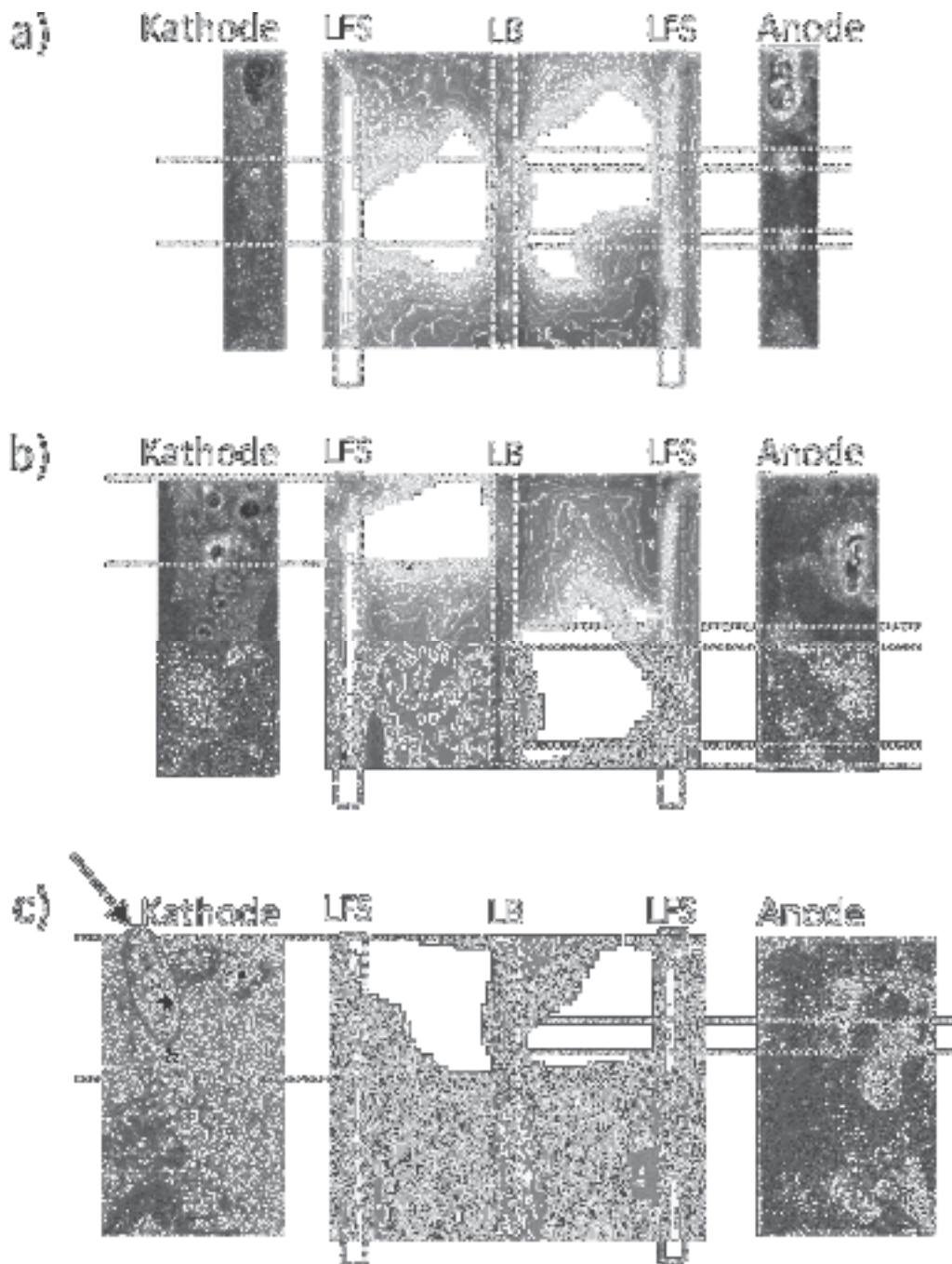


**Bild 3.36:** Bestimmung der Stromdichte anhand der Schmelzspuren auf der Blechoberfläche, Versuch mit 500 A, Löschblech aus Bild 3.35

Wertet man die in den Filmaufnahmen in Bild 3.35 zu erkennende sichtbare Berührfläche des anodischen Fallgebietes mit dem Löschblech als kreisrunde Fußpunktfläche, so ergibt sich zum Zeitpunkt 4,71 ms eine Fläche von  $8,59 \text{ mm}^2$  ( $d=3,3 \text{ mm}$ ). Zu diesem Zeitpunkt liegt der Teilstrom durch das Löschblech bei etwa 839 A, so dass sich eine Stromdichte von  $0,97 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$  ergibt.

Eine weitere Methode zur Ermittlung der Stromdichte in den Fußpunkten ermöglicht die eingangs erwähnte Bestimmung der auf dem Löschblech aufgeschmolzenen Teilflächen. Hierzu zeigt das Bild 3.36 die Oberfläche des Löschblechs der Filmsequenz aus Bild 3.33. Es ergibt sich eine Stromdichte von  $0,24 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$  welche um den Faktor vier geringer ist als die mittels der Filmaufnahmen bestimmte. Hier ergibt sich der Unterschied durch die zu große Berechnung der auf dem Löschblech aufgeschmolzenen Fläche. Das anodische Ansatzgebiet liegt nicht großflächig über die gesamte sichtbare Aufschmelzung verteilt, sondern bildet

vielmehr einzelne parallele Ansatzpunkte, die in der Filmaufnahme jedoch nicht zu erkennen sind. Ferner kann der Aufschmelzung auf der Blechoberfläche nicht entnommen werden, wo genau der Fußpunkt zum Zeitpunkt 4,71 ms auf dem Blech brennt.



**Bild 3.37:** Löschblechoberflächen (links und rechts) und Filmaufnahme (Mitte), aus einem Versuch mit 500 A in einer a) 4 mm b) 8 mm und c) 12 mm tiefen Kammer

LFS: Laufschiene; LB: Löschblech

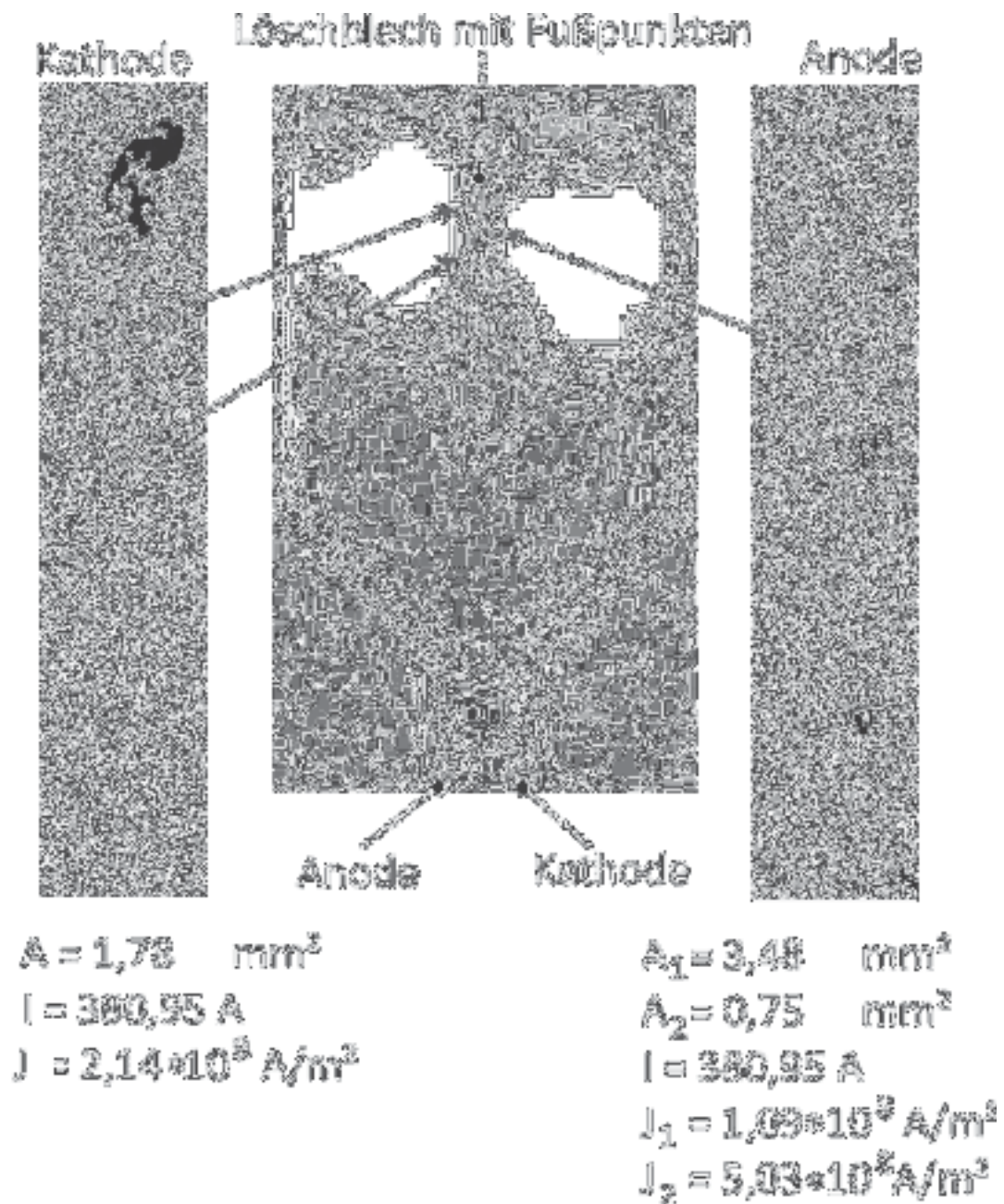
Es fehlt die Information über die räumliche Ausdehnung des Fußpunktes entlang der Löschblechbreite, d. h. entlang der Kammertiefe. Diese kann auch unter Zuhilfenahme der Filmaufnahme nicht bestimmt werden.

Es ergibt sich folglich eine zusätzliche Ungenauigkeit bei der Bestimmung der Stromdichten durch die fehlerbehaftete Festlegung des genauen Lichtbogenansatzortes in großflächig angeschmolzenen Gebieten. Dies ist insbesondere bei höheren Stromstärken in den schmalen Kammern der Fall.

Werden die seitlichen Filmaufnahmen zur Fußpunktlokalisierung auf dem Löschblech verwendet, so ist ebenfalls keine Information über die Lage der Fußpunkte entlang der Kammertiefe, d. h. entlang der Löschblechbreite vorhanden. Hierdurch ergeben sich insbesondere in den 8 und 12 mm tiefen Kammern Ungenauigkeiten durch die Auswahl der in die Flächenberechnung eingehenden Aufschmelzungen. Anhand der im Bild 3.37 dargestellten Löschblechoberflächen mit dem dazugehörigen Bild der Schnellfilmaufnahme zeigt sich die Schwierigkeit. Wird beispielsweise die mit einem Pfeil markierte Fläche auf der Löschblechkathode (Bild 3.37 c)) mit in die Fußpunktfläche einbezogen, so halbiert sich der Wert der Stromdichte.

Es werden daher im Folgenden die Löschblechoberflächen von Schaltungen mit geringer Stromstärke in den 4 mm tiefen Kammern betrachtet.

Bei dem in Bild 5.38 dargestellten Löschblech ergibt sich auf Grund der klar umrissenen, punktförmigen Aufschmelzungen eine kathodische Stromdichte von  $2,14 \cdot 10^8 \text{ A/mm}^2$ . Auf der anodischen Löschblechseite zeigt sich hingegen am Ort des Fußpunktes eine starke Aufschmelzung. An dieser Stelle beginnt die Spur eines wandernden Bogenansatzes (Wanderungsrichtung im Bild von oben nach unten). Die Breite der Spur nimmt in Wanderungsrichtung leicht ab. Im Inneren der Spur liegt ein schmaler Grat mit starker Materialaufschmelzung. Zu den Seiten hin (im Bild von links nach rechts) läuft die Spur in weniger starken Anschmelzungen aus. Die Fläche der Spurbreite sowie die Fläche im Spurrinneren ergeben als eine anodische Stromdichte im Bereich von 1,09 bis  $5,03 \cdot 10^8 \text{ A/mm}^2$ . Die sich in Wanderungsrichtung verschmälernde Spurbreite weist dabei auf eine zeitliche Zunahme der Stromdichte hin.



**Bild 3.38:** Bestimmung der Stromdichte anhand der Schmelzspuren auf der Blechoberfläche, Versuch mit 500 A

Die Bestimmung der Stromdichten aus den Versuchen mit geringer Stromstärke ergeben die in der Tabelle 3.2 aufgeführten Werte.

Strom	Kammertiefe, Verdämmung	Seite	$A / \text{mm}^2$	$I_{LB} / A$	$J / (*10^8 A/m^2)$
500A	4 mm, 40 %	Anode	3,48- 0,76	380,9	<b>1,09 – 5,03</b>
		Kathode	1,78		<b>2,14</b>
1000A	4 mm, 20 %	Anode	6,79	909,2	<b>1,33</b>
		Kathode	7,73		<b>1,17</b>
2000A	4 mm, 20 %	Anode	12,90	1656	<b>1,28</b>
		Kathode	8,93 - 6,01		<b>1,86 - 2,76</b>
500A	8 mm, 20 %	Anode	5,44	341,8	0,63
		Kathode	7,53		0,45
500A	8 mm, 40 %	Anode	2,69	365,8	1,36
		Kathode	6,46		0,57
500A	8 mm, 60 %	Anode	4,72	356,7	0,76
		Kathode	9,03		0,40
500A	12 mm, 20 %	Anode	6,03	276	0,46
		Kathode	9,06		0,30
500A	12 mm, 40 %	Anode	3,93	200,7	0,51
		Kathode	5,15		0,39
500A	12 mm, 60 %	Anode	3,33	194,4	0,58
		Kathode	7,11		0,27

**Tabelle 3.2:** Stromdichten aus verschiedenen Messungen bei der Auswertung Schnellfilmaufnahmen

Die Stromdichten der Messungen mit 500 A in den 8 und 12 mm tiefen Kammern liegen maximal um eine Größenordnung niedriger als die in der Literatur [Lin-92], [Chab-90] aufgeführten Werten. In den 4 mm tiefen Kammern verringert sich die Diskrepanz zu diesen Werten auf Grund der eindeutigeren Flächenbestimmung auf den Faktor zwei bis drei. Der verbleibende Unterschied beruht darauf, dass die Ansatzflächen der kontrahierten Fußpunkte wohl eher noch kleiner sind, als die per

Hand markierten Aufschmelzungsspuren. Der Unterschied zeigt sich bei der Betrachtung der Stromdichtebestimmung der Löschblechanode in Bild 3.38.

Die in [Lin-05a] und [Lin-05b] veröffentlichten Stromdichtewerte von  $4 - 6 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$  entstammen Messungen bei 2000 A aus 12 mm tiefen Kammern, bei denen die Bestimmung der Fußpunktflächen anhand von Filmaufnahmen durchgeführt wurde.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass die Ermittlung der Stromdichte in den Fußpunkten aufgrund der schwer zu bestimmenden Fußpunktfläche mit Fehlern behaftet ist. Hierdurch ergeben sich je nach Art der Flächenbestimmung des Fußpunktes Abweichungen zu den in der Literatur genannten Stromdichten [Lin-92], [Chab-90] um bis zu eine Größenordnung. Nachtigall [Nacht-88] ermittelte in Untersuchungen, bei denen er die Fußpunktfläche mit Hilfe eines Elektronenmikroskops bestimmte, Stromdichten von im Bereich von einigen  $10^{10}$  bis  $10^{11} \text{ A/m}^2$  bereits bei geringen Stromstärken von 300 A. Die Dauer des Stromflusses begrenzte er auf 500 ns, so dass sich ein Vergleich mit den eigenen Untersuchungen ausschließt. Seine Aussage, dass die kontrahierten Bogenansätze eher kleinere Flächen aufweisen, als durch die Schmelzkrater erkennbar ist, ist jedoch auf die eigenen Untersuchungen übertragbar. Ehrlicherweise kann daher für den Vergleich der Stromdichte mit den Simulationen lediglich ein Bereich von etwa  $0,3 - 6 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$  angegeben werden.



## **3.8. Versuchsschalter mit zwei Löschblechen**

### **3.8.1. Lichtbogenunterteilung an zwei massiven Löschblechen**

Die Untersuchungen erfolgten in der Modellschaltkammer nach Bild 2.6 bei einer Stromstärke von 1 und 2 kA und bei zu 20, 40 und 60 % geöffneter Verdämmung. Der lichte Löschblechabstand wurde in 1 mm-Schritten von 2 mm bis auf 7 mm erhöht. In jeder Anordnung wurden 10 Messungen durchgeführt.

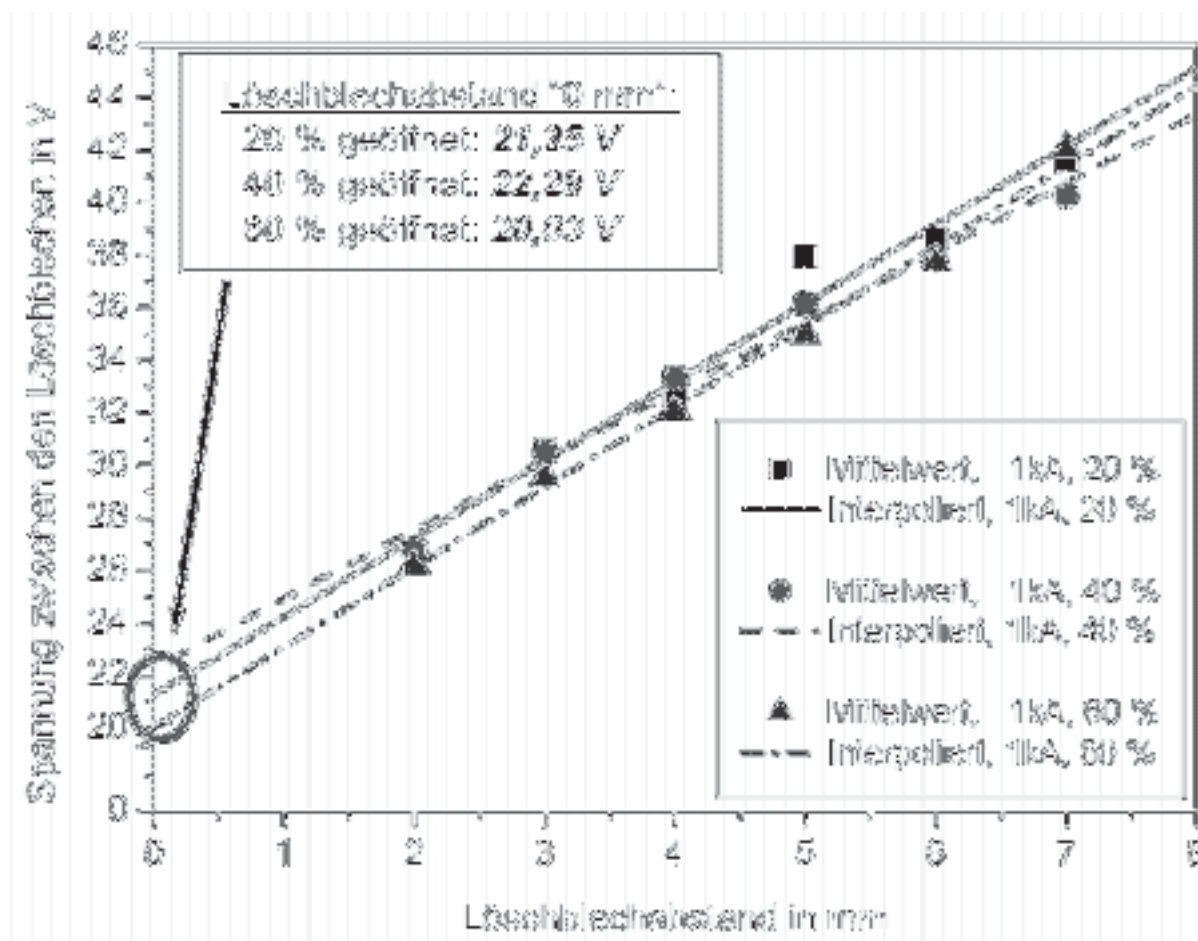
### **3.8.2. Teilspannung zwischen zwei massiven Löschblechen**

Durch die Variation des Löschblechabstandes wurde der Anteil der Säulenspannung des mittleren Teillichtbogens zwischen den beiden Löschblechen zur Gesamtspannung verändert.

Unter der Annahme, dass sich die Werte für die Summe aus Anoden- und Kathodenfall mit steigendem Löschblechabstand nicht bzw. wenig ändern, lässt sich die Säulenfeldstärke als Steigung einer extrapolierten Geraden errechnen. Diese Gerade wird durch die Mittelwerte gelegt, die aus den Spannungen der zehn pro Löschblechabstand durchgeführten Versuche ermittelt wurden. Es ergeben sich Werte für die Säulenfeldstärke im Bereich zwischen 26 und 30 V/cm bei den Messungen mit 1 kA und zwischen 23 und 25 V/cm bei den Messungen mit 2 kA. Dies entspricht nicht den Erwartungen, die ein Ansteigen der Feldstärke mit zunehmendem Strom fordern. Der Widerspruch lässt sich jedoch sofort aufklären, wenn man bedenkt, dass durch den mittleren Teillichtbogen lediglich ein gewisser, von der Wahl der Verdämmung und vom Löschblechabstand abhängiger Anteil des Gesamtstromes fließt. Die Angaben zur Säulenfeldstärke sind deshalb nur für diese spezielle Anordnung gültig.

Der Schnittpunkt der inter- bzw. extrapolierten Geraden mit der Abszisse ergibt einen Wert, der der Summe der beiden Spannungsfälle des mittleren Teillichtbogens entspricht.

Die Ergebnisse der Untersuchungen bei einer Stromstärke von 1 kA sind im Bild 3.39 dargestellt. Für die verwendeten Stahllöschbleche ergeben sich Fußpunktspannungen von Anode UND Kathode zwischen 20 und 23 V. Die Messungen bei 2 kA liefern Spannungen zwischen 22,6 und 23,8 V.



**Bild 3.39:** Teilspannung zwischen zwei massiven Löschblechen bei 1 kA

Die gefundenen Werte liegen im Bereich der Ergebnisse anderer Autoren [Ges-62], [Müller-57], wobei klar zwischen wandernden und stillstehenden Bogenansätzen bzw. Lichtbögen unterschieden wird: für stillstehende Ansätze ergeben sich Spannungen von etwa 18 V, für wandernde Ansätze etwa 27 - 30 V. In den eigenen Untersuchungen mit zwei Löschblechen handelt es sich überwiegend um stillstehende Bogenansätze, da der betrachtete mittlere Teillichtbogen in dieser Anordnung zwischen den Löschblechunterkanten brennt. Dadurch kommt es zu einer zusätzlichen, geringfügigen Bogenverlängerung, wodurch der Spannungsanteil der Lichtbogensäule steigt und die gemessenen Werte im Betrag angehoben werden. Dies kann die höheren Werte von etwa 21 V bei 1 kA und etwa 23 V bei 2 kA erklären. Die unterschiedlichen Werte für verschiedene Verdämmungen sind auf zweierlei Weise erklärbar: Zum einen sind die Werte durch Extrapolation ermittelt worden, wodurch sich eine gewisse Unsicherheit ergibt. Zum anderen zeigen die Filmaufnahmen, dass an den beiden äußeren Teillichtbögen mit zunehmendem

Öffnungsquerschnitt mehr Plasma durch die Öffnungen aus der Schaltkammer austritt. Ein Teil des Stromes fließt außerhalb der Modellschaltkammer „am mittleren Teillichtbogen vorbei“ und lässt die Aufweitung des mittleren Teillichtbogens weniger stark ausgeprägt erscheinen.

### **3.9. Versuch von Strömungsmessungen**

Die eigenen Versuche zur Untersuchung der Strömungsverhältnisse bestätigten die in Kapitel 3.3.2 angeführten Schwierigkeiten anderer Autoren. So existieren beispielsweise keine Tracer-Partikeln, die den hohen Temperaturen in der Modellschaltkammer standhalten. Als temperaturresistente Partikel wurden Hohlkugeln aus Silikatkeramik<sup>6</sup> mit einem mittleren Durchmesser von 90 nm benutzt. Die Kugeln weisen neben der hohen Temperaturbeständigkeit ein vergleichsweise geringes Gewicht auf. Bereits die Zuführung der Tracerpartikel in den Beobachtungsraum/Modellschaltkammer, so dass die Partikel der Strömung folgen, ist sehr schwierig. Des Weiteren ergibt sich eine Schwierigkeit bei der Aufnahme der Tracerverteilung mit Hilfe der digitalen Schnellfilmkamera. Die für die Versuche zur Verfügung stehende Laserleistung von einigen Zehntel Milliwatt reichte nicht aus, um genügend Streulicht an den Partikeln zu reflektieren. Das Laserstreulicht wurde durch einen Bandpass der entsprechenden Laserwellenlänge auf den Bildsensor der Kamera gegeben, reichte jedoch für eine Abbildung der Tracerverteilung nicht aus.

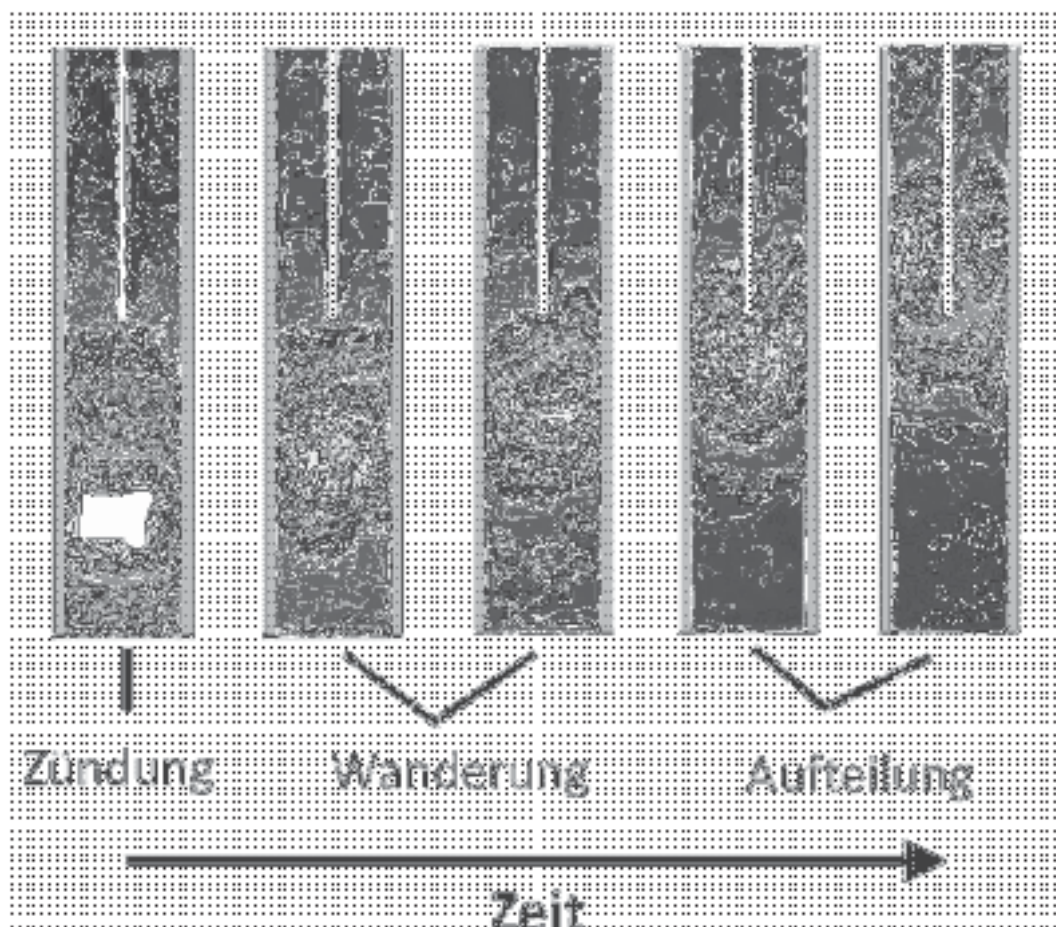
---

<sup>6</sup> Handelsname: 3M™ Zeeospheres™ Grey Ceramic Microspheres, 3M™ Speciality Materials, [www.3m.com/specialitymaterials](http://www.3m.com/specialitymaterials)

#### 4. Versuchsschalter mit parallelen Laufschienen

Bei den folgenden Untersuchungen an Modellschaltern mit parallelen Laufschienen werden Erkenntnisse für die im Kapitel 7 beschriebenen Simulationen gewonnen. Im Unterschied zu den Messungen an divergierenden Laufschienengeometrien kommt es in dieser Laufschienenanordnung weder zu einer Verharrzeit des Lichtbogens an einer Knickstelle, noch zu einer Bogenaufweitung entlang eines divergierenden Laufschienenbereiches (s. Kapitel. 2.5.2.1 Bild 2.18). Hierdurch kann dem Verlauf der Lichtbogenanspannung direkt der zur Fußpunktbildung auf dem Löschblech notwendige Spannungsbedarf entnommen werden.

Entsprechend der Vorgehensweise im Kapitel 3 werden auch hier die Ergebnisse anhand des zeitlichen Versuchsablaufs vorgestellt: Lichtbogenzündung - Lichtbogenwanderung - Aufteilung am Löschblech (Bild 4.1).



**Bild 4.1:** Lichtbogenzündung, -wanderung und -aufteilung in einer Kammer mit parallelen Laufschienen und einem Löschblech

## 4.1. Lichtbogenzündung

Das Verdampfen des Zünddrahtes erzeugt einen leitfähigen Kanal, der in Farbaufnahmen zunächst grün erscheint und im folgenden Zeitverlauf in Richtung blau-weiß übergeht. Die anfänglich grüne Farbgebung beruht auf dem zunächst dominierenden Kupferanteil im Plasma, der starke Emissionslinien bei Wellenlängen von 511, 515 und 522 nm aufweist [Cle-89]<sup>7</sup>. Zusätzlich hierzu emittieren die ionisierten Gase Sauerstoff und Stickstoff, sowie das den vorderen Kammerverschluss bildende Glasfenster, d. h. Silizium stark im grünen Spektrum [Ral-07]. Im Vergleich hierzu sind die Emissionsanteile von Sauerstoff, Stickstoff und Silizium im blauen Spektralbereich zu vernachlässigen [Ral-07]. Der im weiteren Zeitverlauf folgende Farbumschlag von grün in Richtung violett-blau entstammt der Emission des verdampfenden Eisen des Löschblechs. Nach [Ral-07] emittiert Eisen es stark bei den Wellenlängen 405, 432 und 438 nm.

Im Bogenrücken ist bis kurz vor der Lichtbogenunterteilung am Löschblech ein grüner „Kupferschweif“ erkennbar. Hier strömt bevorzugt das verdampfte Elektrodenmaterial, d. h. Kupfer hin (s.o.).

Die schlagartige Explosion des Zünddrahtes führt zur Ausbildung einer Druckwelle, die in der Kammer in Richtung Sockel und in Richtung der Verdämmung wandert. Die Entstehung und Wanderung solcher Druckwellen sind ausführlich von Weichert [Wei-88], Clemens [Cle-89] und Paulke [Paul-97] mit Hilfe von speziellen Druckmesssonden untersucht und gedeutet worden. Die von Paulke festgestellte Deformation des Lichtbogenbandes durch das Auftreffen von Druckwellen (-fronten) kann in den eigenen Untersuchungen bestätigt werden. Die Existenz der Druckwellen ist neben den Filmaufnahmen auch im Verlauf der Lichtbogenspannung kurz nach dem Zündzeitpunkt erkennbar. Die Bogendeformation und zusätzliche Kühlung durch das den Lichtbogen an- bzw. umströmende Gas bewirken Spannungsschwankungen. Solche Spannungsschwankungen können den Verläufen der Lichtbogenspannungen in den folgenden Kapiteln entnommen werden. Sie wurden bei Versuchen mit verschiedenen Verdämmungsöffnungen bei unterschiedlichen Stromstärken aufgezeichnet. Nähere Betrachtungen hierzu folgen im nächsten Kapitel.

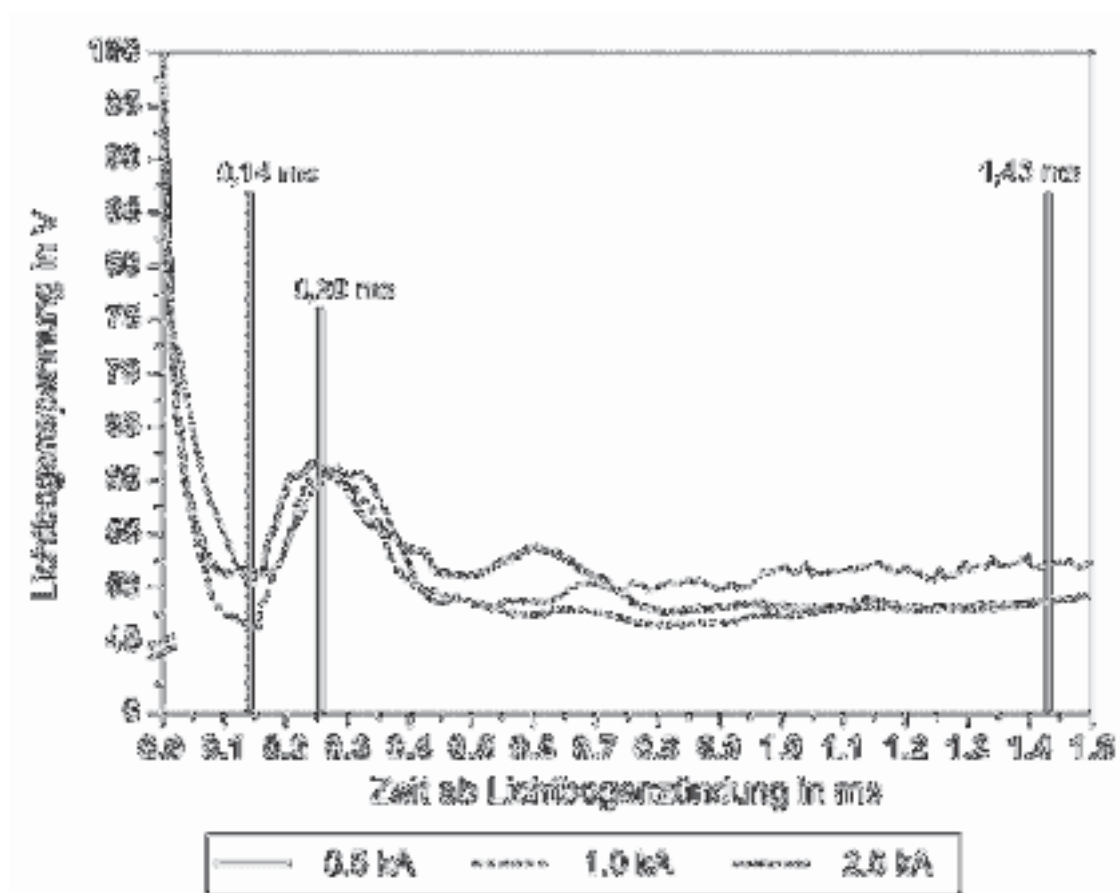
---

<sup>7</sup> Clemens [Cle-89] wählte eben jene starken Spektrallinien bei 511 und 522 nm aus, um aus deren Intensitätsverhältnis die Plasmatemperatur zu bestimmen.

## 4.1.1. Verdämmungseinfluss auf die Bogenwanderung

### 4.1.1.1. Kompletzt geschlossene Verdämmung

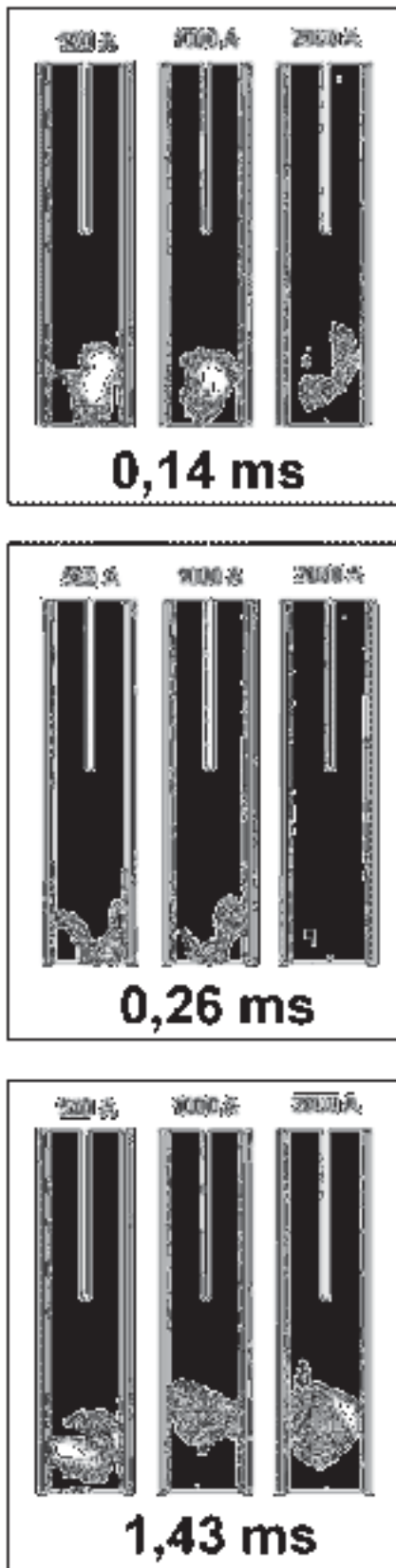
In Schaltkammern ohne Ausblasöffnungen in der Verdämmung, wird der Zünddruckpuls vollständig an der Verdämmung reflektiert und wandert an die Zündstelle zurück. Beim Auftreffen der Druckwelle auf die Bogensäule und die Fußpunkte werden diese in Richtung Kammersockel gedrückt. Durch die einsetzende



**Bild 4.2:** Verlauf der Lichtbogenspannung bei Messungen mit  $I = 500\text{ A}$ ,  $1000\text{ A}$  und  $2000\text{ A}$  bei geschlossener Verdämmung

Verlängerung, Kühlung und durch die Druckerhöhung auftretende Querschnittseinengung erhöht sich die Lichtbogenspannung.

Die Kurven im Oszillogramm des Bildes 4.2 zeigen die Verläufe der Lichtbogenspannungen kurz nach der Lichtbogenzündung in komplett geschlossenen Kammern. Die dazugehörigen Teilbilder der Schnellfilmkameraaufnahmen zu den in Bild 4.2 markierten Zeitpunkten sind im Bild 4.3 dargestellt.



**Bild 4.3:** Teilbilder einer Filmaufnahme zu den Versuchen aus Bild 4.2

Die Kurven in Bild 4.2 weisen unabhängig von der Zündstromstärke im Bereich von 0 bis etwa 1 ms die von den Druckreflexionen an der Verdämmung verursachten Spannungsschwankungen auf.

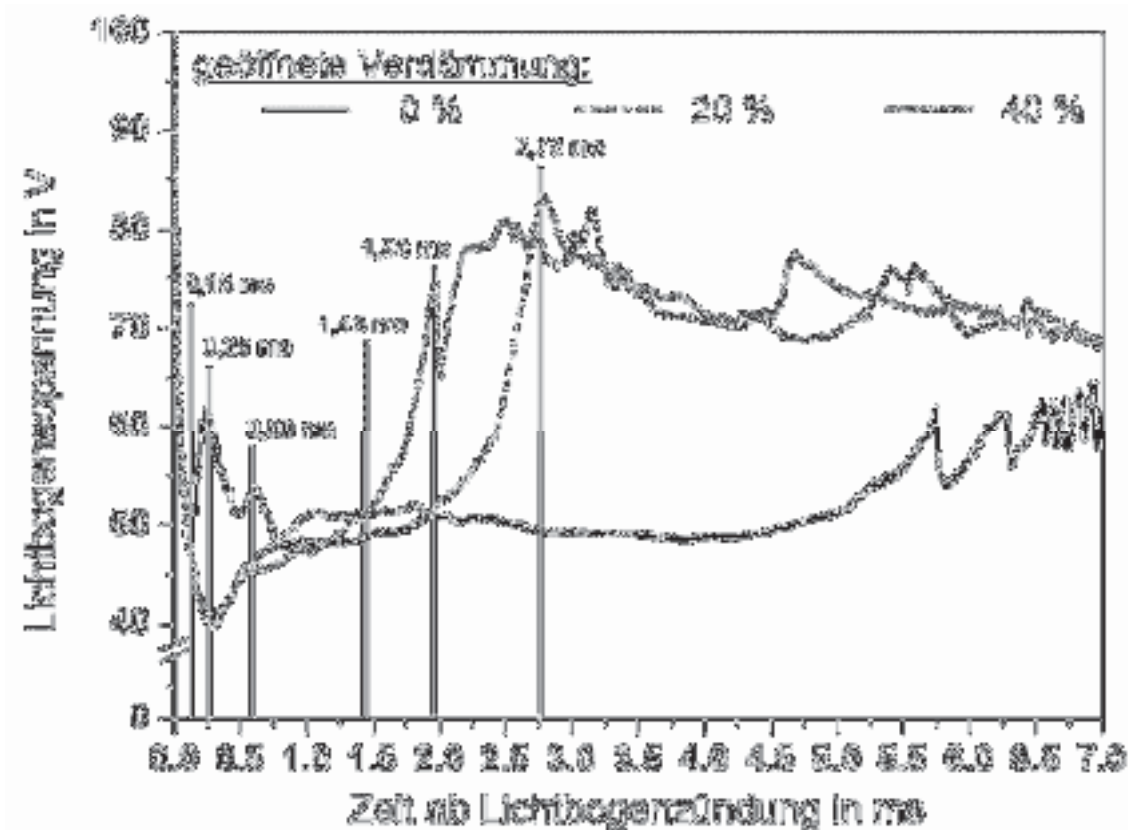
0,16 ms nach der Zündung erreicht die an der Verdämmung reflektierte Druckwelle die Zündstelle und drückt den Lichtbogen während der folgenden 90  $\mu$ s in Richtung Kammersockel. Der von der Druckwelle zurückgelegte Weg (Zündstelle – Verdämmung – Zündstelle) beträgt 72 mm. Hieraus ergibt sich eine rechnerische Geschwindigkeit der ersten Druckwelle von  $v_1 = 442$  m/s, d.h. etwa 32 % über der Schallgeschwindigkeit der kalten Luft. Das dem Druckstoß folgende Maximum der Lichtbogenspannung ist stromstärkeunabhängig und liegt bei etwa 60 V. Danach fallen alle drei Lichtbogenspannungen wieder um etwa 10 V ab.

Eine weitere Druckwelle erreicht die Zündstelle etwa 0,35 ms später, wodurch sich eine Wanderungsgeschwindigkeit von  $v_2 = 260$  m/s ergibt. Da als Geschwindigkeit mindestens die Schallgeschwindigkeit zu erwarten ist [Kar-98] entstammt diese Druckwelle offenbar aus einer Überlagerung zweier Druckwellen. Die Überlagerung wirkt offensichtlich nur bei der geringen Stromstärke von 500 A auf das Plasma an der Zündstelle. Hier ergibt sich durch erneute Bogenaufweitung in Richtung Kammersockel eine zweite Spannungsspitze von etwa 53 V.

Der Spannungsverlauf der 1000 und 2000 A Messung zeigt kein weiteres Spannungsmaximum. Im folgenden Zeitverlauf bis  $t = 1,5$  ms liegen die Lichtbogen Spannungen zwischen 46 und 53 V.

Paulke [Paul-97] gibt für die Wanderungsgeschwindigkeiten der Stoß- bzw. Druckwellen Werte von 350 bis maximal 500 m/s an. Die anhand der Spannungsschwankungen indirekt bestimmten Werte liegen demnach in der richtigen Größenordnung.

#### 4.1.1.2. Verdämmung bei $I = 500$ A

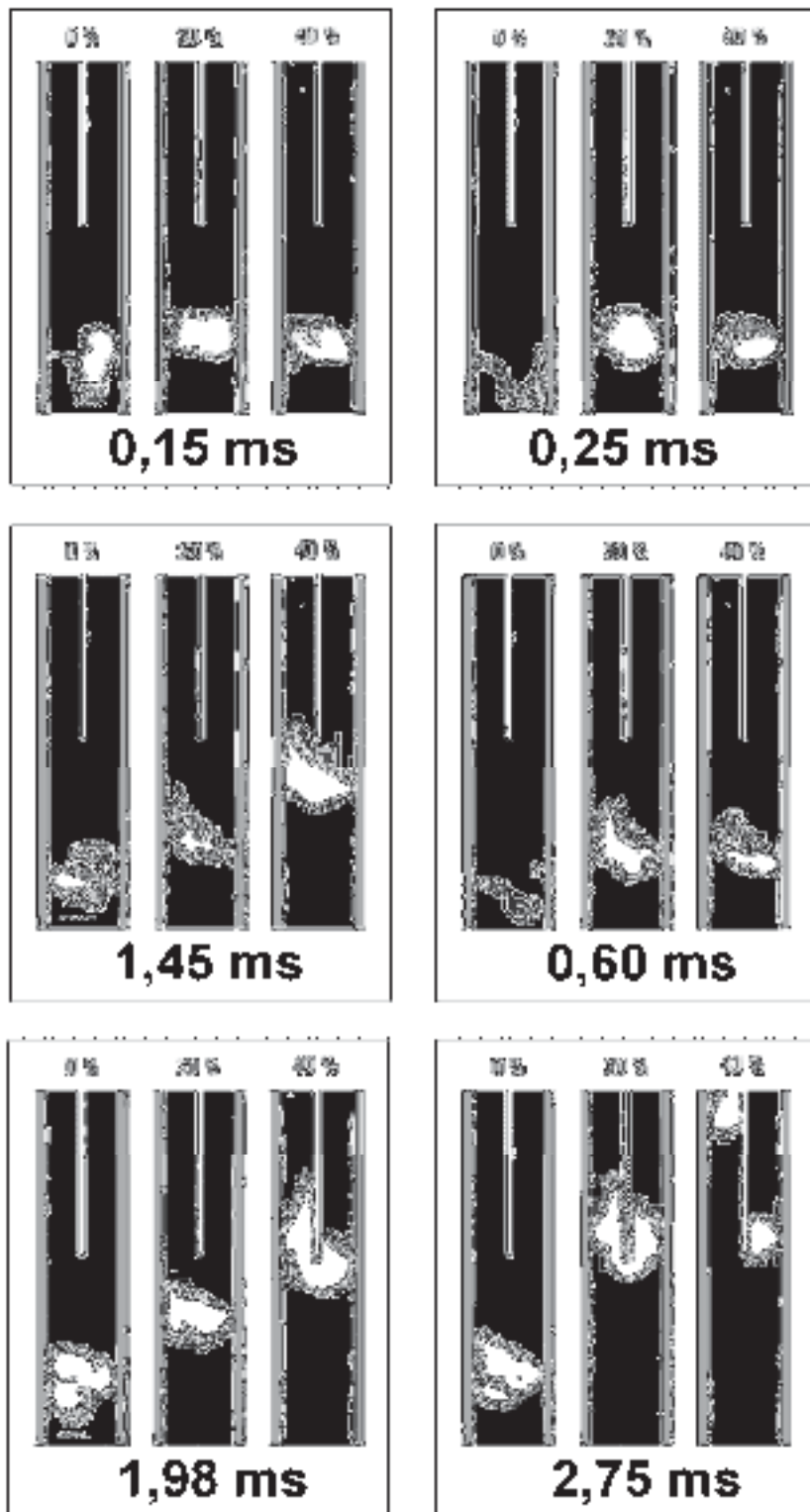


**Bild 4.4:** Oszillogramm einer Messung mit  $I = 500$  A, 0 %, 20 % und 40 % geöffnete Verdämmung

Wird die obere Verdämmung der Modellschaltkammer mit Ausblasöffnungen versehen, so ergeben sich andere Randbedingungen für die Druckverhältnisse in der Schaltkammer. Die von der Zünddrahtexplosion verursachte Druckwelle wird beim Vorhandensein von Ausblasöffnungen merklich abgebaut. Eine reflektierte Druckwelle ist zumindest im Verlauf der Lichtbogen-Spannung nicht mehr zu



erkennen. Bild 4.4 zeigt hierzu einen Vergleich von Messungen mit unterschiedlich geöffneter Verdämmung bei einer Stromstärke von 500 A.



**Bild 4.5:** Teilbilder einer Filmaufnahme zu den Versuchen aus Bild 4.4

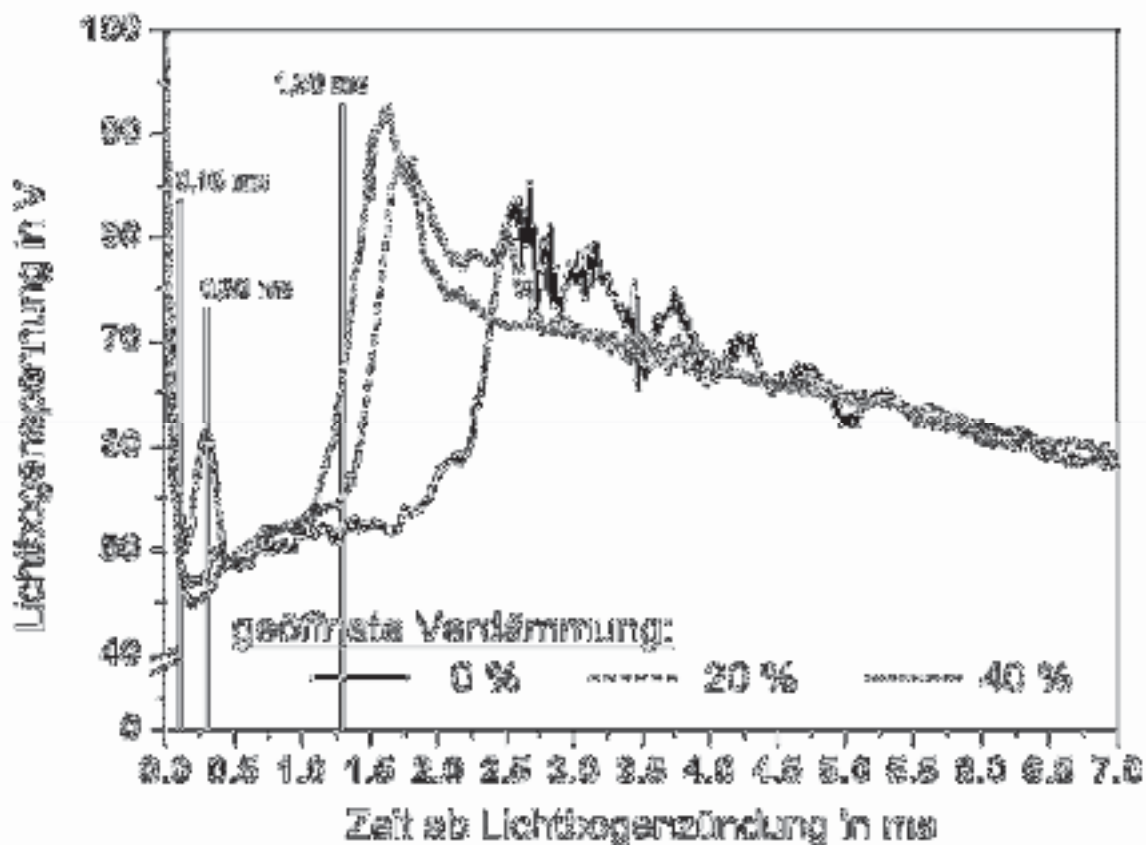
Die dazugehörigen Teilbilder der Schnellfilmkameraaufnahmen zu den in Bild 4.4 markierten Zeitpunkten sind im Bild 4.5 dargestellt. Deutlich sind die durch Druckwellenwanderung entstehenden Spannungsschwankungen bei 0 % geöffneter Verdämmung zu erkennen (0 - 0,75 ms). Die Versuche mit 20 und 40 % geöffneter Verdämmung zeigen diese Schwankungen kurz nach der Lichtbogenzündung nicht.

Vielmehr sinkt die Spannung 0,25 ms nach Zündung auf etwa 40 V ab, bevor sie wieder zu steigen beginnt. Je weiter die Verdämmung geöffnet ist, desto schneller wandert der Lichtbogen von der Zündstelle weg in Richtung

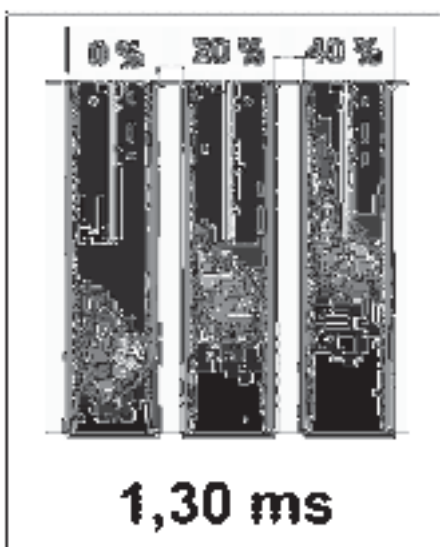
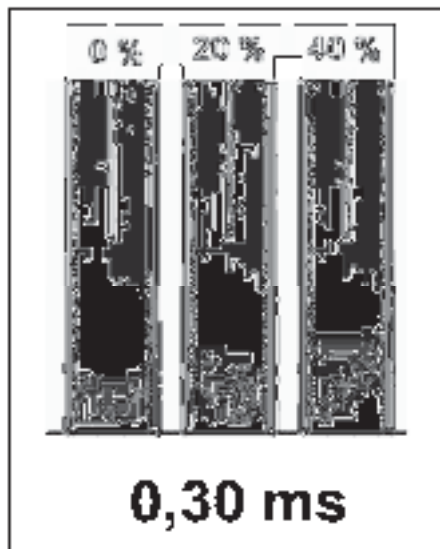
Kammeroberseite. So befindet sich der Lichtbogen bei 40 % geöffneter Verdämmung bereits 1,6 ms nach Zündung unterhalb des Löschblechs und teilt sich zum Zeitpunkt 2,2 ms in zwei Teillichtbögen auf. Der Lichtbogen bei 20 % geöffneter Verdämmung erreicht in diesem Moment gerade die Löschblechunterkante, und teilt sich 0,6 ms später in zwei Teillichtbögen auf. Der Lichtbogen bei geschlossener Verdämmung verharrt immer noch an der Zündstelle und teilt sich im Versuchsforgang nicht auf.

#### 4.1.1.3. Verdämmung bei $I = 2000 \text{ A}$

Erhöht man den prospektiven Strom auf 2000 A und untersucht den Einfluss der Verdämmung, dann ergeben sich Lichtbogenspannungskurven wie im Oszillogramm im Bild 4.6 dargestellt.



**Bild 4.6:** Oszillogramm einer Messung mit  $I = 2000 \text{ A}$ , 0 %, 20 % und 40 % geöffnete Verdämmung



**Bild 4.7:** Teilbilder einer Filmaufnahme zu den Versuchen aus Bild 4.6

Im Falle der komplett geschlossenen Verdämmung (schwarze Kurve) ist eine ausgeprägte Spannungsspitze von etwa 62 V 0,25 ms nach Zündung zu erkennen, die von einer starken, durch die Zündung verursachten und an der Verdämmung reflektierten Druckwelle herrührt. Bei 20 % und 40 % offener Verdämmung ist ein solcher Druckwelleneffekt im Spannungskurvenverlauf nicht zu erkennen. Die Filmaufnahmen zeigen hingegen eine geringfügige Bewegung des Plasmas am Zündort in Richtung Kammersockel. Dies ist ein Anzeichen für das Vorhandensein einer Druckwelle, die jedoch nicht so stark zu sein scheint, dass die Lichtbogenspannung durch Verlängerung, Kühlung und Querschnitts- und direkter Druckeinfluss [Erk-74] bis auf ein lokales Maximum ansteigt.

Der rasche Anstieg der Spannung bei 40 % Verdämmungsöffnung ab 1,1 ms geht mit der Lichtbogenwanderung vom Zündort in Richtung Kammeroberseite einher. Nach Aufteilung des Lichtbogens am Löschblech ( $t = 1,5\text{ ms}$ ) wandert der rechte Teillichtbogen sehr schnell unter die Verdämmung, da der kathodische Laufschienefußpunkt in Richtung Verdämmung springt. Der linke Teillichtbogen folgt nahezu ohne Verzögerung.

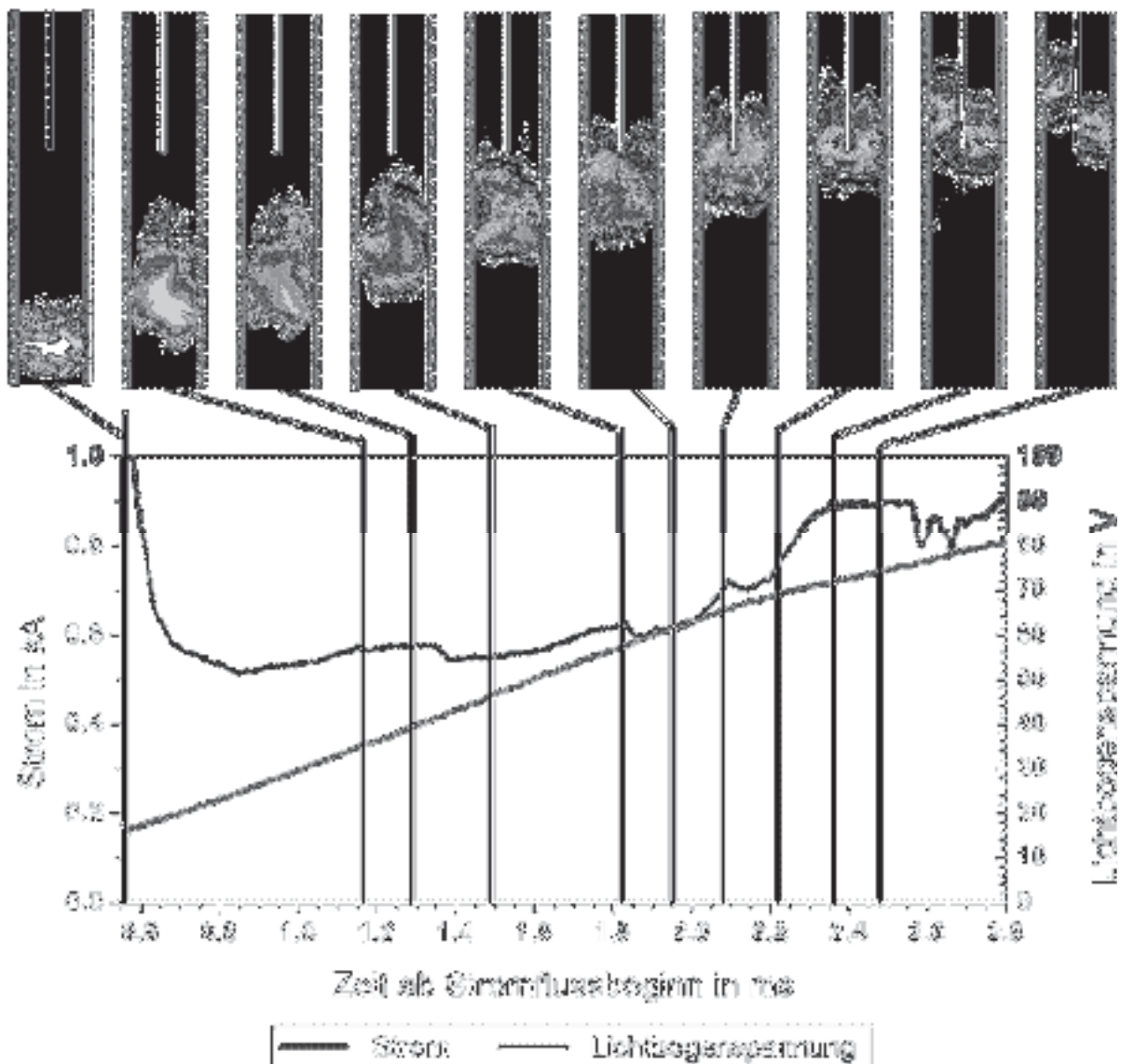
Die Aufteilung des Lichtbogens in der zu 20 % geöffneten Kammer erfolgt zum Zeitpunkt 1,7 ms. Das Wanderungsverhalten

der beiden Teillichtbögen ähnelt dem bei 40 % geöffneter Verdämmung.

Als letztes teilt sich der Lichtbogen im Falle der geschlossenen Verdämmung bei  $t = 2,6\text{ ms}$  auf. Auch hier „springt“ der rechte Teillichtbogen sofort an die Kammeroberseite unter die Verdämmung, wohingegen der linke Teillichtbogen an der Löschblechunterkante verharrt. Es entstehen starke Plasmaverwirbelungen unterhalb des Löschbleches, die entlang der kathodischen Laufschiene bis an den rechten Teillichtbogen unter die Verdämmung reichen. Bis  $5,5\text{ ms}$  kommt es hierdurch zu mehreren Rückzündungen der beiden Lichtbögen unterhalb des Löschblechs, welche zu Schwankungen im Spannungsverlauf führen.

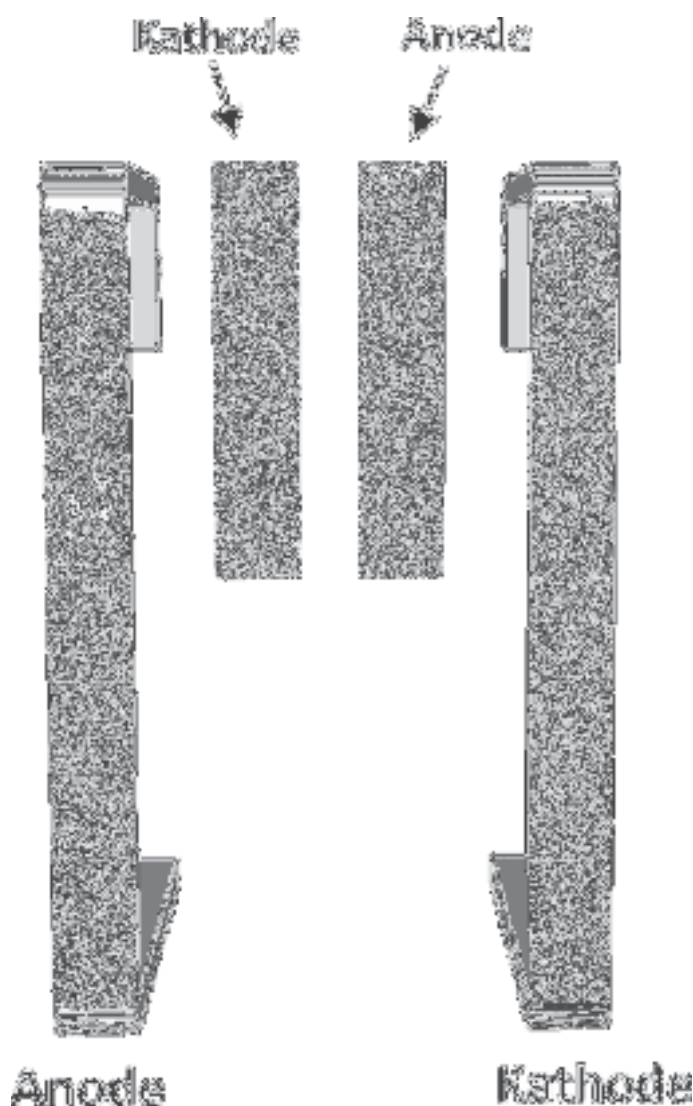
## 4.2. Lichtbogenwanderung

Bei der Lichtbogenwanderung auf Laufschiene können feststehende Plasmastrahlen eine Bewegung des Lichtbogens einleiten, bei der die Fußpunkte an den Laufschiene in mehr oder weniger großen Sprüngen wandern. Für den Fall von parallelen Laufschiene zeigt Bild 4.8 die Teilbilder eines Versuches, in denen die Wanderung des Lichtbogens von der Zündstelle bis zur Unterteilung kurz oberhalb der Löschblechunterkante in einer derartigen sprunghaften Form zu erkennen ist.



**Bild 4.8:** Teilbilder einer Filmaufnahme (75.400 FPS) und Oszillogramm eines Versuches mit  $I_p = 1 \text{ kA}$ , 20 % geöffnete Verdämmung

Nach [Amft-70] erfolgt die sprunghafte (diskontinuierliche) Wanderung bei geringen Strömen und/oder bei hohen magnetischen Blasfeldern durch starke Krümmung der Plasmastrahlen in die Wanderungsrichtung, wodurch sich in relativ weiter Entfernung zum alten ein neuer Fußpunkt bildet. Der Strom kommutiert dabei in einer endlichen Zeit vom alten in den neuen Lichtbogenpfad. Eine weitere Ursache der sprunghaften Wanderung sind hohe Ströme und geringe magnetische Felder zu nennen. Diese führen dazu, dass die Plasmastrahlen die Gegenelektrode berühren und es durch die damit verbundene Aufheizung zur Ausbildung neuer Fußpunkte kommt. Die Fußpunktsprünge durch Anstrahlen der Gegenelektrode sind kürzer als die durch starke Krümmung an der Elektrode verursachten.



**Bild 4.9:** Laufschienen- und Löschblechoberfläche eines Versuches mit 1000 A und 100 % geöffneter Verdämmung

Das diskontinuierliche Wanderungsverhalten konnte in den eigenen Untersuchungen beobachtet werden und wird in Kapitel 4.2.2 näher beschrieben.

Die Fußpunktspuren auf den Laufschienen in Bild 4.9 spiegeln das in den Schnellfilmen beobachtete Wanderungsverhalten wieder. So zeigt die kathodische Laufschiene punktuelle, von springenden Fußpunkten stammende Aufschmelzungen. Auf Höhe der Löschblechunterkante sind Spuren zu erkennen, deren Aufschmelzungen stärker (tiefer) erscheinen. Dies ist ein Hinweis auf eine langsamere Fußpunkt-bewegung an zumindest dieser Stelle der Laufschiene. Oberhalb dieser Spur sind wieder punktuelle Anschmelzungen bis an das Laufschienenende zu erkennen.

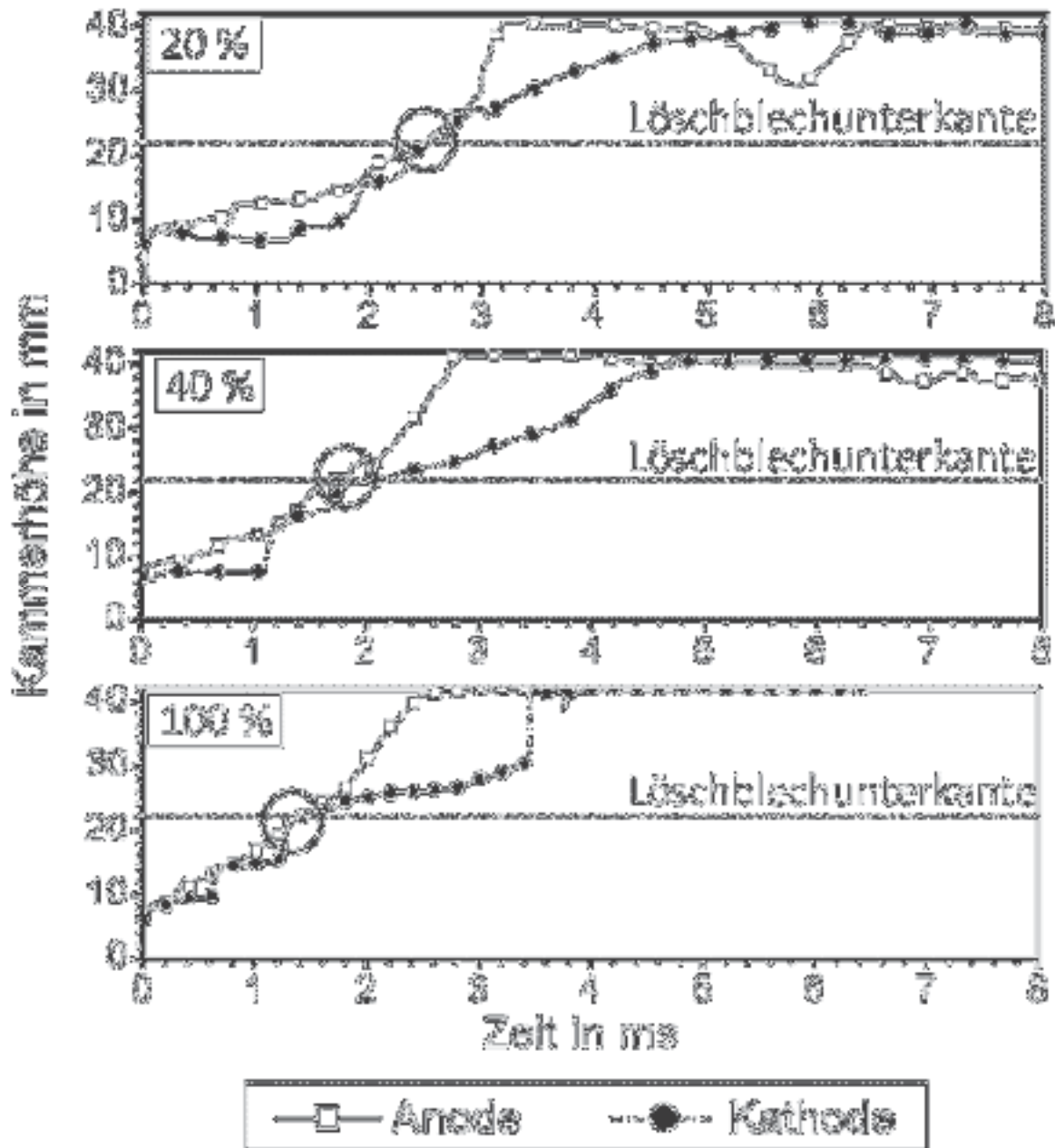
Die anodische Laufschienseite zeigt fast durchgehende, fein verästelte Strukturen mit geringer Aufschmelzung des Laufschiene materials im unteren Kammerbereich. Die Anschmelzungen erscheinen eher oberflächlich und weisen viele kleine Verästelungen auf, was auf eine raschere Wanderung der anodischen Bogenansätze hindeutet (s. Kapitel 1.5.1.1 bzw. [Amft-75], [Burk-62]). Auf Höhe der Löschblechunterkante sind die Anschmelzungen stärker, was ein Hinweis auf ein kurzzeitiges Verharren des Fußpunktes an dieser Stelle ist. Oberhalb dieser Schmelzstelle zeigen sich fast keine Anschmelzungen mehr, da der Fußpunkt direkt an das obere Laufschieneende springt, nachdem der rechte Teillichtbogen nach Aufwölbung aus der komplett geöffneten Verdämmung die anodische Laufschiene oberhalb des Löschblechs berührt.

Da die Laufschiene seitlich direkt an die Kammerwände anliegen, findet keine Wanderung der Fußpunkte entlang der Laufschiene kanten statt. Die Ursache hierfür liegt nach Paulke [Paul-97] darin begründet, dass die „kalten“ Wände einen zu hohen Temperaturgradienten verursachen, so dass eine Abwanderung der Fußpunkte in die seitlichen Kantengebiete einen energetisch ungünstigen Zustand verursachen würde. In Kammern, deren Seitenwände einen hinreichend großen Abstand zu den Laufschiene kanten haben, findet bevorzugt eine Kantenwanderung des Lichtbogens statt [Paul-97].

Auf den Löschblechoberflächen im Beispiel aus Bild 4.9 zeigen sich auf der anodischen Seite punktuell aufgeschmolzenen Gebiete, die den Aufschmelzungen auf der Laufschiene kathode direkt gegenüberstehen. Die Löschblech kathode weist in diesem Beispiel ein stark aufgeschmolzenes Gebiet im unteren Löschblech drittel auf, welches den Aufschmelzungen an der Löschblech kathode direkt gegenübersteht. Die starken Anschmelzungen im oberen Bereich der anodischen Löschblech seite rühren von dem am Kammerende hängenbleibenden rechten Teillichtbogen, der sich erst eine gewisse Zeit nach dem Verharren an dieser Stelle (der linke Teillichtbogen brennt währenddessen an der Unterkante der kathodischen Löschblech seite) mit der anodischen Laufschiene oberhalb des Löschblechs kurzschließt.

#### 4.2.1. Fußpunkte auf den Laufschiene und dem Löschblech

Bei der Betrachtung des Weg-Zeit-Verlaufs des anodischen und des kathodischen Laufschienefußpunktes bei einer Stromstärke von 500 A in Abhängigkeit der Verdämmung ergeben sich die in Bild 4.10 dargestellten Kurvenverläufe.



**Bild 4.10:** Fußpunktwanderung an den Laufschiene (LFS) in Versuchen mit  $I_p = 500$  A bei 20, 40 und 100 % geöffneter Verdämmung

Unterteilt man die Wanderung in zwei Zeitabschnitte, so sind dies erstens die

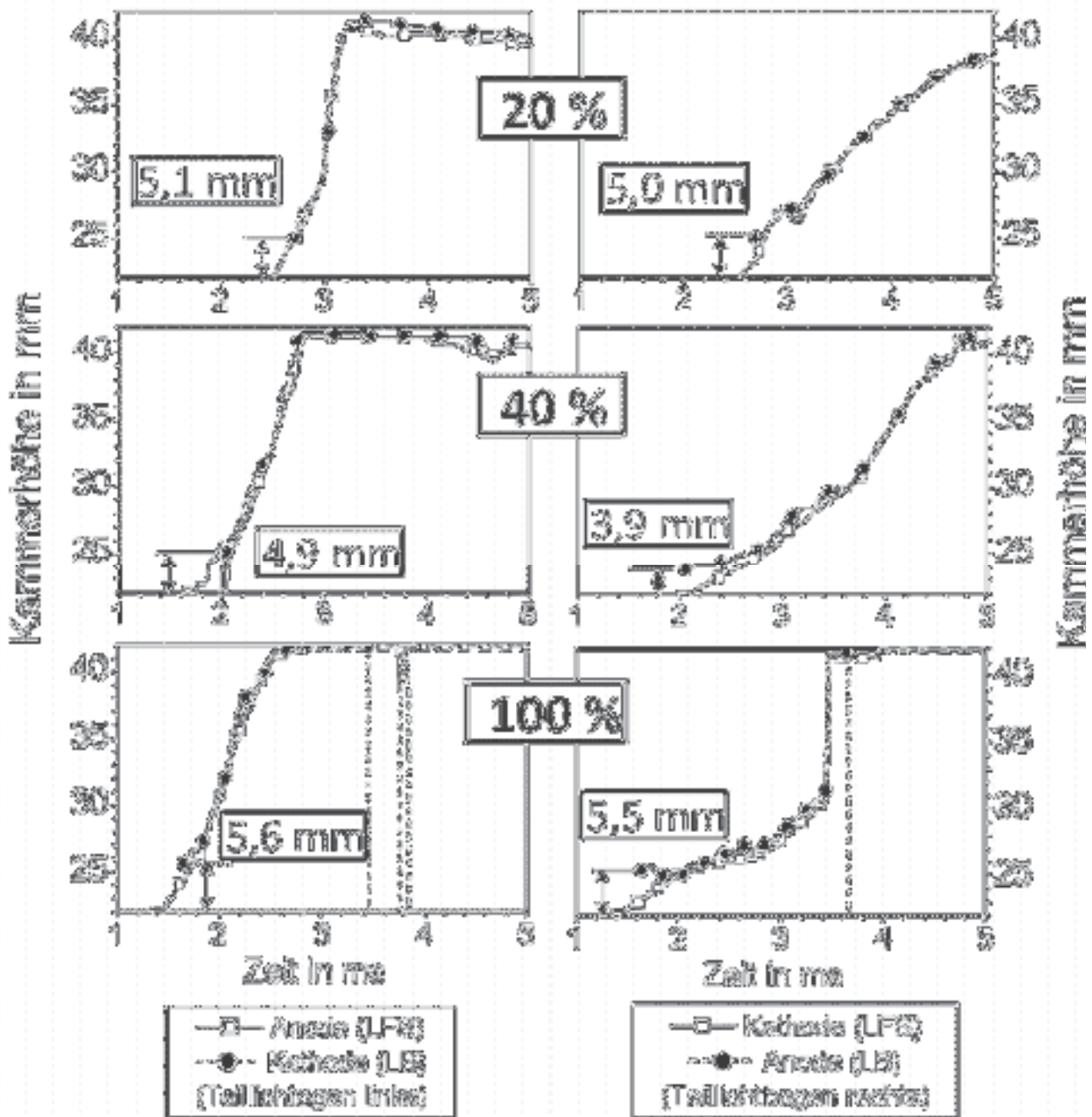


Wanderung eines Lichtbogens bis an die Löschblechunterkante und zweitens die Wanderung von zwei Teillichtbögen von der Löschblechunterkante bis unter die Verdämmung. Während beider Zeitabschnitte wandert der anodische Fußpunkt dem kathodischen in den gezeigten Versuchen voran. An dieser Stelle sei angemerkt, dass dies nicht immer der Fall ist.

Im ersten Zeitabschnitt wandern die Fußpunkte umso schneller, je weiter die Verdämmung geöffnet ist. Der anodische Fußpunkt wandert nahezu kontinuierlich bis zur Blechunterkante. Der kathodische zeigt im Gegensatz dazu umso mehr diskontinuierliche Sprünge auf, je weiter die Verdämmung geöffnet ist. Die Sprünge in den Kurvenverläufen ergeben sich dabei - wie in der Einführung dieses Kapitels beschrieben - als Kombination aus Anstrahlung der Gegenelektrode und Ablenkung des Fußpunktes. Hierdurch bildet sich ein neuer, weiter oberhalb liegender Fußpunkt auf der Kathode. Der Strom „kommutiert“ vom alten, rückwärtigen in den neuen weiter oberhalb liegenden Fußpunkt, wobei der Sprung das Verlöschen des stationären, rückwärtigen Fußpunktes markiert. Beim Erreichen der Löschblechunterkante „treffen“ die Weg-Zeit-Linien der beiden Laufschienefußpunkte wieder zusammen, da die Bogensäule zunächst unter der Löschblechkante verharrt. Im Bild 4.10 ist dieser Zeitpunkt mit einem Kreis markiert. Im Folgenden wandern die Fußpunkte an den Laufschiene weiter in Richtung Verdämmung, die Bogensäule wölbt sich um das Löschblech und der Lichtbogen teilt sich unter Fußpunktbildung auf dem Löschblech in zwei Teillichtbögen auf. Der linke Teillichtbogen, zu dem der anodische Laufschienefußpunkt gehört, wandert in den gezeigten Versuchen mit 500 A dem rechten Teillichtbogen voraus und erreicht umso eher die Verdämmung, je weiter diese geöffnet ist.

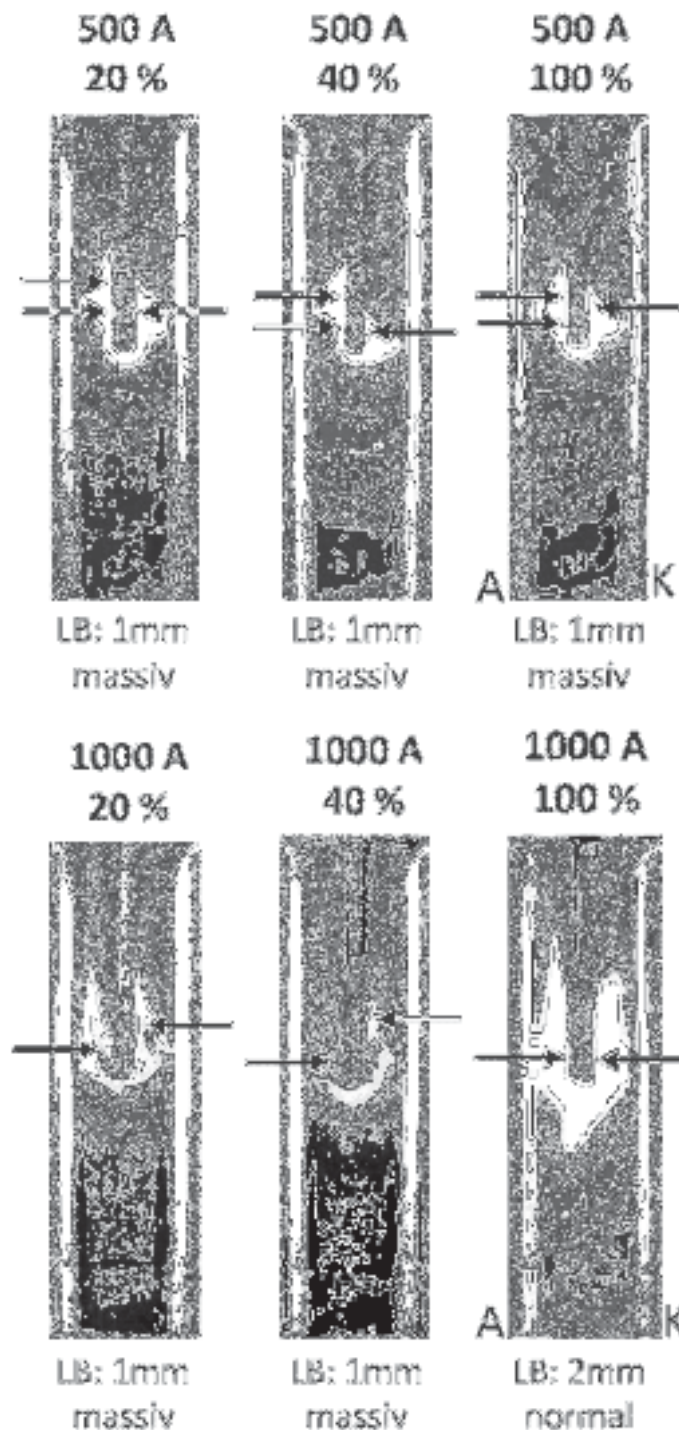
Die Fußpunkte auf den Löschblechen weisen einen fast identischen Weg-Zeit Verlauf auf, wie die Ihnen jeweils auf der Laufschiene gegenüberstehenden Fußpunkte. Die zeigen die Verläufe in Bild 4.11 für den linken Teillichtbogen (anodischer Fußpunkt der Laufschiene und kathodischer auf dem Blech) und den rechten Teillichtbogen (anodischer Fußpunkt auf dem Blech und kathodischer auf der Laufschiene).

Hierbei ist gut zu erkennen, dass sich die Fußpunkte nicht direkt an der Löschblechunterkante bilden, sondern aufgrund der Schleifenbildung weiter oberhalb auf dem Blech.



**Bild 4.11:** Fußpunktwanderung an den Laufschiene (LFS) und dem Löschblech (LB) in Versuchen mit  $I_p = 500$  A bei 20, 40 und 100 % geöffneter Verdämmung UND Höhe der Fußpunktbildung auf dem Löschblech

Es ergeben sich die im Bild 4.11 aufgeführten Werte im Bereich zwischen 3,9 und 5,6 mm. Der linke Teillichtbogen wandert mit seinem anodischen Laufschienegebiet bis hinter die Löschblechkante und befindet sich zum Zeitpunkt der Fußpunktbildung auf dem Löschblech auf derselben Höhe. Der kathodische Laufschienefußpunkt des rechten Teillichtbogens befindet sich zum Zeitpunkt der Fußpunktbildung unterhalb

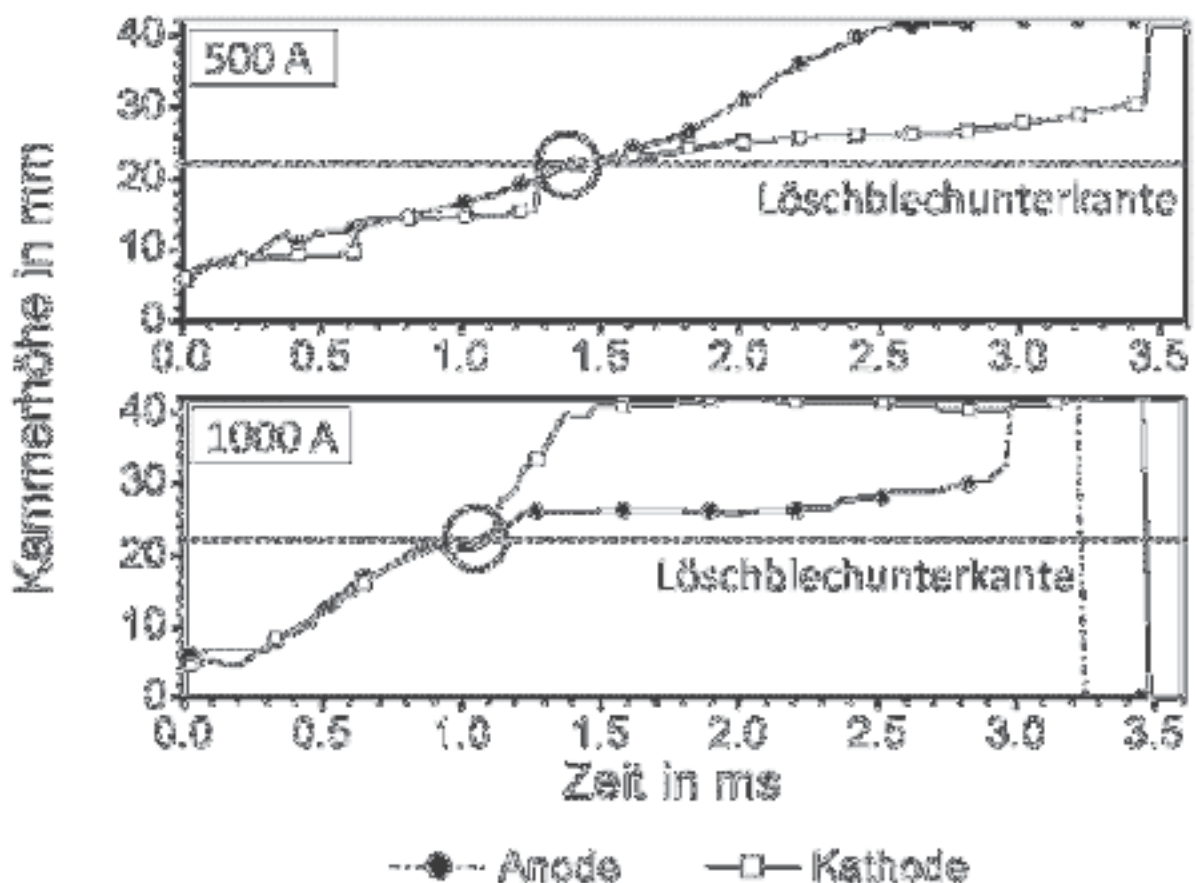


**Bild 4.12:** Ort der Fußpunktzündung auf dem Löschblech aus den in Bild 4.11 gezeigten Versuchen (obere Reihe) und bei höherer Stromstärke von 1000 A (untere Reihe)

des auf dem Blech gebildeten anodischen Fallgebietes.

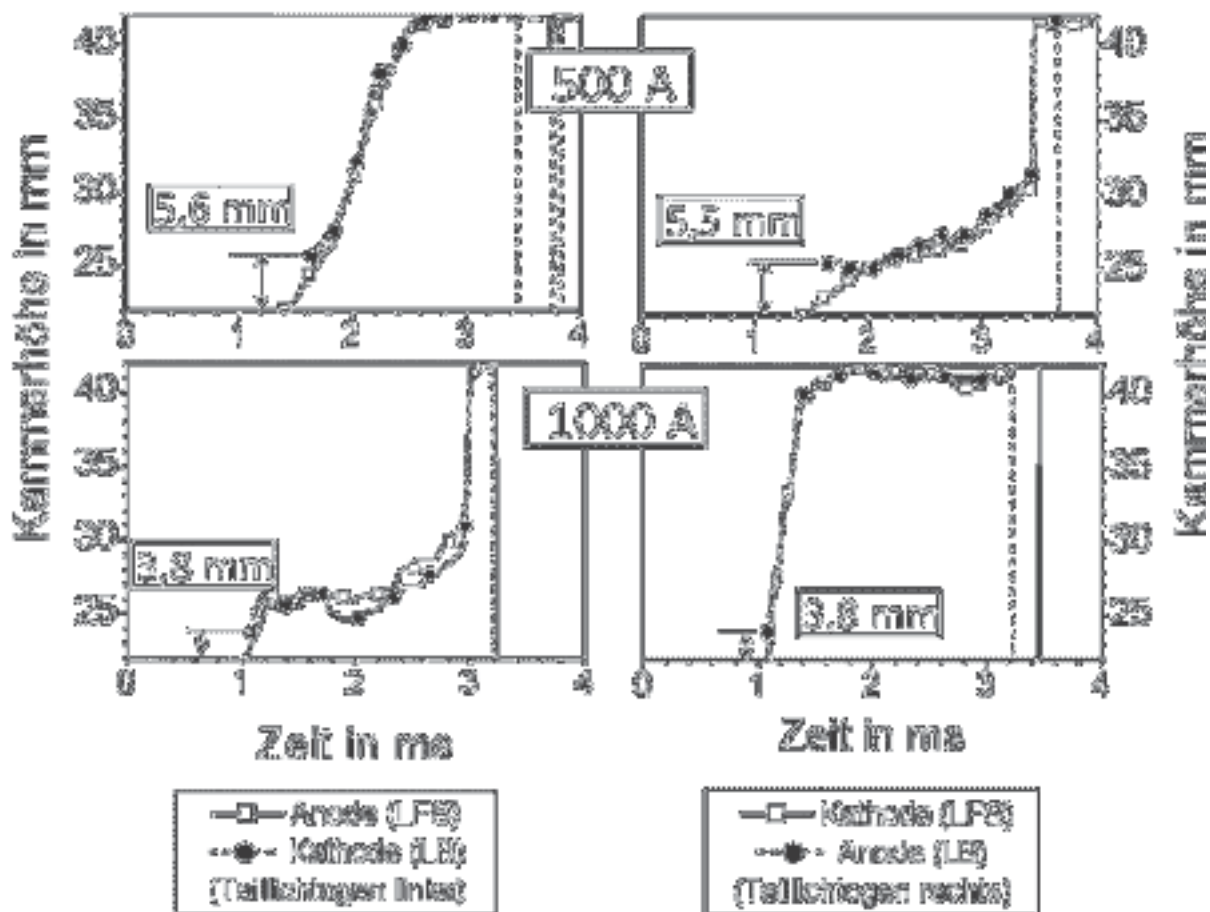
Hierzu sind die Bilder der Schnellfilmaufnahmen zum Zeitpunkt der ersten Fußpunktbildung auf dem Löschblech in Bild 4.12 dargestellt.

Eine Erhöhung der Stromstärke führt durch die stärkeren magnetischen Antriebskräfte auf den Lichtbogen zu einer rascheren Wanderung der Fußpunkte. So wandern beide Laufschienefußpunkte (Bild 4.13, unteres Diagramm) bei 1000 A gleich schnell bis unter die Löschblechkante, an der sich auf beiden Löschblechseiten etwa 3,8 mm hinter der Kante die neuen Fußpunkte auf dem Blech bilden (Bild 4.14, unterer Verlauf). Der rechte Teillichtbogen wandert innerhalb von 200  $\mu$ s bis an die Löschblechoberkante, wohingegen der linke Teillichtbogen in der unteren Löschblechhälfte verhartet.



**Bild 4.13:** Fußpunktwanderung an den Laufschiene (LFS) in Versuchen mit 500 A und 1000 A bei 100 % geöffneter Verdämmung

Der schnelle Sprung des linken Teillichtbogens des 1000 A-Versuches zum Zeitpunkt 3 ms, sowie der Sprung des rechten Teillichtbogens der 500 A-Messung 3,6 ms nach Lichtbogenzündung (Bild 4.14, Diagramm oben rechts) sind auf einen Kurzschluss der beiden Teillichtbögen zu einem Lichtbogen oberhalb des Löschblechs zurückzuführen.



**Bild 4.14:** Fußpunktwanderung an den Laufschiene (LFS) und dem Löschblech (LB) in Versuchen mit 500 A und 1000 A bei 100 % geöffneter Verdämmung UND Höhe der Fußpunktbildung auf dem Löschblech

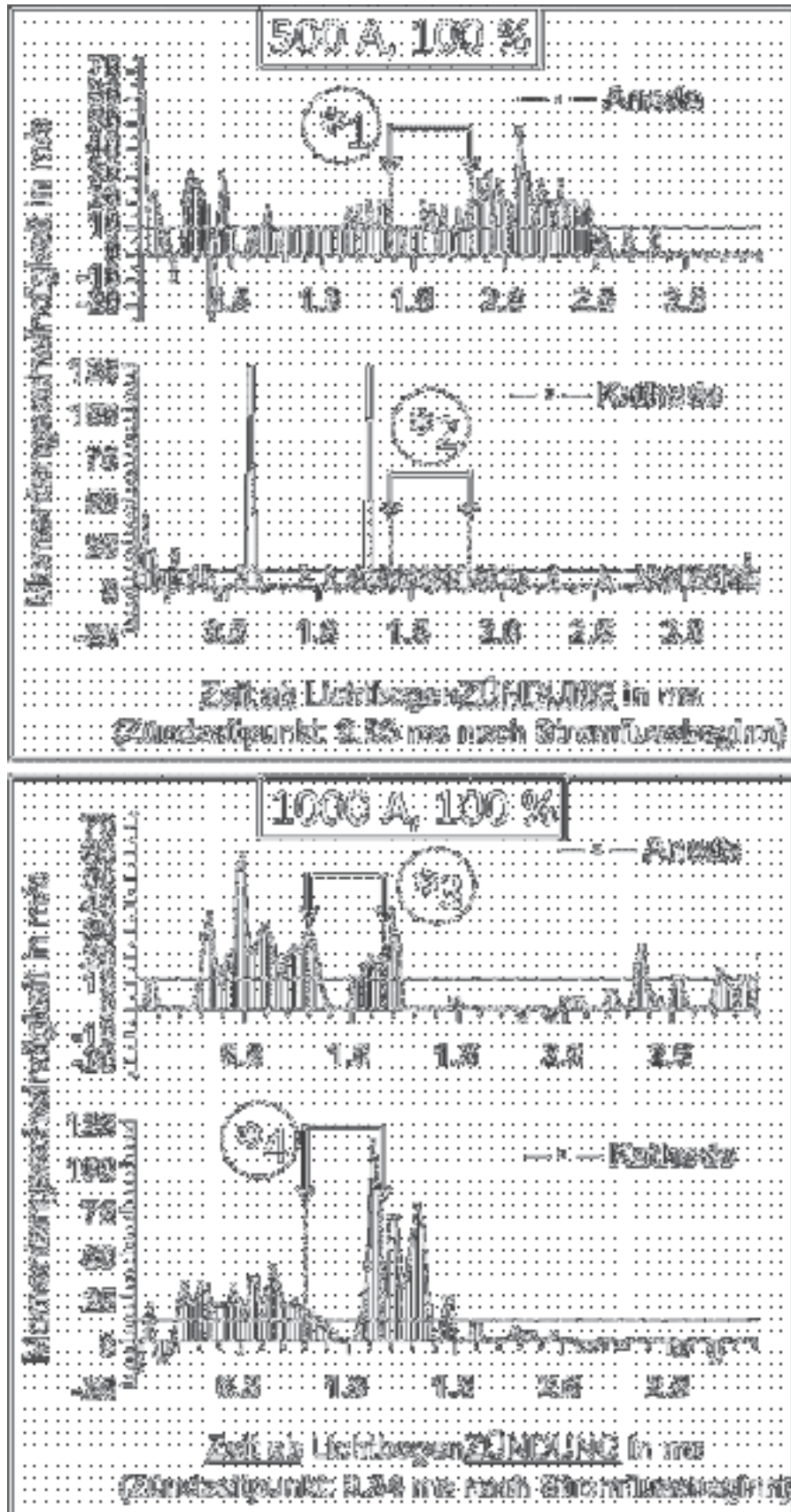
Es zeigt sich, dass in Falle der 1000 A-Messung der rechte Teillichtbogen zuerst an der Löschblechoberkante ankommt, wohingegen bei den Messungen mit 500 A immer der linke Teillichtbogen zuerst an die Blechoberkante wandert. Dies liegt daran, dass der anodische Laufschienefußpunkt bei niedrigen Stromstärken kontinuierlicher wandert als der kathodische Fußpunkt, weshalb sich die anodische Seite des Lichtbogens zuerst um das Blech legt.

### 4.2.2. Wanderungsgeschwindigkeit

Die Kombination aus kontinuierlicher und diskontinuierlicher (sprunghafter) Wanderung der Fußpunkte auf den Laufschiene und auf dem Löschblech erschwert die Bestimmung bzw. Festlegung einer bestimmten Wanderungsgeschwindigkeit der Fußpunkte. Bereits Burkhard [Burk-85] und Amft [Amft-75] weisen auf die stark abweichenden Momentangeschwindigkeiten des Lichtbogens und der Lichtbogenfußpunkte hin und berechnen aus den Momentangeschwindigkeiten eine mittlere Wanderungsgeschwindigkeit, um Vergleichswerte zu erhalten.

Nach Amft [Amft-70] existiert eine mittlere, materialabhängige Geschwindigkeit der Fußpunkte, die den Übergang von der kontinuierlichen in die diskontinuierliche Bewegung kennzeichnet. Für Kupfer liegt diese Grenzgeschwindigkeit bei 25...35 m/s, wobei die Bewegung unterhalb dieser Grenzgeschwindigkeit als diskontinuierlich, oberhalb dieser Geschwindigkeit als kontinuierlich bezeichnet wird. Die Kurvenverläufe im Bild 4.15 zeigen die Momentangeschwindigkeiten eines anodischen und eines kathodischen Laufschienefußpunktes in einem Versuch mit 500 A und 1000 A bei vollständig geöffneter Verdämmung. Es zeigen sich die von [Burk-85] und [Amft-75] beschriebenen starken Unterschiede in den Momentangeschwindigkeiten. Die Bestimmung der mittleren Geschwindigkeiten ergibt 10,5 m/s für den anodischen und 7 m/s für den kathodischen Fußpunkt der 500 A-Messung. Bei 1000 A ermittelt sich die mittlere Geschwindigkeit unabhängig von der Fußpunkt polarität zu etwa 11,3 m/s. Die Werte liegen unterhalb der von Amft [Amft-70] genannten Grenzgeschwindigkeit, so dass von einer diskontinuierlichen Wanderung zu sprechen ist. Die Filmaufnahmen bestätigen dies für den kathodischen Fußpunkt, der sich als stationärer Fußpunkt diskontinuierlich springend fortbewegt. Der anodische Fußpunkt hingegen zeigt in den Filmaufnahmen ein eher kontinuierliches Wanderungsverhalten und bewegt sich ohne Sprünge.

Die auf den Lichtbogen wirkenden eigenmagnetischen Antriebskräfte steigen proportional zum Quadrat des Stromes an [Lin-87].



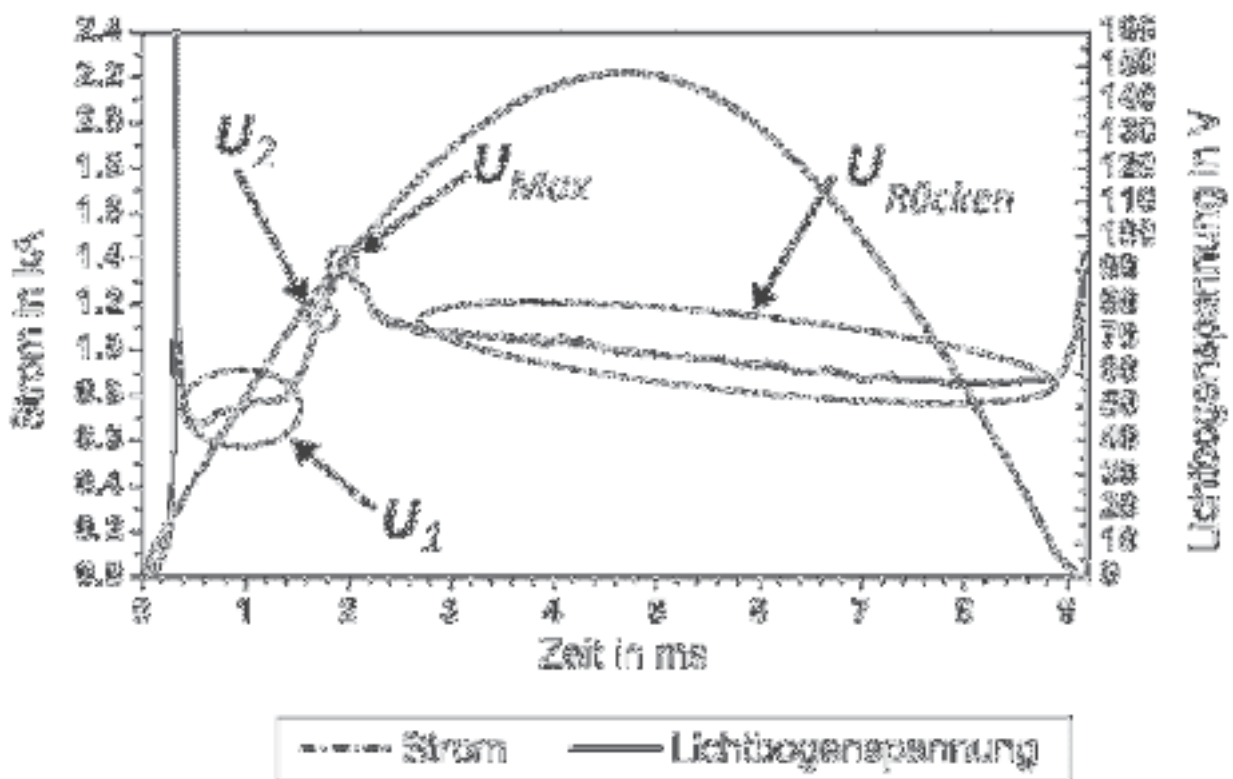
**Bild 4.15:** Momentangeschwindigkeiten des anodischen und des kathodischen Laufschienußpunktes bei  $I = 500 \text{ A}$  (oben) und  $I = 1000 \text{ A}$  (unten) bei 100 % geöffneter Verdämmung

Die im Bild 4.15 markierten Stellen (\*1 bis \*4) kennzeichnen den gesamten Zeitbereich der Lichtbogenunterteilung am Löschblech, beginnend bei der horizontalen Lichtbogenlage unter der Blechkante bis hin zur Unterteilung in zwei Teillichtbögen. Hierbei zeigt sich bei der Messung mit 1000 A (Bild 4.15 \*3 und \*4), dass die Laufschienefußpunkte bei der Annäherung an das Löschblech verlangsamen, einen kurzen Moment verharren und anschließend wieder in Richtung Kammeroberseite weiterwandern. Gleichzeitig mit dem Beginn der Weiterwanderung beginnt der Teilstrom durch das Löschblech anzusteigen (Bild 10.5).

### 4.3. Lichtbogenaufteilung

#### 4.3.1. Spannungserhöhung durch Schleifenbildung

Die Lichtbogen­spannung wird auch in den Anordnungen mit parallelen Laufschiene­n durch Schleifenbildung des Lichtbogens um das Löschblech, durch Kühlung (Energieentzug) der Bogensäule und durch eine lokale Querschnittsreduzierung/Einquetschung an der Löschblechunterkante um den zur

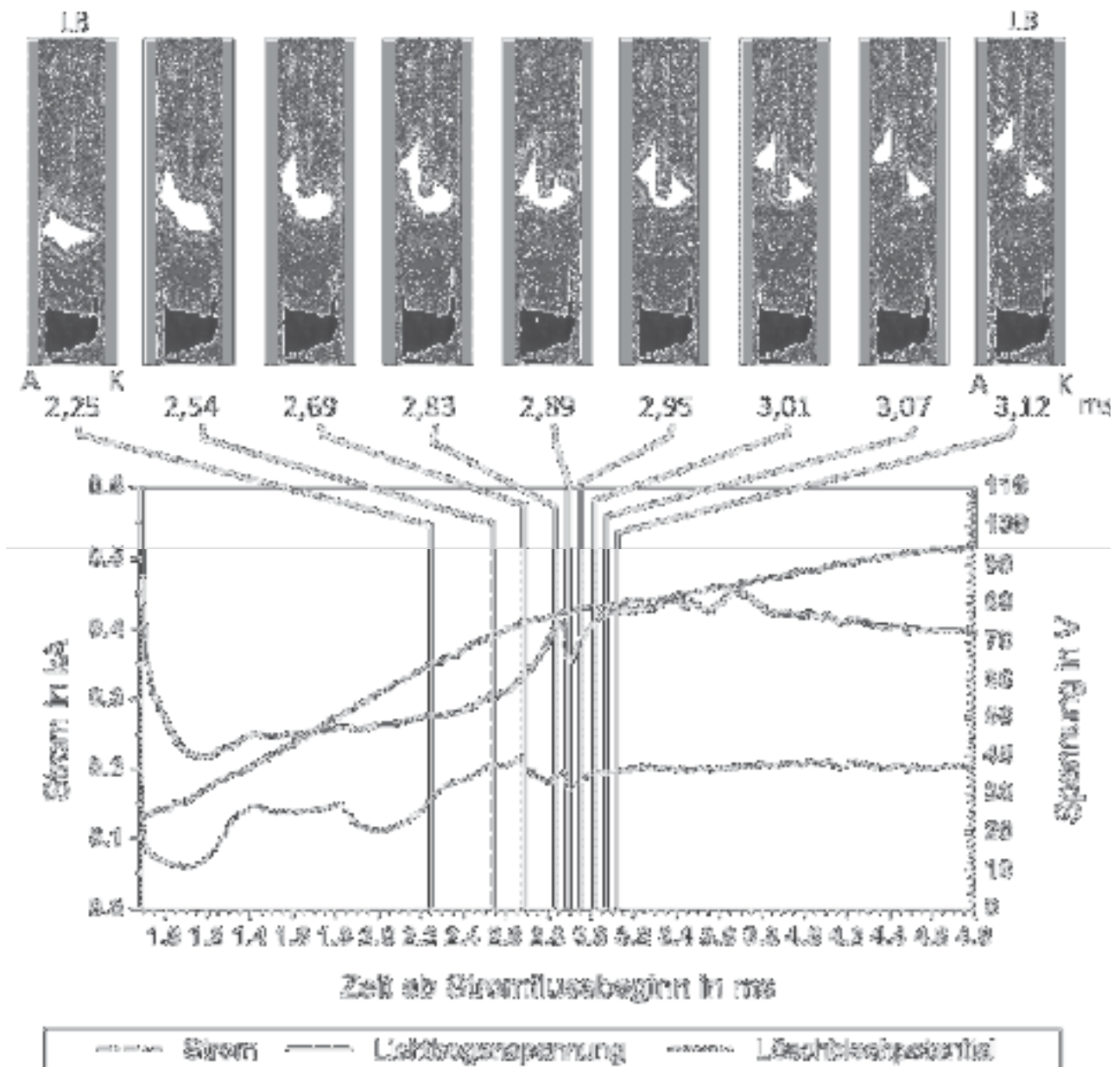


**Bild 4.16:** Oszillogramm einer Messung mit  $I_p = 2.0 \text{ kA}$ , 40 % geöffneter Verdämmung und einem 1 mm dickem massiven Löschblech



Fußpunktbildung notwendigen Betrag erhöht.

Das beispielhafte Oszillogramm im Bild 4.16 zeigt, dass sich die Bestimmung des notwendigen Spannungsbetrages im Gegensatz zu den Untersuchungen an divergierenden Laufschiene einfacher gestaltet, da sich die Bogenspannung  $U_1$  vor der Schleifenbildung auf einem relativ konstanten Niveau bewegt. Nach dem Überschreiten der Spannung  $U_2$  bilden sich Fußpunkte auf dem Löschblech aus. Die



**Bild 4.17:** Oszillogramm einer Messung mit  $I_p = 500 \text{ A}$ , 40 % geöffneter Verdämmung und einem 1 mm dickem massiven Löschblech

Lichtbogenspannung steigt jedoch weiter an, während der Strom vom Pfad vor dem Löschblech in einen Pfad durch das Löschblech kommutiert. Nach dem

Überschreiten einer Maximalspannung  $U_{Max}$  geht die Lichtbogenspannung wieder auf einen niedrigeren Wert  $U_{Rücken}$  zurück, auf dem sie im Folgenden verbleibt. Mit zunehmender Stromstärke fällt dieser „Rückenwert“ im zeitlichen Verlauf leicht ab. Kleinere Schwankungen im Bogenspannungsverlauf vor oder nach der Lichtbogenunterteilung finden ihre Ursache im Wanderungsverhalten des Lichtbogens bzw. der Teillichtbögen.

Das Oszillogramm in Bild 4.17 zeigt den Verlauf des Stromes, der Lichtbogenspannung und des Löschblechpotentials in einer Messung mit 500 A sowie die dazugehörige Lichtbogenposition aus Teilbildern einer Schnellfilmaufnahme.

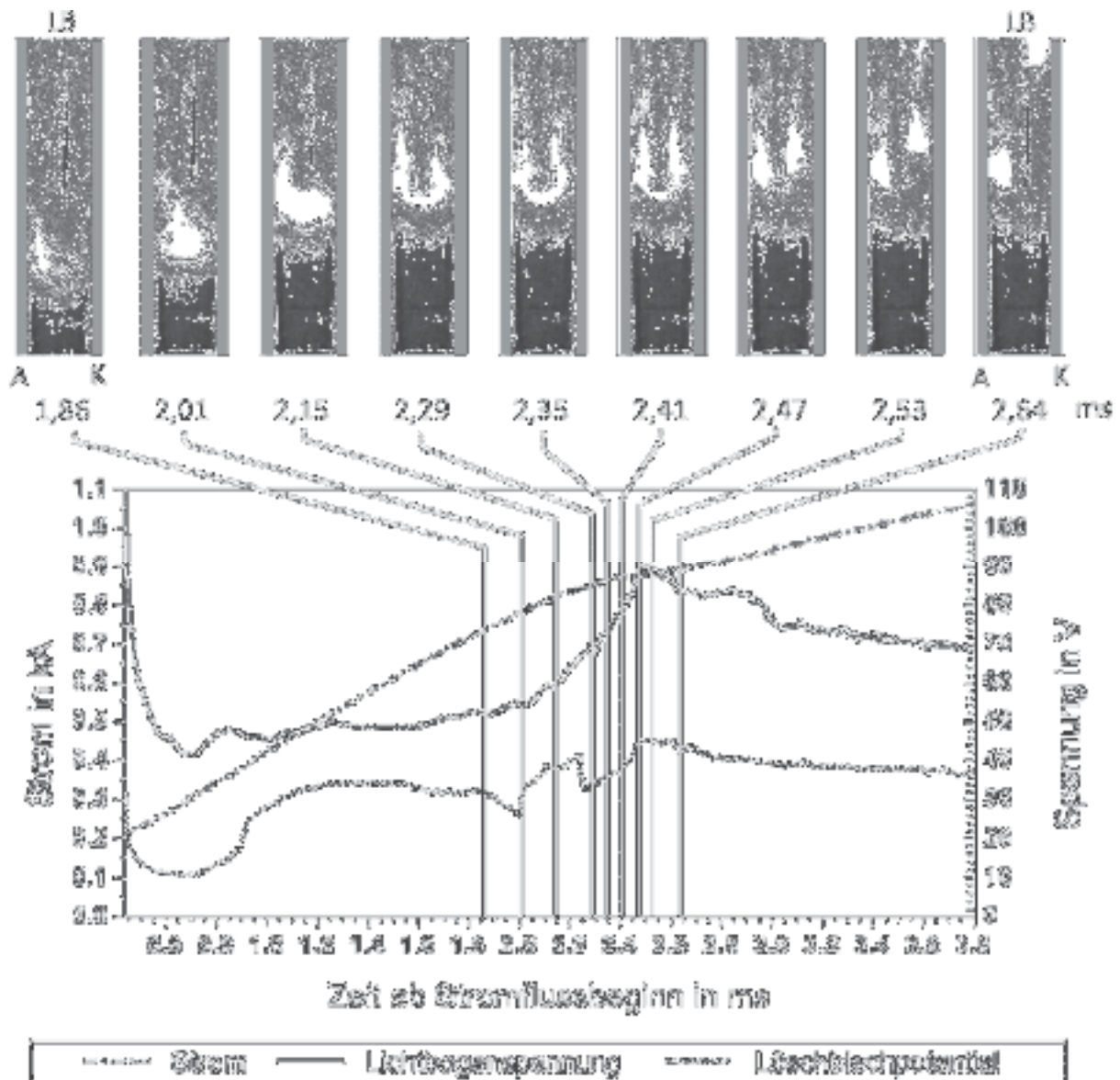
Der Lichtbogenzündung zum Zeitpunkt 0,9 ms folgt die Wanderung in Richtung der Löschblechunterkante. Die Umwölbung des Löschblechs findet im Zeitraum von etwa 2,54 bis 2,95 ms statt. Bis zur Ausbildung der Fußpunkte auf dem Löschblech steigt die Spannung um 22 V (von 50 bis auf 72 V) an.

Die Fußpunkte bilden sich in der unteren Löschblechhälfte, wobei sich der kathodische Löschblechfußpunkt oberhalb des anodischen ausbildet. Die Lichtbogenspannung zeigt kein deutliches Maximum während der Unterteilungsphase.

Das Löschblechpotential folgt im Zeitbereich bis etwa 2,95 ms dem Wert des das Löschblech umgebenden Plasmas. Bis zum Moment der Fußpunktbildung auf dem Löschblech ist dies ein floatender Spannungswert. Ab dem Moment der Fußpunktbildung liegt eine eingeprägte Spannung vor, die auf Grund der mittigen Löschblechposition in etwa der halben Lichtbogenspannung entspricht.

Eine Erhöhung der Stromstärke auf 1000 A ändert die Verhältnisse bei der Lichtbogenunterteilung nicht wesentlich (Bild 4.18). Neben dem früheren Aufteilungsbeginn, der durch die schnellere Bogenwanderung verursacht wird, findet auch hier eine Umwölbung des Löschblechs statt. Der Lichtbogen erstreckt sich im Bereich zwischen dem Löschblech und der Laufschiene weit bis fast auf die halbe Löschblechhöhe, bevor es zur Fußpunktbildung in der unteren Löschblechhälfte kommt. Die starke Einengung des Lichtbogens an der Löschblechvorderkante führt unter der Annahme eines grob konstanten Plasmaleitwertes zu einem Anstieg der Lichtbogenspannung bis auf ein Maximum von etwa 92 V. Nach dem Verlöschen des

Strompfades vor dem Löschblech, d. h. nach dem Aufreißen der Schleife, sinkt die Lichtbogenspannung wieder auf einen Wert zwischen 60 und 70 V (Zeitbereich im Bild 4.18 nicht mehr dargestellt).



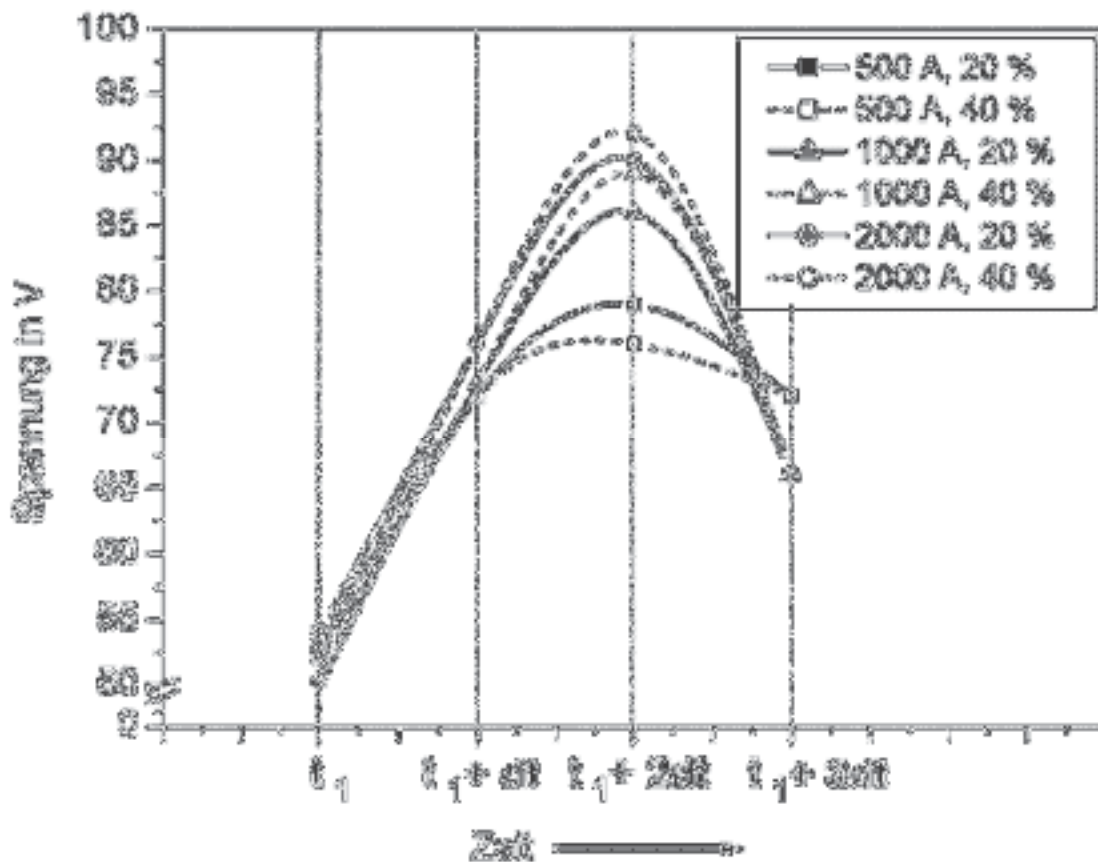
**Bild 4.18:** Oszillogramm einer Messung mit  $I_p = 1000$  A, 40 % geöffneter Verdämmung und einem 1 mm dickem massiven Löschblech

Eine Übersicht über die Spannungserhöhungen durch die Schleifenbildung aus einzelnen Versuchen zeigt die Tabelle 4.1. Zwei der Messungen sind anhand der Lichtbogenposition und der dazugehörigen elektrischen Größen im Bild 4.17 und Bild 4.18 diskutiert worden. Bild 4.19 zeigt den prinzipiellen Verlauf der Lichtbogenspannung während der Unterteilungsphase aus den in Tabelle 4.1 aufgeführten Daten. Der genaue Zeitpunkt im Versuchsablauf, bei dem die

entsprechenden Werte für  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_{Max}$  und  $U_{Rücken}$  ausgewertet wurden, wurde nicht betrachtet.

Strom	Kammertiefe, Verdämmung	$U_1$ /V zum Zeitpunkt $t_1$	$U_2$ /V zum Zeitpunkt $t_1 + dt$	$dU$ /V	$U_{Max}$ /V zum Zeitpunkt $t_1 + 2dt$	$U_{Rücken}$ /V zum Zeitpunkt $t_1 + 3dt$
500A	4mm, 20 %	52	72	20	79	72
500A	4mm, 40 %	50	72	22	76	72
1000A	4 mm, 20 %	52	73	21	86	66
1000A	4 mm, 40 %	54	72	18	89	66
2000A	4 mm, 20 %	54	76	22	90	66
2000A	4 mm, 40 %	52	76	24	92	66

**Tabelle 4.1:** Spannungsverlauf während der Phase der Lichtbogenunterteilung bei 1 mm dicken Löschblechen (Werte für  $U_{Rücken}$  sind Mittelwerte)



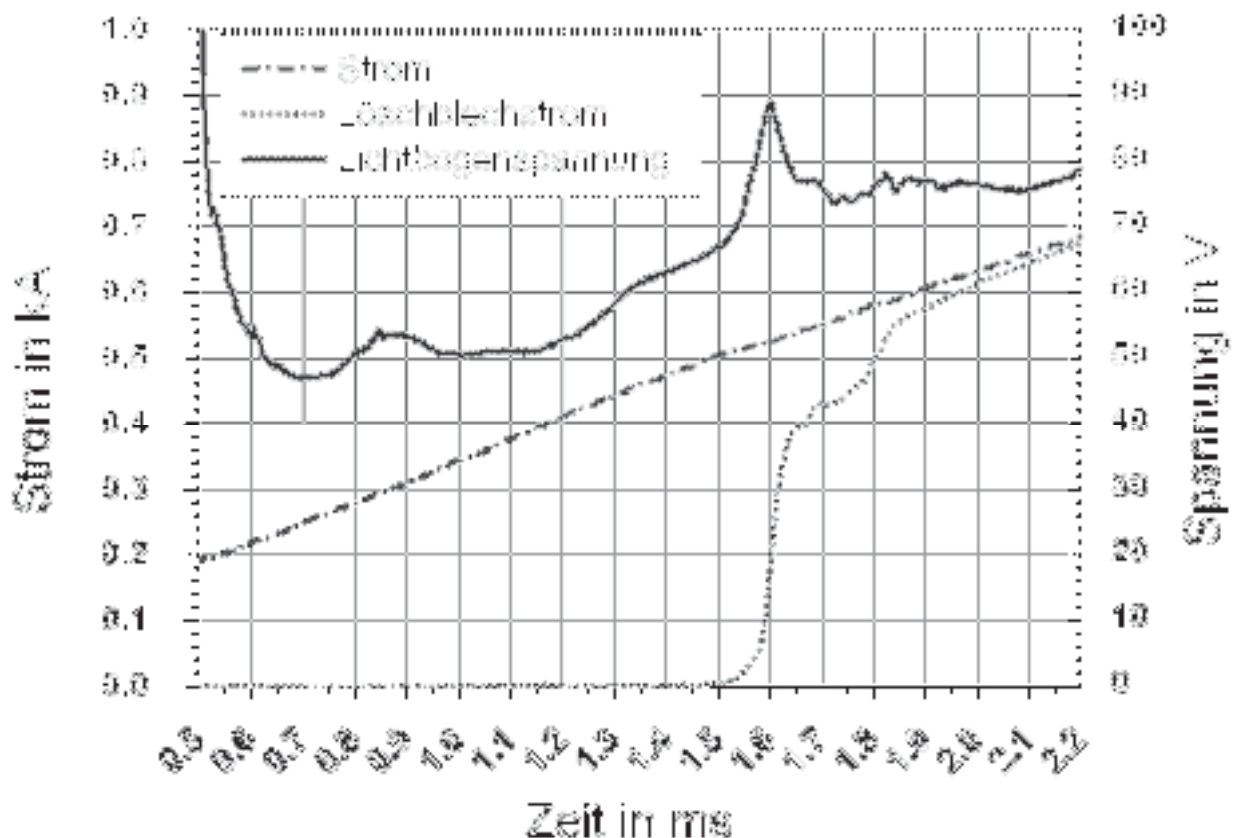
**Bild 4.19:** Anhand der Daten aus Tabelle 4.1 nachgebildeter Verlauf der Lichtbogen­spannung aus Messungen mit einem 1 mm dicken massiven Löschblech

Aus Bild 4.19 geht hervor, dass die Spannungsüberhöhung ( $U_{max}$ ) mit zunehmender Stromstärke zunimmt. Nach Gassmann [Gas-62] wäre ein genau gegenteiliger Zusammenhang zu erwarten, da die „Zündspannung“ mit zunehmender Temperatur der Löschblechoberfläche abnimmt. Die größeren Werte der Spannungsüberhöhung bei höheren Stromstärken können zum einen daran liegen, dass der Lichtbogen im Falle höheren Stromstärken schneller um das Löschblech herumwölbt und die Fußpunkte auf den Elektroden zum Zeitpunkt der Fußpunktbildung auf dem Löschblech höher liegen. Zum anderen kann es an unterschiedlichen „Ausgangszuständen“ der Löschblechoberfläche, wie z. B. Oxidschichten, liegen.

### 4.3.2. Teilstrom durch das Löschblech

In den folgenden Untersuchungen ist das 1 mm dicke massive Löschblech durch ein 2 mm dickes normales Löschblech mit integriertem Messshunt ersetzt.

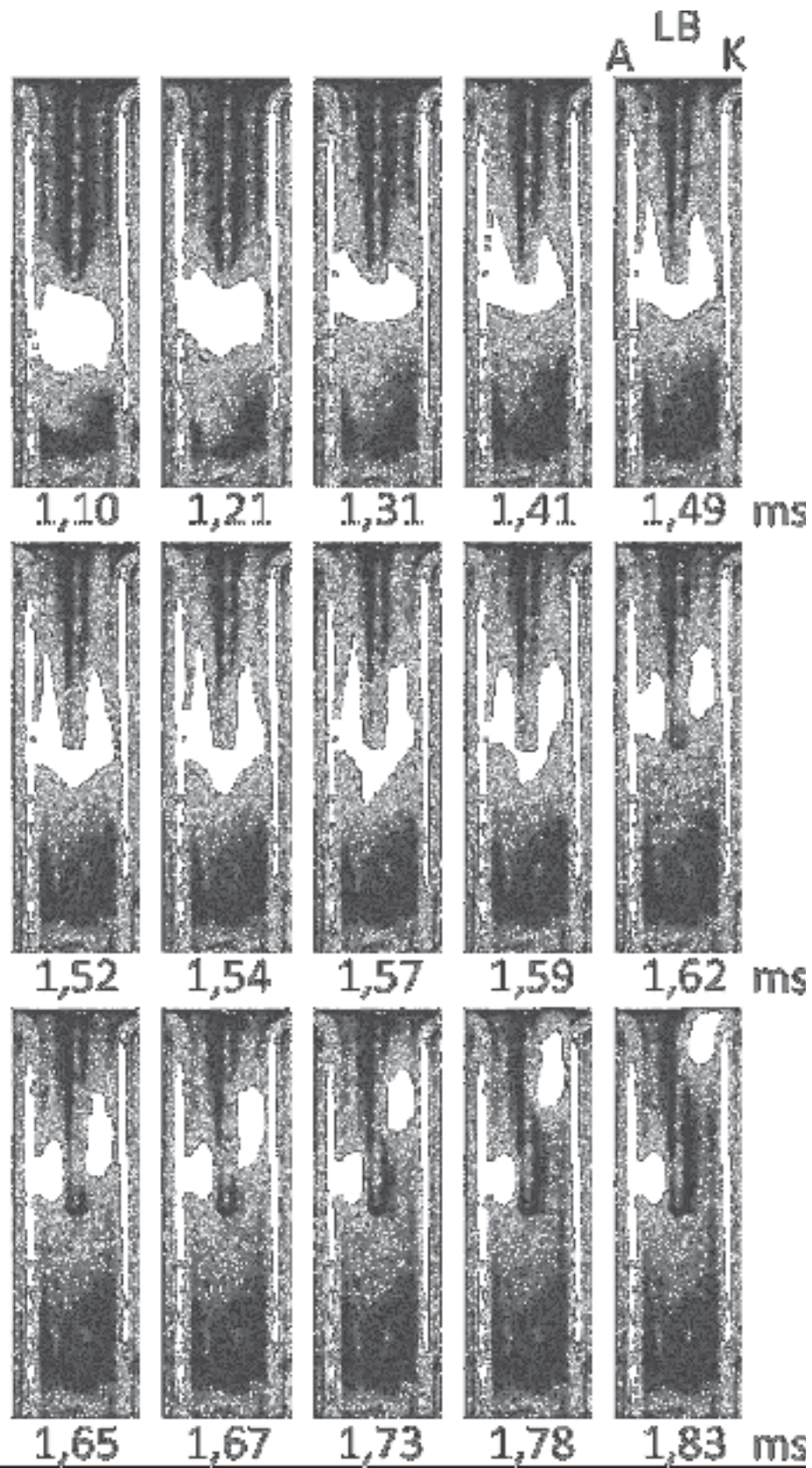
In Bild 4.20 ist das Oszillogramm und in Bild 4.21 die dazugehörigen Teilbilder der Schnellfilmaufnahme eines Versuches bei 1000 A in einer 4 mm tiefen Kammer mit komplett geöffneter Verdämmung dargestellt.



**Bild 4.20:** Oszillogramm einer Messung mit  $I_p = 1000$  A, 100 % geöffneter Verdämmung und einem 2 mm dickem normalen Löschblech

Nach der Lichtbogenzündung bei  $t = 0,5$  ms wandert der Lichtbogen entlang des parallelen Laufschiebenbereiches in Richtung der Löschblechunterkante. Während dieser Zeit liegt die Lichtbogenspannung bei etwa 50 V. Die Spannung steigt im folgenden Zeitabschnitt von 1,17 bis etwa 1,53 ms bis auf etwa 68 V an, da der Lichtbogen an die Löschblechunterkante gedrückt wird und sich um das Löschblech wölbt. Ab  $t = 1,5$  ms beginnt die Phase des ansteigenden Löschblechstroms, wobei auch die Lichtbogenspannung sehr steil anzusteigen beginnt, bis sie ein lokales Maximum von etwa 89 V bei  $t = 1,60$  ms erreicht. Der Strom durchs Löschblech liegt zu diesem Zeitpunkt bei etwa 170 A. Anhand der Schnellfilmbilder in Bild 4.20 wird deutlich, dass das Aufreißen der Lichtbogenschleife kurz nach den lokalen Spannungsmaximum ab 1,62 ms erfolgt. Trotz Verlöschen des alten Strompfades vor dem Löschblech und den gut sichtbaren, neu gebildeten zwei Teillichtbögen ist die Kommutierung des Gesamtstromes auf das Löschblech noch nicht abgeschlossen. Vielmehr verlischt der Strompfad vor dem Löschblech inmitten der Phase des Löschblechstromanstiegs.

Obwohl im unteren Kammerbereich kein Plasmapfad mehr zu erkennen ist und man anhand der Filmbilder davon ausgehen würde, dass bereits der gesamte Strom durch das Löschblech fließt, steigt der Strom durchs Löschblech dennoch weiter. Der untere Kammerbereich ist noch mit heißem, hoch leitfähigem Plasma gefüllt, durch das im Folgenden noch sehr viel Strom am Löschblech vorbeifließen kann. Dieser Anteil nimmt jedoch rasch ab, so dass der Strom durchs Löschblech weiter steigt. Durch das stetige Abwandern des rechten Teillichtbogens in Richtung der geöffneten Kammeroberseite wird der untere Kammerbereich nicht mehr so stark mit Plasma aufgefüllt, wodurch der Anteil des Stromes durch das Löschblech weiter ansteigt und sich ab 1,83 ms dem Verlauf des Gesamtstroms anschmiegt. Die Lichtbogenspannung liegt nun bei etwa 76 – 78 V.



**Bild 4.21:** Teilbilder einer Schnellfilmaufnahme des Versuches aus Bild 4.20

Zusammenfassend lassen sich folgende Daten ermitteln:

$U_1$ / V	$U_2$ / V	$dU$ / V	$U_{Max}$ / V	$U_{Rücken}$ / V (Im Mittel)
50	68	<b>18</b>	89	76-78

Die ausgeprägte Spitze mit anschließendem mehr oder weniger schnellem Abfall der Lichtbogenspannung auf den Wert  $U_{Rücken}$  ist auf den verzögerten Löschblechstromanstieg zurückzuführen. Die Verzögerung ist umso stärker, je abgeschotteter das Kammervolumen unterhalb des Löschblechs ist.

In den Modellschaltkammern mit geringer Tiefe ist die Berührfläche zwischen dem Lichtbogen und dem Löschblech als auch zwischen dem Lichtbogen und den Kammerwänden durch das Einguetschen sehr groß, wodurch sich durch Kühlung und Energieentzug eine erhöhte Lichtbogenspannung einstellt. Das langsame Abwandern der Teillichtbögen in Richtung der Verdämmung führt zu einer kontinuierlichen Aufheizung der umgebenden Kammerwände und des Löschblechs. Dies reduziert den Energieentzug aus dem Plasma und führt in Folge davon zu einer geringeren Brennspannung.

Je tiefer die Kammer ist, desto weniger stark wird der Lichtbogen in der Kammer eingeuetscht. Dies führt zu einem geringeren Energieentzug aus der Lichtbogensäule und in Folge zu einer geringeren Bogenspannung. Ferner zeigt sich kein so stark ausgeprägtes Maximum im Bogenspannungsverlauf (Kapitel 3.3.2.1).



## 5. Simulationen<sup>8</sup>

Die Ergebnisse aus den im ersten und zweiten Teil dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen an Modellschaltkammern mit divergierenden und parallelen Laufschiene dienen dazu, ein möglichst realitätsgetreues Simulationsmodell zur Lichtbogenunterteilung zu erstellen und die damit berechneten Ergebnisse zu überprüfen.

Im folgenden Kapitel werden die Simulationsergebnisse aus Arbeiten von Mutzke [Lin-03], [Lin-04], [Lin-05a], [Lin-05b], [Mut-07] anhand der in den eigenen Versuchen gewonnenen Erkenntnisse mit den in den eigenen Versuchen gewonnenen Erkenntnissen verglichen und diskutiert.

Diese zeigen den zum Druckzeitpunkt dieser Arbeit vorliegenden Stand der Simulationen von Alexandra Mutzke. Da diese Forschungsarbeit noch andauert, sind weitere interessante Ergebnisse zu erwarten, die auf Fachtagungen und in Rahmen einer Dissertation veröffentlicht werden.

### 5.1. Lichtbogenmodellierung

Für die mathematische Beschreibung eines Lichtbogens in dem verwendeten Simulationsmodell wird dieser zunächst in seine Teilgebiete - die beiden Elektrodenfallgebiete und die Lichtbogensäule – zerlegt. Die getrennte Beschreibung der Prozesse in der Lichtbogensäule und in den Elektrodenfallgebieten ist hierbei zwangsläufig nötig, da jeweils sehr unterschiedliche physikalische Randbedingungen vorliegen (Kapitel 1.3).

#### 5.1.1. Lichtbogensäule

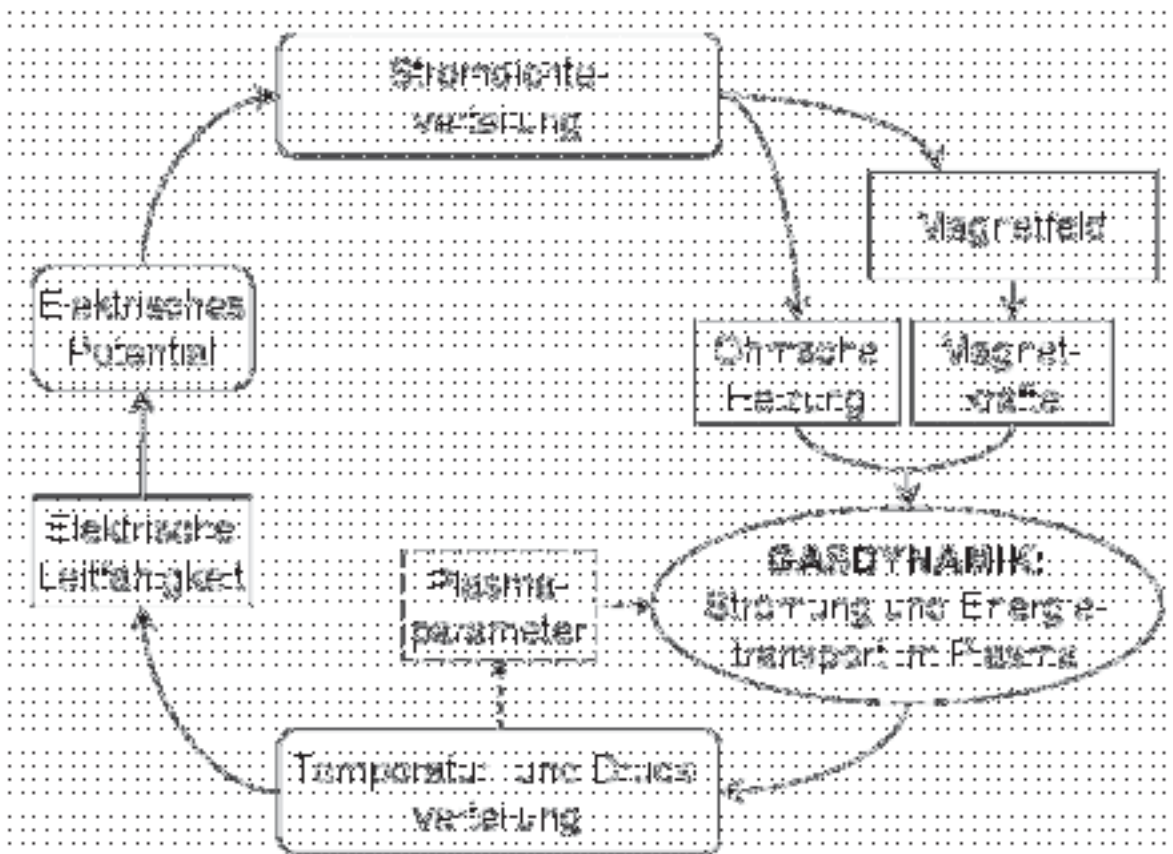
Die Zusammenhänge der physikalischen Größen und Vorgänge in einem stromdurchflossenen Plasma (Lichtbogensäule) sind in Bild 5.1 dargestellt.

Die Stromdichteverteilung im Plasma führt zu einer ohmschen Aufheizung und zusammen mit dem von den stromdurchflossenen Laufschiene und dem Lichtbogen selbst erzeugten Magnetfeld zu einer magnetischen Kraftwirkung auf das Plasma.

---

<sup>8</sup> Die Simulationen zur Lichtbogenunterteilung an einem Löschblech stammen aus den Arbeiten von Frau Dipl.-Ing. Alexandra Mutzke und wurden am Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen durchgeführt.

Hierdurch wird der Strömungs- und Energietransport in Plasma sowie in der weniger leitfähigen, kühleren umgebenden Luft verursacht. Als Ergebnis der Plasma- und Luftströmung stellt sich eine Temperatur- und Druckverteilung ein, die sowohl die elektrische Leitfähigkeit als auch rückwirkend über die Plasmaparameter (wie Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität, Viskosität und Dichte) die Prozesse der Gasdynamik bestimmt. Die elektrische Leitfähigkeit bestimmt wiederum die Potentialverteilung und somit die Stromdichteverteilung im Plasma, wodurch sich der Kreis in Bild 6.1 schließt. Der Lichtbogen stellt den Ort des höchsten Stromflusses dar, der sich entsprechend der Leitfähigkeits- und Potentialverteilung durch die Berechnungen ergibt. Eine strikte Unterteilung in Lichtbogensäule und Luft ist daher nicht nötig, da sie sich auf Grund der Berechnungen „selbsttätig“ einstellt.



**Bild 5.1:** Prozesse in der Lichtbogensäule [Kar-98], [Spring-07]

In dem vom Mutzke verwendeten dreidimensionalen Simulationsmodell werden die zuvor beschriebenen Vorgänge in der Säule mit einem System aus gekoppelten partiellen Differentialgleichungen für die folgenden neun Größen beschrieben:

- Strömungsgeschwindigkeit in x-Richtung
- Strömungsgeschwindigkeit in y-Richtung
- Strömungsgeschwindigkeit in z-Richtung
- Enthalpie bzw. Temperatur
- Dichte
- Elektrisches Potential
- Magnetisches Vektorpotential in x-Richtung
- Magnetisches Vektorpotential in y-Richtung
- Magnetisches Vektorpotential in z-Richtung

Jede dieser Gleichung hat die Form der so genannten „allgemeinen Transportgleichung“:

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\vec{v}\Phi) - \text{div}(\Gamma_{\Phi} \text{grad}\Phi) = S_{\Phi} \quad (5.1)$$

Die Gleichung (6.1) beschreibt den Transport einer physikalischen Größe  $\Phi$  in einem mit der Geschwindigkeit  $v$  strömenden Medium der Dichte  $\rho$ . Sie setzt sich aus folgenden Termen zusammen: Auf der linken Seite befinden sich ein zeitabhängiger Term (Speicherterm), ein konvektiver Term, der den Transport durch die Strömung beschreibt, und ein diffusiver Term, der den Transport entgegen einem Konzentrationsgefälle von  $\Phi$  erfasst. Dabei ist  $\Gamma_{\Phi}$  der Diffusionskoeffizient von  $\Phi$ . Der Term auf der rechten Seite der Gleichung ist der Quellterm, in dem außerdem alle weiteren Terme zusammengefasst werden, die nicht einem der Terme auf der linken Seite der Gleichung entsprechen.

Die Lösung dieses Gleichungssystems hängt auch von den stark nichtlinearen Plasmaparametern des gasförmigen Mediums ab. Karetta und Springstube [Kar-98], [Spring-07] berücksichtigten diese nichtlinearen Materialparameter in ihren Simulationen. Bei den Berechnungen von Mutzke wird zurzeit noch ein konstanter Wert für die Wärmekapazität benutzt [Lin-03], [Lin-04] [Mut-07].

Die Gleichungen werden mit dem kommerziellen Programmpaket CFX-ANSYS gelöst. Eine detaillierte Beschreibung der Simulationsmethoden kann den

Veröffentlichungen entnommen werden [Kar-98], [Lin-02], [Lin-03], [Lin-04], [Spring-07].

### **5.1.2. Elektrodengebiete**

Die elektrisch leitende Verbindung der Lichtbogensäule mit den Elektroden sorgt dafür, dass ein Stromfluss vom Metall in den Gasraum stattfinden kann. In der Realität sieht diese „Verbindung“ derart aus, dass an den Elektroden mehr oder weniger stark kontrahierte Bogenansätze vorliegen, die insbesondere an der kathodischen Elektrode die für den Stromfluss benötigten Elektronen in die Säule emittieren (s. Kapitel 1.3).

Die stark vereinfachte Nachbildung eines thermischen Fußpunktmodells an den Laufschiene ist in den Arbeiten von Karetta [Kar-98] und Springstube [Spring-07] zu finden. Der vorgegebene Gesamtstrom  $I$  wird anhand von stark temperaturabhängigen Faktoren auf die Randelemente der Elektroden verteilt. Die Faktoren werden dabei in Anlehnung an das Richardson Gesetz für Thermoemission berechnet [Kar-98]. Die Stromemission an den Laufschiene erfolgt bei diesem Fußpunktmodell auf Grund der starken Temperaturabhängigkeit des Thermoemissionsanteils nur im heißesten Teil der Elektrode, wodurch die Ausdehnung der Lichtbogenfußpunkte auf eine relativ kleine Fläche begrenzt ist. Dies kann jedoch zu einer unrealistisch hohen Stromdichte führen, weshalb Karetta die Stromdichte entsprechend [Chab-90] auf einen Wert von  $2,5 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$  begrenzt. Karetta sowie Mutzke berücksichtigen in den Simulationen ebenso das Schmelzen des Elektrodenmaterials mit Hilfe einer Ersatz-Wärmekapazität. Das Fußpunktmodell wird sowohl für die Anode als auch für die Kathode verwendet.

Zieht man in der Weiterführung der Untersuchungen von Karetta die Lichtbogenunterteilung an einem oder mehreren Löschblechen mit in Betracht, so muss auch auf den Löschblechen ein Fußpunktmodell für die Fallgebiete der durch die Aufteilung entstandenen Teillichtbögen erstellt werden. Hierzu führte Springstube [Spring-07] Untersuchungen durch.

Anders als beim Stromfluss in den Elektroden ist beim Aufteilungsvorgang auf ein Löschblech der Löschblechstrom nicht bekannt, sondern ein Ergebnis des Prozesses selbst. Die Verwendung eines einfachen metallischen Löschblechs ganz ohne

Nachbildung der Fußpunkte bildet demnach die Realität falsch ab, da das metallische Löschblech mit seinem niedrigen Widerstand den Strompfad im Plasma kurzschließen würde, sobald sich der Lichtbogen dem Löschblech annähert. Aus diesem Grund entwickelten Lindmayer, Springstube und Mutzke ein neues Fußpunktmodell, bei dem der zusätzliche Spannungsbedarf der Fallgebiete auf dem Löschblech berücksichtigt wird [Lin-03], [Lin-04], [Lin-05a], [Lin-05b], [Rue-06] [Spring-07]. Dazu ist in den Untersuchungen von Mutzke das Löschblech komplett von einer 0,1 mm dünnen Elementschicht mit nichtlinearem Widerstand umgeben.

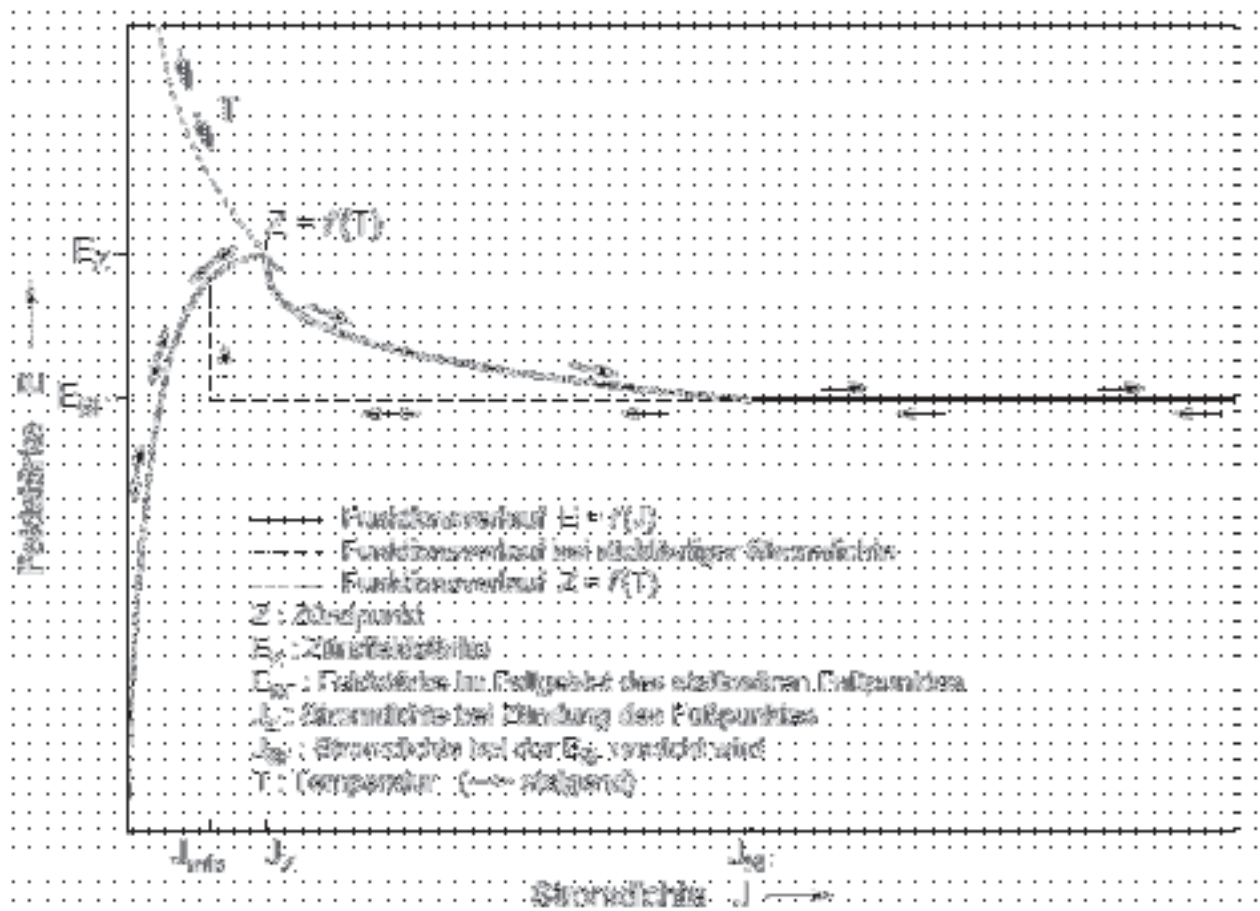
Die zusätzliche Fußpunktschicht in den Simulationen erhöht den Rechenaufwand, weshalb Mutzke zunächst auf die Nachbildung eines Fußpunktmodells an den Laufschiene verzichtet. Hier gilt, dass der Strom an der Stelle aus der Elektrode in den Gasraum eintritt, an der die Leitfähigkeit des Plasmas vor der Elektrode am höchsten, d. h. der elektrische Widerstand am geringsten ist. Diese Randbedingung der Kontinuität des Stromflusses setzt Mutzke bis dato in Ihren Simulationen ein [Lin-03], [Lin-04], [Rue-06]. Hier findet sich auch die Ursache für die bisherige Beschränkung auf kleine Stromstärken in den Simulationen<sup>9</sup>: Im Falle hoher Stromstärken füllt sich die Modellkammer in den Simulationen sehr rasch mit hochleitfähigem Plasma, so dass der Strom entlang der gesamten Laufschienehöhe ins Plasma (in den Gasraum) übergeht. Ein solch diffuses Erscheinungsbild ist zwar in den experimentellen Untersuchungen bei Lichtbögen mit hohen Stromstärken (mehrere kA) zu beobachten, doch liegen hier nach wie vor diskrete Fußpunkte auf den Elektroden vor, aus denen der Strom von den Laufschiene in das Plasma übertritt [Müller-59]. Die reale Existenz paralleler Fußpunkte bei sehr hohen Stromstärken ergibt sich aus der theoretischen Überlegung, dass sich der Lichtbogen auf eine minimale Brennspannung einstellt. Müller [Müller-59] erklärt, dass der Lichtbogen unter der Annahme gleich bleibender Stromdichte bei hohen Stromstärken einen großen Querschnitt aufweist. Unter der Annahme nur eines Fußpunktes wären die Strom führenden Pfade entlang des äußersten Weges des Bogenquerschnitts sehr lang und würden daher eine sehr hohe Brennspannung hervorrufen. Um dies zu vermeiden, d. h. um die Brennspannung auf einem Minimalwert zu halten bilden sich mehrere parallele Fußpunkte auf den Laufschiene aus.

---

<sup>9</sup> Die Stromstärke liegt bei 100 A DC und damit unterhalb der in den Messungen verwendeten Stromstärken. Die Ergebnisse bezüglich der Lichtbogenaufteilung an einem Löschblech sind jedoch als qualitativ richtig zu bewerten.

## 5.2. Modellierung einer Fußpunktschicht auf Löschblechen

Die Modellierung einer Fußpunktschicht wird anhand der in Bild 5.2 dargestellten Kennlinie aus [Spring-07] erläutert.



**Bild 5.2:** Elektrisches Fußpunktmodell als Funktion  $E = f(J)$  mit temperaturabhängiger Zündbedingung in  $Z$ , stationärer Feldstärke  $E_{SF}$  im Fallgebiet und Hystereseverlauf bei rückläufigem Strom [Spring-07]

Zunächst muss die für die Fußpunktbildung notwendige Spannungsdifferenz zwischen den beiden Löschblechseiten durch Schleifenbildung des Lichtbogens um das Löschblech aufgebaut werden. Hierbei ist zu beachten, dass bereits während der Phase der Bogenumwölbung ein Strom durch das Löschblech fließt. Dieser stellt sich aufgrund des wachsenden Potentialunterschieds zwischen den beiden Seiten des Löschblechs bzw. auf Grund der wachsenden Feldstärke  $E$  vor dem Löschblech ein. Die Stromdichte steigt zunächst linear proportional mit der Spannung / Feldstärke vor dem Löschblech an und erreicht nach der Ausbildung des Fußpunktes einen

spannungs- bzw. feldstärkeunabhängigen stationären Endwert. Dieser stationäre Wert entspricht hierbei genau der von der Stromstärke unabhängigen Fallgebietsspannung.

Im Übergangsbereich des linearen Anstiegs der Stromdichte bis hin zum Erreichen des Endwertes durchläuft die Kennlinie ein Maximum, welches die zur Ausbildung von Fußpunkten notwendige Zündspannung / Zündfeldstärke  $E_z$  darstellt. Diese ist nach Angaben von Gassmann [Gas-68] stark von der Temperatur und von der Oberflächenbeschaffenheit des verwendeten Metalls abhängig: Je heißer die Elektrode bzw. das Löschblech, desto geringer ist die zur Fußpunktbildung notwendige Zündspannung. In der Realität bedeutet dies, dass sich Fußpunkte bevorzugt an heißen Elektroden bzw. in heißen Gebieten auf den Elektroden ausbilden. Die Beschaffenheit der Oberfläche hat einen Einfluss auf die Zündfeldstärke, da Feldverzerrungen durch Mikrospitzen zu einem schnellen Überschreiten der Zündfeldstärke führen können.

### **5.3. Simulationen der Lichtbogenunterteilung am Löschblech**

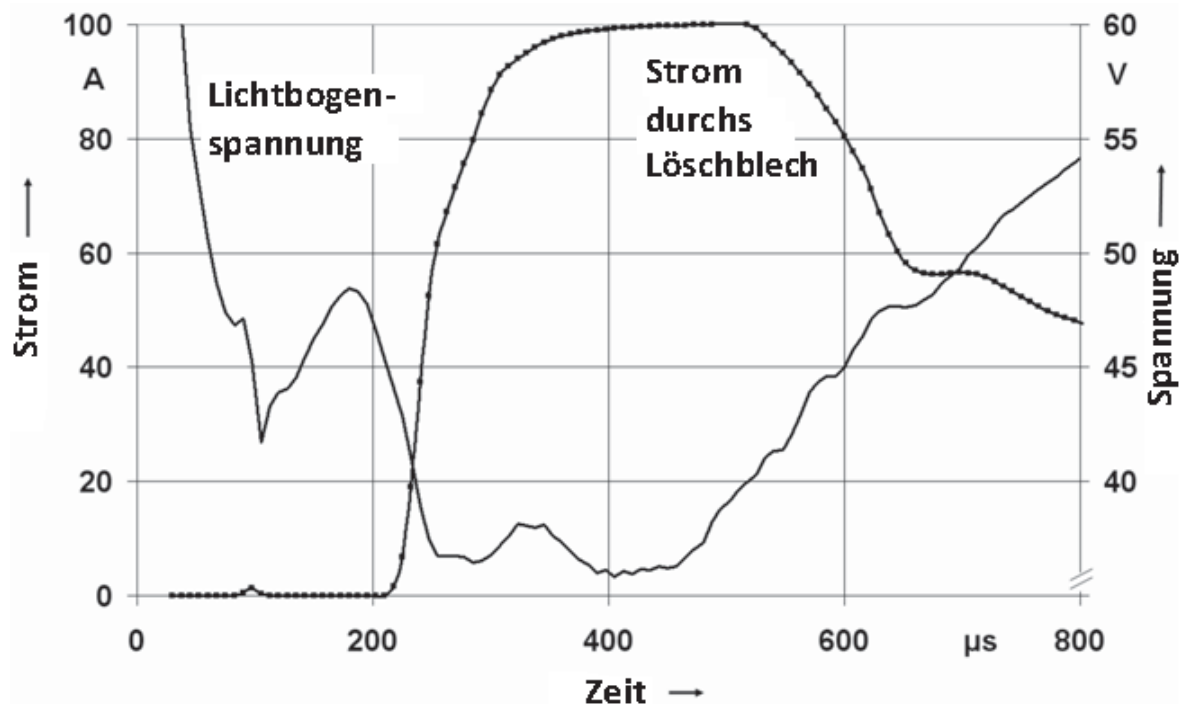
Zunächst werden Simulationen an einem Modell mit parallelen Laufschiene und einem Löschblech vorgestellt, welches in den Abmessungen kleiner ist als das in den Experimenten verwendete Modell. Abweichungen ergeben sich sowohl bei der Löschblechlänge von 7 mm als auch bei der Löschblechbreite von 2 mm sowie bei der Kammerhöhe von 16 mm. Die geometrischen Abweichungen zum Versuchsmodell verändern jedoch die qualitativen Verhältnisse der nachzubilden Lichtbogenunterteilung nicht. Als weitere Vereinfachung wird die Wärmekapazität als konstant angenommen. Für die Laufschiene und das Löschblech<sup>10</sup> werden die Materialdaten von Kupfer verwendet.

---

<sup>10</sup> Im Vergleich zu Stahl unterscheidet sich Kupfer durch seinen Diamagnetismus und hat eine im Vergleich zu Eisen um den Faktor 5 bis 6 höhere elektrische Leitfähigkeit (Kupfer =  $58 \cdot 10^6$  S/m). Auf den Unterteilungsvorgang bei der Verwendung der in Kapitel 5.3.2 und 5.3.3 beschriebenen Fußpunktmodelle hat das Löschblechmaterial keinen wesentlichen Einfluss.

### 5.3.1. Simulation ohne Fußpunktmodell

Lässt man die Kapitel 5.2 geführten Überlegungen zur Modellierung einer Fußpunktschicht außer Acht und simuliert eine Anordnung mit parallelen Laufschiene und einem Löschblech, so ergibt sich der Spannungsverlauf in Bild 5.3.



**Bild 5.3:** Verlauf der Lichtbogenspannung und des Löschblechstroms in einer Simulation ohne Fußpunktmodell [Mut-07]

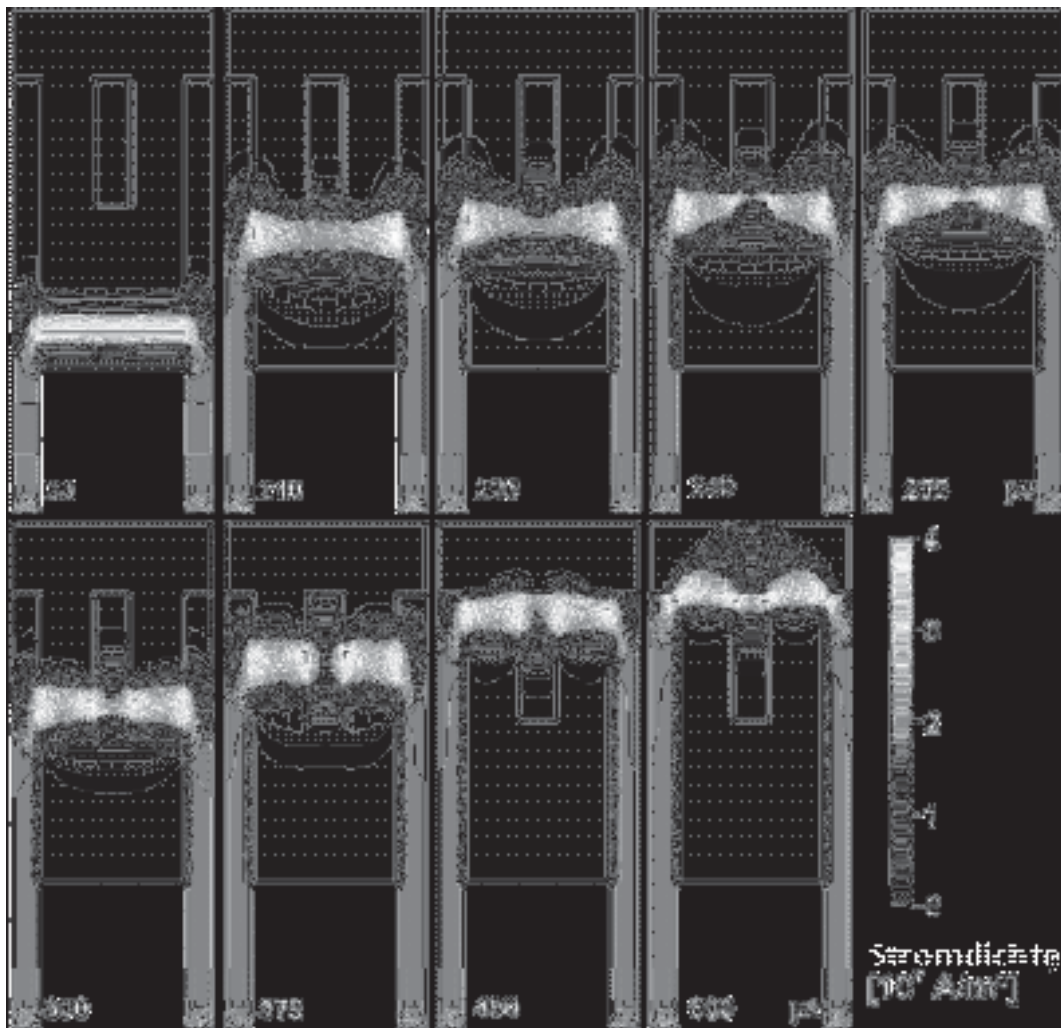
Die Lage des Lichtbogens in der Modellschaltkammer ist anhand der Stromdichteverteilung in Bild 5.4 dargestellt. Es zeigt sich, dass der Teilstrom durch das Löschblech sofort anzusteigen beginnt, sobald der Lichtbogen das Löschblech berührt. Die Ursache hierfür liegt darin, dass die Leitfähigkeit des Löschblechs sehr viel höher ist als die Leitfähigkeit des umgebenden Plasmas. Der Lichtbogen wölbt sich ab 210  $\mu\text{s}$  nicht um das Löschblech, sondern wandert - in zwei Teillichtbögen unterteilt - in Richtung Kammeroberseite.

Die Stromdichteverteilung entlang der Löschblechoberfläche zeigt keine scharf abgrenzbaren Fußpunkte. 450  $\mu\text{s}$  nach der Lichtbogenzündung erreichen die beiden Teillichtbögen die Kammeroberseite und wölben sich in das Ausblasvolumen. Die Lichtbogenspannung steigt daraufhin wieder an, während der Strom durch das



Löschblech ab  $525 \mu\text{s}$  zu sinken beginnt, da ein Teil des Stromes nun außerhalb der Kammer, oberhalb des Löschblechs fließt.

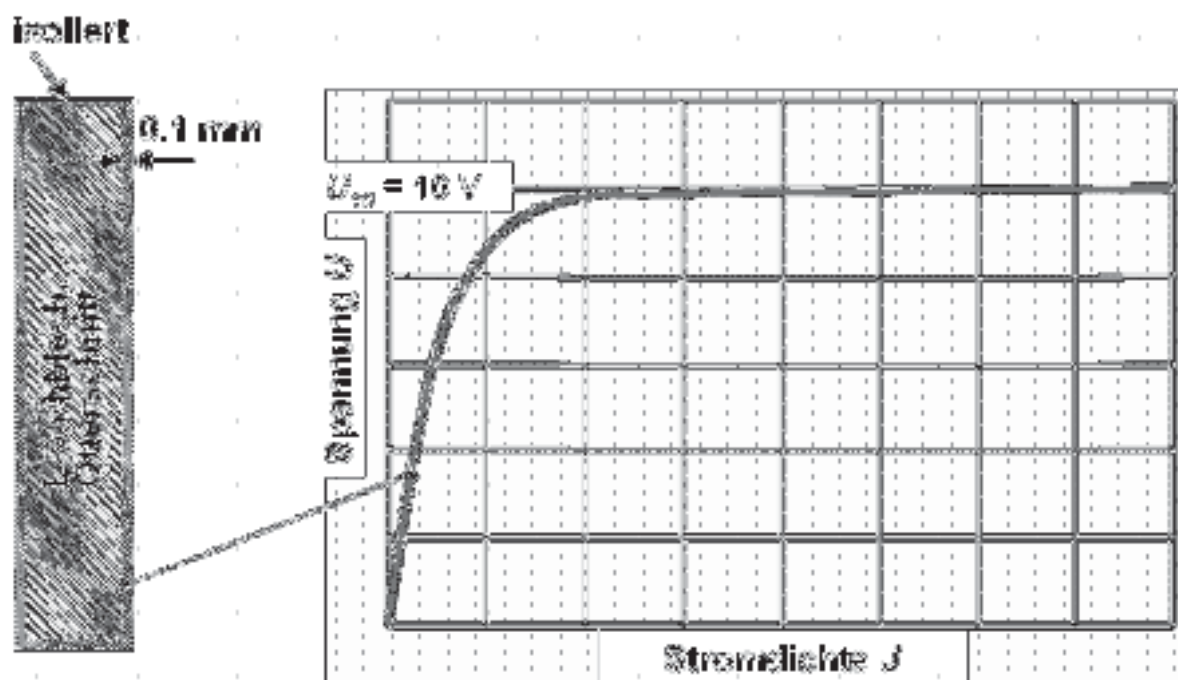
Sowohl der Verlauf der Lichtbogenspannung als auch die fehlende Lichtbogenumwölbung des Löschblechs zeigen, dass die Simulation ohne Fußpunktmodell am Löschblech die Realität der Lichtbogenunterteilung nicht richtig abbildet. Lediglich der Stromfluss außerhalb der Löschblechkammer durch Kurzschluss der beiden Teillichtbögen oberhalb des Löschblechs zeigt sich in der Realität.



**Bild 5.4:** Stromdichteverteilung in einer Simulation ohne Fußpunktmodell aus [Mut-07], Verlauf der elektrischen Größen siehe Bild 5.3

### 5.3.2. Simulation mit Fußpunktmodell ohne Zündspannung

Zur realitätsnäheren Nachbildung der Lichtbogenunterteilung verwendet Mutzke die von Springstube [Spring-07] beschriebene Fußpunktkenlinie, wobei die Zündspannung zunächst unberücksichtigt bleibt. Es ergibt sich die Kennlinie in Bild 5.5 rechts. Links im Bild ist ein Querschnitt durch das Löschblech, mit der umgebenden 0,1 mm dünnen Elementschicht aus stromdichteabhängigem Widerstand dargestellt. Dieser wird anhand der ( $U$ - $J$ )-Kennlinie aus Bild 5.5 (rechts) berechnet.

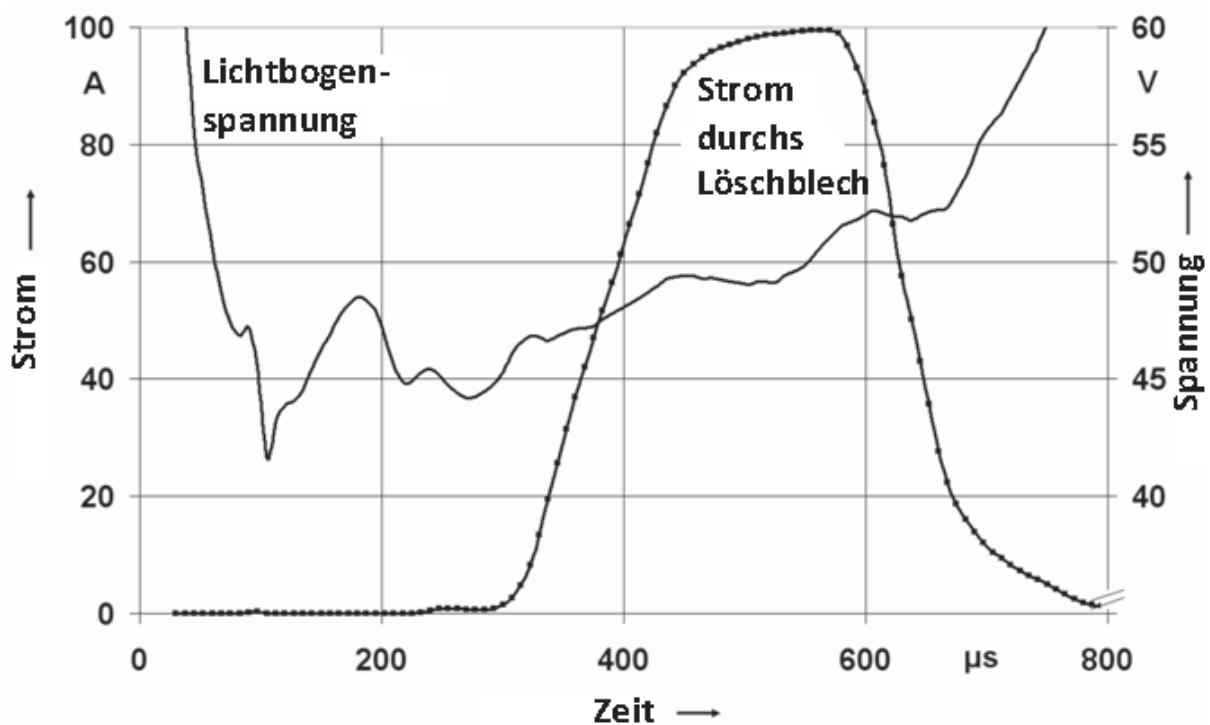


**Bild 5.5:** Elektrisches Fußpunktmodell als Funktion  $U = f(J)$  mit monoton steigender Stromdichte ohne Zündspannung, stationäre Spannung  $U_{10} = 10\text{ V}$

In Bild 5.5 und den bisherigen Simulationen werden Anode und Kathode gleich behandelt, jedoch kann dies durch unterschiedliche Kennlinien auf beiden Blechseiten auch getrennt erfolgen. Wenn Strom durch einen Fußpunkt am Löschblech fließt, ist der Spannungsbedarf nahezu konstant und weitgehend unabhängig von Strom und Stromdichte. Für Ströme oberhalb eines bestimmten Grenzwertes nähert sich daher die Spannung an der Fußpunktschicht asymptotisch dem Wert  $U_{10}$  an. Um einen kontinuierlichen Übergang vom Strom unterhalb des

Löschblechs auf den durch das Löschblech zu ermöglichen, geht die Spannung für kleine Stromdichten gegen null. Das bedeutet, dass bei geringen Spannungsdifferenzen zwischen Löschblech und angrenzendem Plasma auch nur ein kleiner Strom durch das Löschblech fließen kann. Hat die Spannung den Wert  $U_0$  für die Bildung eines neuen Fußpunktes erreicht, so kann ein nahezu unbegrenzter Strom durch diesen Fußpunkt und das Löschblech fließen. Der Strom kommutiert in einer endlichen Zeit aus dem alten Plasmapfad vor dem Löschblech durch den neuen Pfad durch das Löschblech, genauer gesagt durch die am Fußpunkt „beteiligten“ Elemente der Widerstandsschicht und durch das in „Innern“ liegende Blech. Während der Kommutierungsphase koexistieren der alte und der neue Strompfad.

Das Ergebnis der Berechnungen mit der in Bild 5.5 gezeigten Fußpunktkenlinie ist am Verlauf der elektrischen Größen in Bild 5.6 dargestellt.



**Bild 5.6:** Verlauf der Lichtbogen-spannung und des Löschblechstroms in einer Simulation mit Fußpunktmodell mit monoton steigender Spannung [Mut-07]

Der Lichtbogen legt sich im Zeitbereich von 210 bis 310  $\mu\text{s}$  schleifenförmig um das Löschblech und die ersten Fußpunkte bilden sich 0,8 mm oberhalb der Löschblechunterkante aus.

Die Fußpunkte wandern im Folgenden kontinuierlich in Richtung der Kammeroberseite, wobei der Anteil des Löschblechstromes stetig steigt. 570  $\mu\text{s}$  nach der Zündung verlöscht der Strompfad vor der Löschblechunterkante und der gesamte Strom fließt durch das Löschblech. Die Lichtbogenspannung steigt in diesem Zeitraum bis auf etwa 50 V an. Die Teillichtbögen verbinden sich auch in dieser Anordnung oberhalb des Löschblechs, wodurch der Teilstrom durch das Löschblech sinkt, und die Lichtbogenspannung durch die Aufweitung und Kühlung der Bogensäule im Ausblasvolumen ansteigt. Die maximale Stromdichte in den Fußpunkten liegt bei  $5 \cdot 10^7 \text{ A/m}^2$ .

Bereits die Implementierung eines Fußpunktmodells mit monoton steigender Kennlinie (Bild 5.5) bildet den Unterteilungsprozess hinsichtlich der Schleifenbildung des Lichtbogens und der damit verbundenen Fußpunktbildung oberhalb der Löschblechunterkante gut nach. Der Anstieg der Lichtbogenspannung während der Schleifenbildung von etwa 1,8 V liegt jedoch weit unter den in den Messungen festgestellten Werten von etwa 18 – 24 V (Kapitel 4.3.1). Ferner ist die Fußpunktstromdichte sowohl im Vergleich zu den Literaturangaben [Lin-92], [Chab-90], [Nacht-88] als auch im Vergleich zu den in den eigenen Untersuchungen bestimmten Fußpunktstromdichten (Kapitel 3.7) um mindestens eine halbe Größenordnung zu niedrig.

### **5.3.3. Simulation mit Fußpunktmodell mit Zündspannung**

In Simulationen mit der in Bild 5.7 a gezeigten Fußpunktkenlinie mit Zündspannung treten erstmals auch parallele Fußpunkte auf dem Löschblech in den Simulationen auf. Dies zeigen die Ergebnisse anhand der Stromdichteverteilung in Bild 5.7 b. Die in der Realität sehr häufig auftretende Ausbildung von parallelen Fußpunkten, bestimmt ganz wesentlich das Wanderungsverhalten und die Wanderungsgeschwindigkeit des Lichtbogens.

In Untersuchungen zur Höhe der Zündspannung zeigt Mutzke, dass diese einen Einfluss auf den Verlauf des Spannungsanstiegs während der Schleifenbildung, die Dauer der Schleifenbildung, die Höhe der Fußpunktbildung auf dem Löschblech und

die Fußpunktstromdichte hat [Mut-07]. Für zu hohe Werte der Zündspannung teilt sich der Lichtbogen in den Simulationen nicht auf, da die Schleifenspannung die Zündspannung nicht erreicht bzw. überschreitet. Werte der Zündspannung von 17,1 oder 19,7 V führen zur Bogenunterteilung mit realitätsnahen Fußpunktstromdichten und „Zündorten“ 3-4 mm oberhalb der Löschblechunterkante. Dies ähnelt den in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Beobachtungen in den experimentellen Untersuchungen.

## 6. Zusammenfassung

### 6.1. Experimentelle Untersuchungen

Es wurden experimentelle Untersuchungen zur Lichtbogenaufteilung an Löschblechen in Modellschaltkammern mit divergierenden und parallelen Laufschiene durchgeführt. Hierbei wurden sowohl massive Stahlloeschbleche als auch speziell präparierte Löschbleche mit integriertem Messshunt benutzt. Der Aufbau des Messshunts wird detailliert erklärt. Neben der Kammertiefe wurden der prozentuale Ausblasquerschnitt und die Stromstärke variiert.

Die Untersuchungen dienen der Datengewinnung für ein Simulationsmodell zur Nachbildung der Lichtbogenaufteilung an Löschblechen<sup>11</sup>. Daher wurden die Versuche an Modellschaltkammern durchgeführt, die dem Simulationsmodell angepasst wurden:

- fest montierte Laufschiene ohne Kontaktplättchen und ohne Kontaktöffnungsbewegung -> kein Antrieb
- Lichtbogenzündung mittels eines 0,1 mm dicken Kupferdrahtes
- ein mittig zwischen den Laufschiene positioniertes, rechteckiges Löschblech ohne die Wanderung und Unterteilung des Lichtbogens beeinflussende Schlitze oder sonstige geometrischer Änderungen.

Jeder der Versuche wurde mittels einer digitalen Schnellfilmkamera aufgezeichnet, um die Lichtbogenbewegung sowie den Unterteilungsvorgang, bestehend aus Berührung der Löschblechunterkante, Schleifenbildung und Umwölbung des Löschblechs, Ausbildung von Fußpunkten auf den Blechoberflächen und Wanderung der beiden Teillichtbögen zu beobachten.

Die Untersuchungen und Auswertungen der Filmaufnahmen ergaben folgende Ergebnisse:

- Die Lichtbogenzündung mittels eines quer zwischen den Laufschiene gespannten, 0,1 mm dicken Zünddrahtes ergibt die geringste Streuung in den Zündstromstärken und den Zündzeitpunkten. Für die Verwendung in den

---

<sup>11</sup> Die Simulationen zur Lichtbogenunterteilung an einem Löschblech werden von Frau Dipl.-Ing. Alexandra Mutzke am Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen durchgeführt

Simulationen ergeben sich folgende mittlere Werte für die Zündstromstärke: 145 A bei  $I_p=500$  A ; 180 A bei  $I_p=1000$  A ; 288 A bei  $I_p=2000$  A.

- Bei der Aufteilung eines Lichtbogens an einem Löschblech legt er sich zunächst schleifenförmig darum. Dadurch erhöht sich der Betrag der Lichtbogen Spannung mindestens um den Wert, der zur Ausbildung von Fußpunkten auf den beiden Löschblechseiten nötig ist. In Kammern mit divergierenden Laufschiene ergaben sich Erhöhungen der Lichtbogen Spannung während der Schleifenbildung um das Löschblech im Bereich zwischen 16 und 25 V.
- Die Verwendung von präparierten Löschblechen beeinflusst die Lichtbogenunterteilung im Vergleich zu massiven Eisenlöschblechen nicht. Dies zeigen die Orte, die Form und die Anzahl der durch die Fußpunkte auf den Blechoberflächen verursachten Aufschmelzungen.
- Insbesondere bei hohen Stromstärken bilden sich sowohl auf den Laufschiene als auch auf den Löschblechen mehrere parallele Fußpunkte aus. Je nachdem, wie stark die Kammer mit Plasma gefüllt ist, d. h. wie groß das Kammervolumen ist bzw. wie weit die obere Kammerverdämmung geöffnet ist, bilden sich durch den Kontakt des Plasmas mit der Blechoberfläche mehr oder weniger parallele Fußpunkte entlang der gesamten Löschblechhöhe aus.
- Bereits vor der sichtbaren Ausbildung von Plasmastrahlen/Fußpunkten auf der Löschblechoberfläche kann ein Teilstromfluss durch das Löschblech registriert werden. Die Ursache hierfür liegt darin, dass durch die Lichtbogenumwölbung ein unterschiedliches Potential an den beiden Löschblechseiten anliegt, wodurch ein Stromfluss durch das Blech einsetzt. Überschreitet die Stromdichte nun lokal einen gewissen Mindestwert, so bildet sich ein Plasmastrahl auf dem Löschblech aus.
- Die Stromdichte in den Löschblechfußpunkten konnte mit Hilfe der Schnellfilmaufnahmen, der Löschblechoberflächen und des Teilstromes durch das Löschblech auf Werte von  $0,2 - 5 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$  bestimmt. Als Unsicherheit der Stromdichtebestimmung und Streuung der Werte über knapp eine Größenordnung ergeben sich die Kammertiefe sowie die Höhe der untersuchten Stromstärke. Hohe Stromstärken schmelzen die Blechoberflächen stark auf, wodurch die Zuordnung einzelner, klar

abgrenzbarer Flächen zu einzelnen in den Filmaufnahmen zu erkennenden Fußpunkten nicht mehr eindeutig erfolgen kann.

- In der Mehrzahl der Versuche fließt zu fast keinem Zeitpunkt der gesamte Strom durch das Löschblech. Vielmehr kommt es – je nach Lage der beiden Teillichtbögen innerhalb der Kammer - zu Stromflüssen unter- oder oberhalb des Löschblechs. Der Anteil des Löschblechstroms am Gesamtstrom wurde im Kapitel 3.4 bei Messungen mit 500 A und unterschiedlicher Kammertiefe auf Werte zwischen 60 und 95 % bestimmt. Weitere Untersuchungen zeigen, dass der Anteil bei konstantem Kammervolumen mit zunehmender Stromstärke abnimmt, da sich der Lichtbogen als breites Plasmaband in die Kammer legt: Bei geringer Verdämmungsöffnung in den unteren divergierende Kammerbereich und bei weiter geöffneter Verdämmung zwischen die Laufschiene und das Löschblech.
- Die aufgeschmolzenen Löschblechoberflächen zeigen, dass die anodischen Fußpunktegebiete auf dem Blech immer großflächiger aufgeschmolzen sind als die Kathodischen. Die angeschmolzenen Flächenanteile steigen mit zunehmender Stromstärke an. In den 4 mm tiefen Kammern verteilen sie sich gleichmäßig entlang der gesamten Löschblechhöhe und in den 8 mm und 12 mm tiefen Kammern liegen die Anschmelzungen schwerpunktmäßig in der oberen Löschblechhälfte.
- Die Extrapolation der Säulenlänge eines zwischen zwei massiven Blechen brennenden Lichtbogen auf den Wert 0 mm ergibt eine Spannung für die Summe aus Anoden- und Kathodenfall von 20-22,3 V.
- In Kammern mit parallelen Laufschiene zeigen sich Erhöhungen der Lichtbogen Spannungen von etwa 18-24 V.
- Auf Grund der Schleifenbildung des Lichtbogens um das Löschblech und der damit verbundenen Erhöhung um die für die Aufteilung notwendige Mindestspannung bilden sich die Fußpunkte nicht direkt an der Löschblechunterkante aus, sondern etwa 3,8 – 5,0 mm oberhalb dieser.
- Die Fußpunkte an den parallelen Laufschiene bewegen sich im Stromstärkebereich bis 1000 A mit einer geringen mittleren Geschwindigkeit, wobei der kathodische Fußpunkt mit zunehmender Stromstärke kontinuierlicher wandert als bei niedrigen, bei denen er sich als



nichtstationärer Fußpunkt durch Sprünge an der Laufschiene fortbewegt. Der anodische Fußpunkt zeigt bereits bei geringeren Stromstärken eine Art quasikontinuierliches Wanderungsverhalten, wodurch der an ihn angeschlossene Teillichtbogen dem an der Kathode angeschlossenen Bogen meist vorauswandert. Bei höheren Stromstärken tritt dieses bevorzugte Vorauswandern nicht mehr auf

## 6.2. Simulationen

- Die Simulationen ohne ein Fußpunktmodell an den Laufschiene haben gezeigt, dass eine in den experimentellen Untersuchungen beobachtete Lichtbogenumwölbung des Löschblechs nicht stattfindet. Ferner zeigt der Verlauf der Lichtbogenspannung keine Spannungserhöhung vor der Ausbildung/Zündung der Fußpunkte auf dem Löschblech. Lediglich der Stromfluss außerhalb der Löschblechkammer durch Kurzschluss der beiden Teillichtbögen oberhalb des Löschblechs zeigt sich in der Realität.
- Die Implementierung eines Fußpunktmodells mit monoton steigender Kennlinie bildet den Unterteilungsprozess hinsichtlich der Schleifenbildung des Lichtbogens und der damit verbundenen Fußpunktbildung oberhalb der Löschblechunterkante gut nach. Der Anstieg der Lichtbogenspannung während der Schleifenbildung von etwa 1,8 V liegt jedoch weit unter den in den Messungen festgestellten Werten von etwa 18 – 24 V (Kapitel 4.3.1). Ferner ist die Fußpunktstromdichte sowohl im Vergleich zu den Literaturangaben [Lin-92], [Chab-90], [Nacht-88] als auch im Vergleich zu den in den eigenen Untersuchungen bestimmten Fußpunktstromdichten (Kapitel 3.7) um mindestens eine halbe Größenordnung zu niedrig.
- In den Simulationen mit Fußpunktmodell und einer Zündspannung zeigt sich, dass diese einen Einfluss auf den Verlauf des Spannungsanstiegs während der Schleifenbildung, die Dauer der Schleifenbildung, die Höhe der Fußpunktbildung auf dem Löschblech und die Fußpunktstromdichte hat [Mut-07]. Für zu hohe Werte der Zündspannung teilt sich der Lichtbogen in den Simulationen nicht auf, da die Schleifenspannung die Zündspannung nicht erreicht bzw. überschreitet. Werte der Zündspannung von 17,1 oder 19,7 V führen zur Bogenunterteilung mit realitätsnahen Fußpunktstromdichten und „Zündorten“ 3-4 mm oberhalb der Löschblechunterkante.

## Anhang

### 7. Literaturverzeichnis

- [Andr-01] Andre, G.: Simulation der Bewegung magnetisch beblasener Lichtbögen zwischen divergenten Laufschiene. 16. VDE Fachtagung „Kontaktverhalten und Schalten“, Karlsruhe 2001, VDE Fachbericht 57, VDE-Verlag Berlin 2001
- [Amft-70] Amft, D.: Über die Lichtbogenwanderung im Bereich geringer Geschwindigkeiten, 5. Internationale Tagung über elektrische Kontakte, München, 1970
- [Amft-75] Amft, D.: Die Lichtbogenwanderung als Ergebnis unterschiedlicher Bewegungsereignisse und mit besonderer Berücksichtigung der Vorgänge an den Elektroden, Dissertation, TH Ilmenau, 1975
- [Beer-73] Beer, F.: Die Druckentwicklung während des Ausschaltvorgangs in geschlossenen Niederspannungs-Lichtbogenlöschkammern und ihre Berücksichtigung bei dessen Dimensionierung, Dissertation TH Ilmenau, 1973
- [Behr-80] Behrens, N.: Lichtbogenwanderung in Leitungsschutzschaltern, Dissertation TU Braunschweig, 1980
- [Brd-02] Brdys, C. , Toumazet, J. P. , Laurent, A., Ponthenier, J. L.: Optical and magnetic diagnostics of the electric arc dynamics in a low voltage circuit breaker, Institute of physics publishing Measurements Science and technology, Vol. 13, pp. 1146-1152, 2002
- [Burk-61] Burkhard, G.: Ein Beitrag zur Lichtbogenwanderung an ferromagnetischen Flächenelektroden, ELEKTRIE 15 (1961), Heft 11, S. 363-369
- [Burk-62] Burkhard, G.: Über das Lichtbogenverhalten in Löschblechkammern und deren Bemessung. Dissertation, TH Ilmenau 1962
- [Burk-71] Burkhard, G.: Die Vorgänge an der Kathode eines Lichtbogens zwischen Metallelektroden und ihre theoretische und experimentelle Deutung, Dissertation (Habilitation), TH Ilmenau 1971
- [Burk-85] Burkhard, G.: Schaltgeräte der Elektroenergietechnik, VEB Verlag Technik, Berlin, 1985
- [Car-59] Carslaw, H. S., Jaeger, J.C.: Conduction Of Heat In Solids, Oxford University Press, London, 1959
- [Chab-90] Chabrierie, J.P., Devautor, J.: Contribution to the study of interaction between an atmospheric pressure arc root and Cu, Ag, or Ag M.O. electrodes. 36<sup>th</sup> IEEE Holm Conference on Electrical Contact Phenomena, Montreal, Kanada, 1990, pp 25-32
- [Cle-89] Clemens, G.: Untersuchungen an strombegrenzenden Löschkammern, Dissertation TU Braunschweig, 1989
- [Doth-06] Datenblatt: „Werkstoff-Programm“, Firma DO THERM Isolierwerkstoffe GmbH & Co. KG, Dortmund, 2006

- [Eck-54] Ecker, G.: Die Stabilisierung des Lichtbogens vor Anode und Kathode, Z. Phys., 136 (1953/54), S. 1-16
- [Erk-74] Erk, A. , Schmelzle, M.: Grundlagen der Schaltgerätechnik, Springer Verlag Berlin, 1974
- [Fink-56] Finkelnburg, W. und Maecker, H.: Elektrische Bögen und thermisches Plasma, Handbuch der Physik, Band XXII Gasentladungen II, S. 254-444, Springer Verlag Berlin-Göttingen-Heidelberg, 1956
- [Gas-68] Gassmann, E.: Über die Bildung von Lichtbogenfußpunkten bei der Berührung leitender Teile mit dem Bogenplasma. XIII. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium TH Ilmenau, Vortragsreihe „Elektrische Apparate und Anlagen“, Ilmenau 1968.
- [Gau-98] Gauster, E. , Rieder, W.: Arc Lengthening Between Divergent Runners: Influence of Arc Current, Geometry, and Materials of Runners and Walls, IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology-Part A, Vol.21, No. 1, March 1998
- [Gess-62] Gessner, K.-L.: Die Unterteilung wandernder Gleichstromlichtbögen durch Bleche quer zur Bogenachse, Dissertation, TH Darmstadt, 1962
- [God-06] Goodfellow Materialinformationen zu Constantan®-Widerstandslegierung Cu55/Ni45 auf [www.goodfellow.com](http://www.goodfellow.com)
- [Grot-97] Groth, C. , Müller, G.: FEM für Praktiker, Expert Verlag, Renningen-Malmsheim, 1997
- [Hag-06] Foto von [www.hager-tehalit.de](http://www.hager-tehalit.de)
- [Hess-59] Hesse, D.: Über den Einfluss des Laufschienefeldes auf die Ausbildung und Bewegung von Lichtbogenfußpunkten, Dissertation TH Darmstadt, 1959
- [Hudd-65] Huddleston, R. H., Leonard, S. L.: Plasma Diagnostic Techniques, Academic Press, New York, 1965
- [Joh-82] Johann, H.: Elektrische Schmelzsicherungen für Niederspannung, Springer Verlag Berlin-Heidelberg-New York, 1982
- [Kar-98] Karetta, F.: Dreidimensionale Simulation wandernder Schaltlichtbögen, Dissertation TU Braunschweig, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 21, Band 250, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998
- [Lang-26] Langmuir, I., Mott-Smith, H. M.: The Theory of collectors in gaseous discharge, Phys. Rev. 28, 1926, pp 727
- [Lin-72] Lindmayer, M.: Über die Vorgänge bei der Lichtbogenlöschung in kompakten Löschblechkammern bei Wechselströmen zwischen 2,5 bis 8,5 kA, Dissertation, TU Braunschweig, 1972
- [Lin-87] Lindmayer, M. (Herausgeber): Schaltgeräte. Springer-Verlag, Berlin 1987
- [Lin-92] Lindmayer, M., Sun, M.: Arc Stress and Erosion Losses of Contact Materials at Currents up to 1000 A 16th International Conference on Electrical Contacts, Loughborough, England, 1992

- [Lin-02] Lindmayer, M.: Complete simulation of moving arcs in low-voltage switchgear. XIV Int. Conf. On Gas Discharges and their Applications, Liverpool 2002
- [Lin-03] Lindmayer, M., Marzahn, E., Mutzke, A., Springstubbe, M.: Low voltage switching arcs – experiments and modeling. XVth Symposium on Physics of Switching Arc, Brno, 2003
- [Lin-04] Lindmayer, M. , Marzahn, E. , Mutzke, A. , Rüter, T. , Springstubbe, M.: The process of arc-splitting between metal plates in low voltage arc chutes. Joint 22<sup>nd</sup> International Conference on Electrical Contacts & 50<sup>th</sup> IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Seattle, 2004
- [Lin-05a] Lindmayer, M. , Mutzke, A. , Rüter, T.: Messungen und Simulation von Schaltlichtbögen in Löschblechkammern. 18. VDE Fachtagung „Kontaktverhalten und Schalten“, Karlsruhe 2005. VDE Fachbericht 61, VDE-Verlag Berlin 2005.
- [Lin-05b] Lindmayer, M. , Marzahn, E. , Mutzke, A. , Rüter, T. , Springstubbe, M.: Some aspects of arc behavior in low voltage arc chutes. XVIth Symposium on Physics of Switching Arc, Brno, 2005
- [Lin-92] Lindmayer, M., Sun, M.: Arc Stress and Erosion Losses of Contact Materials at Currents up to 1000 A 16th International Conference on Electrical Contacts, Loughborough, England, 1992
- [Mae-55] Maecker, H.: Plasmaströmungen in Lichtbögen infolge eigenmagnetischer Kompression, Z. Phys., 141 (1955), S. 198-216
- [Merc-91] Mercier, M. , Laurent, A. , Velleaud, G. , Gary, F.: Study of the movement of an electric breaking arc at a low voltage, Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 24, pp. 681 – 684, 1991
- [Müller-57] Müller, L.: Wanderungsvorgänge von kurzen Hochstromlichtbögen im eigenerregten Magnetfeld zwischen ruhenden Laufschiene und zwischen sich trennenden Kontaktstücken, Dissertation TH Braunschweig, 1957
- [Mut-07] Mutzke, A. , Kurrat, M. , Lindmayer, M. , Rüter, T.: Modeling the Arc Splitting Process in Low Voltage Arc Chutes. 53<sup>th</sup> IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Pittsburgh, 2007
- [Nacht-88] Nachtigall, K.-P.: Experimentelle Untersuchung der Zündung und Ausbildung von Lichtbogenfußpunkten auf kalten Kathoden, Dissertation Ruhr-Universität Bochum, 1988
- [Nie-67] Niemeyer, L.: The Mechanism of Arc Subdivision in ‚Deion‘ Grids, 3rd International Conference on Electrode Phenomena in Gas Discharges, Estoril, 1967
- [Orig-03] Origin V75 User’s Manual, OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA, 2003
- [Paul-97] Paulke, J.: Lichtbogenbewegung und Druckentwicklung in kompakten Löschkammern, Dissertation, TU Braunschweig, 1997

- [Puf-01] Puffer, R.: Experimentelle Untersuchung der Heißgasströmung in einem SF<sub>6</sub>-Selbstblassechaltermodell mittels Particle Image Velocimetry (PIV) zur Verifikation von Simulationsmodellen, Dissertation RWTH Aachen, 2001
- [Raf-98] Raffael, M. , Willert, C. , Kompenhans, J.: Particle Image Velocimetry – A Practical Guide, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1998
- [Ral-07] Ralchenko, Yu., Jou, F.-C., Kelleher, D.E., Kramida, A.E., Musgrove, A., Reader, J., Wiese, W.L., and Olsen, K. (2007). *NIST Atomic Spectra Database* (version 3.1.2), [Online]. Available: <http://physics.nist.gov/asd3> [2007, August 30]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
- [Red-06] Datenblatt Redlake Motion Pro X4, [www.redlake.de](http://www.redlake.de)
- [Ried-67] Rieder, W.: Plasma und Lichtbogen, Vieweg Verlag Braunschweig, 1967
- [Rüm-05] Rümpler, C. , Reichert, F. , Berger, F. , Stammberger, H. , Terhoeven, P.: Experimentelle und numerische Untersuchung des Lichtbogenlaufverhaltens, 18. VDE Fachtagung „Kontaktverhalten und Schalten“, Karlsruhe 2005. VDE Fachbericht 61, VDE-Verlag Berlin 2005.
- [Rue-06] Rüther, T. , Mutzke, A. , Lindmayer, M. , Kurrat, M.: The Formation of Arc Roots on a Metallic Splitter Plate in Low-Voltage Arc Chambers, 23rd International Conference on Electrical Contacts, Sendai, Japan, 6-9 Juni 2006
- [Schü-61] Schütte, H.-G.: Über den Einfluss von Strömungsvorgängen auf die Lichtbogenwanderung in engen Spalten, Dissertation TH Braunschweig, 1961
- [Schi-94] Schipper, G.: Untersuchung des Lichtbogenverhaltens in kompakten strombegrenzenden Löschblechkammern, Dissertation, TU Braunschweig, 1994
- [Spring-07] Springstube, M.: Weiterentwicklung von Simulationsverfahren von Niederspannungs-Schaltlichtbögen, Forschungsarbeit TU Braunschweig, noch nicht veröffentlicht
- [Stam-95] Stammberger, H.: Magnetfeld- und Kraftberechnung für strombegrenzende Niederspannungs-Schaltgeräte, Dissertation TU Braunschweig, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 21, Band 181, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995
- [Stam-02] Stammberger, H. , Daube, Th. , Dehning, C. , Anheuser, M.: Arc simulations in realistic low-voltage arcing chambers. 21<sup>st</sup> Int. Conf. On Electrical Contacts, Zürich 2002
- [Sud-75] Sudhölter, H.-W.: Über den zwischen divergierenden Elektroden wandernden Lichtbogen bei Strömen bis 90000 A, Dissertation, TU Braunschweig, 1975

- [Sud-76a] Sudhölter, H.-W.: Zur Struktur und Beeinflussbarkeit des bewegten und gleichzeitig verlängerten Lichtbogens, etz-a, Band 97, Heft 8, 1976
- [Sud-76b] Sudhölter, H.-W.: Der Einfluss von Plasmastrahlen und gasabgebendem Kammermaterial auf die Lichtbogenverlängerung im Niederspannungs-Schaltgerät, Bulletin SEV/VSE, Band 67, Nr. 24, 1976
- [Swie-03] Swierczynski, B. , Gonzales, J.J. , Freton, P. , Gleizes, A. : Contribution 3D à l'étude d'un dis-joncteur basse tension. 6<sup>èmes</sup> Journées d'Études sur les Fluctuations des Arcs, LAEPT, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand 2003
- [VDE-01] DIN VDE 0641 Teil11 (DIN EN 60898-1): Elektrisches Installationsmaterial – Leitungsschutzschalter für Hausinstallationen und ähnliche Zwecke – Teil1: Leitungsschutzschalter für Wechselstrom (AC), VDE-Verlag, Berlin
- [VDE-02] DIN VDE 0660 Teil101 (DIN EN 60947-2): Niederspannungsschaltgeräte – Teil 2: Leistungsschalter, VDE-Verlag, Berlin
- [Wei-88] Weichert, H.: Lichtbogenwanderungs- und Kommutierungsvorgänge in strombegrenzenden Löschkammeranordnungen, Dissertation, TU Braunschweig, 1988
- [Zet-05] Zschetzsche, J. et al.: Strömungsmessung in Lichtbogen- und Plasmaprozessen, Vortrag der Professur Fügetechnik und Montage, TU Dresden und des Kurt-Schwabe-Institut für Mess- und Sensortechnik, Meinsberg, 26.04.2005, Berlin

## 8. Bildverzeichnis

- Bild 1.1:** Leitungsschutzschalter mit Löschblechpaket, Auslöseeinheit und Schaltschloss [Hag-06]
- Bild 1.2:** Ersatzschaltbild eines induktiven Kurzschlusskreises
- Bild 1.3:** Strombegrenzendes Abschalten eines induktiven Stromkreises; Strom und Spannungsverlauf (schematisch)
- Bild 1.4:** Gebiete eines Lichtbogens (oben) und dazugehöriger Potentialverlauf (unten), schematisch [Lin-87]
- Bild 1.5:** Prinzip der Lichtbogenunterteilung [Burk-85]
- Bild 1.6:** Gegenseitige Beeinflussung der Teillichtbögen bei einer Lichtbogenunterteilung an zwei Löschblechen [Burk-85]
- Bild 2.1:** a) Foto eines Leitungsschalters (Typ AEG Elfa E81S) und b) Modellschaltkammer mit divergierenden Laufschiene und einem Löschblech

- Bild 2.2:** Vorder- und Seitenansicht einer Modellschaltkammer mit divergierenden Laufschiene und einem Löschblech
- Bild 2.3:** Dreidimensionales Modell einer in den Versuchen verwendeten Schaltkammer
- Bild 2.4:** Schematische Darstellung der Modellschaltkammer mit divergierenden Laufschiene und einem Löschblech
- Bild 2.5:** Seitenansicht der 4, 8 und 12 mm tiefen Kammer aus Bild 2.4
- Bild 2.6:** Modellschaltkammer mit divergierenden Laufschiene und zwei Löschblechen, 12 mm tief; a) 2 mm, b) 7 mm Löschblechabstand (sonstige Abmessungen wie a))
- Bild 2.7:** Modellschaltkammer mit parallelen Laufschiene und einem Löschblech
- Bild 2.8:** Modellschaltkammer mit parallelen Laufschiene (Hintergrund) mit überlagertem Simulationsmodell (Vordergrund)
- Bild 2.9:** Modelle der verwendeten Löschbleche
- Bild 2.10:** Aufbau eines normalen Löschblechs mit Shunt (obere Stahlblechhälfte nicht dargestellt)
- Bild 2.11:** Schematischer Übersichtsplan der Versuchsanlage
- Bild 2.12:** Digitale C-MOS Schnellfilmkamera [Red-06]
- Bild 2.13:** Einfluss der Objektivblende auf die aufgezeichnete Lichtbogenkontur; Aufnahmen mit 40.000 Bildern pro Sekunde bei einer prospektiven Stromstärke von 1000 A
- Bild 2.14:** Bereiche der Lichtbogenkontursuche in einer Kammer mit divergierenden Laufschiene und einem Löschblech
- Bild 2.15:** Verlauf der Lichtbogenkontur in einer Modellschaltkammer mit divergierenden Laufschiene und einem Löschblech
- Bild 2.16:** Aufnahmen a) der Kammerkontur vor einem Versuch und b) des Lichtbogens während eines Versuches
- Bild 2.17:** Beispiel eines Box-Plot-Diagramms
- Bild 2.18:** Verlauf der elektrischen Größen in beispielhaften Versuchen mit divergierenden Laufschiene (oben) und mit parallelen Laufschiene (unten)
- Bild 2.19:** Bestimmung der Fußpunktlage auf dem Löschblech am Beispiel von drei Teilbildern einer Filmaufnahme
- Bild 2.20:** Koordinaten und Abtastung der untersuchten Löschblechoberflächen
- Bild 2.21:** Verlauf der prozentual aufgeschmolzenen Löschblechoberfläche entlang der Löschblechhöhe des Blechs aus Bild 2.20

- Bild 3.1:** Zünddrahtlage mit a) zwei parallelen und b) einem quer gespannten Zünddraht
- Bild 3.2:** *Verteilung der Zündzeitpunkte in Abhängigkeit der Zündstromstärke bei unterschiedlicher Zünddrahtlage und Stromstärke*
- Bild 3.3:** Statistische Verteilung der Zündzeitpunkte in Abhängigkeit der Zünddrahtlage und der Stromstärke
- Bild 3.4:** Statistische Verteilung der Zündstromstärken in Abhängigkeit der Zünddrahtlage und der Stromstärke
- Bild 3.5:** Verlauf der Bogenfront, des Bogenrückens und der mittleren Lichtbogenkontur (links) und dazugehöriger Kammerabschnitt (rechts) in den 500 A-Versuchen der 4 mm tiefen Kammer bei unterschiedlichem Öffnungsquerschnitt
- Bild 3.6:** Verlauf der Bogenfront, des Bogenrückens und der mittleren Lichtbogenkontur (links) und Teilbilder der dazugehörigen Schnellfilmaufnahme zum Zeitpunkt 2, 3 und 5 ms nach Lichtbogenzündung (rechts) in Versuchen der 4 mm tiefen Kammer bei unterschiedlicher Stromstärke
- Bild 3.7:** vertikale Lichtbogenausdehnung im divergierenden Kammerbereich in Abhängigkeit der Stromstärke und der geöffneten Verdämmung in der 4 mm tiefen Kammer
- Bild 3.8:** Anfängliche, mittlere Wanderungsgeschwindigkeit der Bogenfront und des Bogenrückens im divergierenden Kammerbereich
- Bild 3.9:** Lichtbogen zum Zeitpunkt der ersten Fußpunktbildung auf dem Löschblech; Alle Versuche bei einem Öffnungsquerschnitt von 20 %
- Bild 3.10:** Höhe des ersten Fußpunktes / Plasmastrahls auf dem Löschblech, Alle Versuche bei einem Öffnungsquerschnitt von 20 %
- Bild 3.11:** Lichtbogenunterteilung in einer 40 mm hohen, 4 mm tiefen Kammer mit einem normalen Löschblech,  $I = 500$  A, Öffnungsquerschnitt: 40 %
- Bild 3.12:** Lichtbogenunterteilung und Fußpunkte auf den Löschblechoberfläche der Messung aus Bild 3.11
- Bild 3.13:** Lichtbogenunterteilung und Fußpunkte auf den Löschblechoberfläche der Messung aus Bild 3.14
- Bild 3.14:** Lichtbogenunterteilung in einer 40 mm hohen, 8 mm tiefen Kammer mit einem normalen Löschblech,  $I = 500$  A, Öffnungsquerschnitt: 40 %
- Bild 3.15:** Lichtbogenunterteilung in einer 40 mm hohen, 12 mm tiefen Kammer mit einem normalen Löschblech,  $I = 500$  A, Öffnungsquerschnitt: 40 %



- Bild 3.16:** Erste Lichtbogenunterteilung und Fußpunkte auf den Löschblechoberfläche der Messung aus Bild 3.15
- Bild 3.17:** Lichtbogenunterteilung in einer 40 mm hohen, 12 mm tiefen Kammer mit einem normalen Löschblech,  $I = 500$  A, Öffnungsquerschnitt: 40 %
- Bild 3.18:** Gesamtstrom, Teilstrom durch das Löschblech und Lichtbogenspannung aus Versuchen mit einem normalen Löschblech in einer 4 mm tiefen Kammer bei 2000 A und unterschiedlich weit geöffneter Verdämmung
- Bild 3.19:** Gesamtstrom, Teilstrom durch das Löschblech und Lichtbogenspannung aus Versuchen mit einem normalen Löschblech in einer 8 mm tiefen Kammer bei 2000 A und unterschiedlich weit geöffneter Verdämmung
- Bild 3.20:** Anteil des Löschblechstromes am Gesamtstrom bei Messungen mit 500 A in unterschiedlichen Kammertiefen bei unterschiedlich weit geöffneter Verdämmung
- Bild 3.21:** Verlauf der mittleren Lichtbogenkontur (links) und Fotos der dazugehörigen Löschbleche (rechts) in den 500 A-Versuchen der 4 mm tiefen Kammer bei unterschiedlichem Öffnungsquerschnitt
- Bild 3.22:** Verlauf der mittleren Lichtbogenkontur (links) und Teilbild der Schnellfilmaufnahme zum Zeitpunkt  $t = 4$  ms (rechts) in den 2000 A-Versuchen der 4 mm tiefen Kammer bei unterschiedlichem Öffnungsquerschnitt
- Bild 3.23:** Verlauf des Gesamtstroms und des Teilstroms durch das Löschblech in einem Versuch mit 2000 A in der 4 mm tiefen Kammer bei 60 % geöffneter Verdämmung (links) und Bild einer Schnellfilmaufnahme zu einem Zeitpunkt des Stromflusses durch das Löschblech Strompfade
- Bild 3.24:** Verlauf der mittleren Lichtbogenkontur (links) und Teilbilder der Schnellfilmaufnahme zum Zeitpunkt  $t = 4$  und 7 ms (rechts) in den 500 A-Versuchen der 12 mm tiefen Kammer bei unterschiedlichem Öffnungsquerschnitt
- Bild 3.25:** Verlauf der mittleren Lichtbogenkontur (links) und Teilbilder der Schnellfilmaufnahme zum Zeitpunkt  $t = 4$  und 7 ms (rechts) in den 2000 A-Versuchen der 12 mm tiefen Kammer bei unterschiedlichem Öffnungsquerschnitt
- Bild 3.26:** Oberflächen normaler und 2 mm dicker massiver Löschbleche der 4 mm tiefen Kammer nach jeweils einer Schaltung mit 500 A
- Bild 3.27:** Aufschmelzungen der Löschblechoberflächen entlang der Löschblechhöhe, 4 mm normale Löschbleche aus Bild 5.24, 500 A, beide Löschblechseiten
- Bild 3.28:** Aufschmelzungen der Löschblechoberflächen entlang der Löschblechbreite (Kammertiefe), 4 mm Löschblech aus Bild 5.23, 500 A, beide Löschblechseiten

- Bild 3.29:** Aufschmelzungen der Löschblechoberflächen bei unterschiedlicher Stromstärke, 4 mm Löschbleche, 20 und 60 % geöffnete Verdämmung
- Bild 3.30:** Aufschmelzungen der Löschblechoberflächen entlang der Löschblechbreite (Kammertiefe,) 12 mm Löschblech, 500 A, beide Löschblechseiten
- Bild 3.31:** Seitliche Aufnahme in eine 12 mm tiefe Kammer mit einem normalen Löschblech, Stromstärke 1000 A
- Bild 3.32:** Aufschmelzungen der Löschblechoberflächen entlang der Löschblechbreite (Kammertiefe,) 12 mm Löschblech, 500 A, beide Löschblechseiten
- Bild 3.33:** Aufschmelzungen der Löschblechoberflächen bei unterschiedlicher Kammertiefe in Abhängigkeit der Stromstärke und der Verdämmungsöffnung
- Bild 3.34:** Oszillogramm einer Messung in einer 12 mm tiefen Kammer bei 1000 A und einer zu 20 % geöffneten Verdämmung
- Bild 3.35:** Blick auf eine Löschblechanode und eine anodische Laufschiene; Teilbilder der Schrägsicht-Schnellfilmaufnahme eines Lichtbogens in einer 12 mm tiefen Kammer bei 1000 A und einer zu 20 % geöffneten Verdämmung
- Bild 3.36:** Bestimmung der Stromdichte anhand der Schmelzspuren auf der Blechoberfläche, Versuch mit 500 A, Löschblech aus Bild 5.33
- Bild 3.37:** Löschblechoberflächen (links und rechts) und Filmaufnahme (Mitte), aus einem Versuch mit 500 A in einer a) 4 mm b) 8 mm und c) 12 mm tiefen Kammer
- Bild 3.38:** Bestimmung der Stromdichte anhand der Schmelzspuren auf der Blechoberfläche, Versuch mit 500 A
- Bild 4.39:** Teilspannung zwischen zwei massiven Löschblechen bei 1 kA
- Bild 4.1:** Lichtbogenzündung, -wanderung und -aufteilung in einer Kammer mit parallelen Laufschiene und einem Löschblech
- Bild 4.2:** Verlauf der Lichtbogen-Spannung bei Messungen mit  $I = 500$  A, 1000 A und 2000 A bei geschlossener Verdämmung
- Bild 4.3:** Teilbilder einer Filmaufnahme zu den Versuchen aus Bild 4.2
- Bild 4.4:** Oszillogramm einer Messung mit  $I = 500$  A, 0 %, 20 % und 40 % geöffnete Verdämmung
- Bild 4.5:** Teilbilder einer Filmaufnahme zu den Versuchen aus Bild 4.4
- Bild 4.6:** Oszillogramm einer Messung mit  $I = 2000$  A, 0 %, 20 % und 40 % geöffnete Verdämmung
- Bild 4.7:** Teilbilder einer Filmaufnahme zu den Versuchen aus Bild 4.6

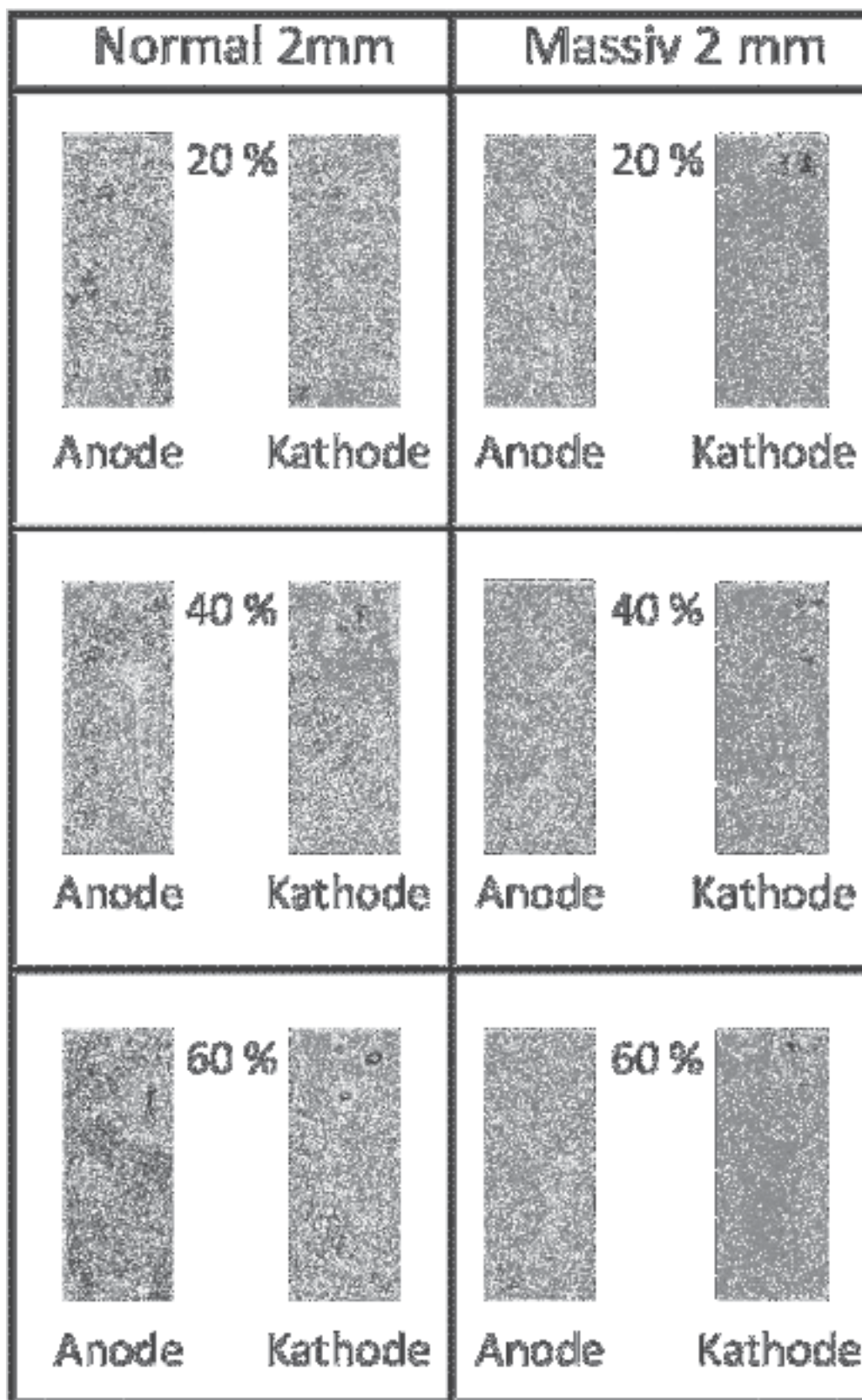
- Bild 4.8:** Teilbilder einer Filmaufnahme (75.400 FPS) und Oszillogramm eines Versuches mit  $I_p = 1$  kA, 20 % geöffnete Verdämmung
- Bild 4.9:** Laufschiene- und Löschblechoberfläche eines Versuches mit 1000 A und 100 % geöffneter Verdämmung
- Bild 4.10:** Fußpunktwanderung an den Laufschiene (LFS) in Versuchen mit  $I_p = 500$  A bei 20, 40 und 100 % geöffneter Verdämmung
- Bild 4.11:** Fußpunktwanderung an den Laufschiene (LFS) und dem Löschblech (LB) in Versuchen mit  $I_p = 500$  A bei 20, 40 und 100 % geöffneter Verdämmung UND Höhe der Fußpunktbildung auf dem Löschblech
- Bild 4.12:** Ort der Fußpunktzündung auf dem Löschblech aus den in Bild 4.11 gezeigten Versuchen (obere Reihe) und bei höherer Stromstärke von 1000 A (untere Reihe)
- Bild 4.13:** Fußpunktwanderung an den Laufschiene (LFS) in Versuchen mit 500 A und 1000 A bei 100 % geöffneter Verdämmung
- Bild 4.14:** Fußpunktwanderung an den Laufschiene (LFS) und dem Löschblech (LB) in Versuchen mit 500 A und 1000 A bei 100 % geöffneter Verdämmung UND Höhe der Fußpunktbildung auf dem Löschblech
- Bild 4.15:** Momentangeschwindigkeiten des anodischen und des kathodischen Laufschienefußpunktes bei  $I = 500$  A (oben) und  $I = 1000$  A (unten) bei 100 % geöffneter Verdämmung
- Bild 4.16:** Oszillogramm einer Messung mit  $I_p = 2.0$  kA, 40 % geöffneter Verdämmung und einem 1 mm dickem massiven Löschblech
- Bild 4.17:** Oszillogramm einer Messung mit  $I_p = 500$  A, 40 % geöffneter Verdämmung und einem 1 mm dickem massiven Löschblech
- Bild 4.18:** Oszillogramm einer Messung mit  $I_p = 1000$  A, 40 % geöffneter Verdämmung und einem 1 mm dickem massiven Löschblech
- Bild 4.19:** Anhand der Daten aus Tabelle 4.1 nachgebildeter Verlauf der Lichtbogenspannung aus Messungen mit einem 1 mm dickem massiven Löschblech
- Bild 4.20:** Oszillogramm einer Messung mit  $I_p = 1000$  A, 100 % geöffneter Verdämmung und einem 2 mm dickem normalen Löschblech
- Bild 4.21:** Teilbilder einer Schnellfilmaufnahme des Versuches aus Bild 4.20
- Bild 5.1:** Prozesse in der Lichtbogensäule [Kar-98], [Spring-07]
- Bild 5.2:** Elektrisches Fußpunktmodell als Funktion  $E = f(J)$  mit temperaturabhängiger Zündbedingung in Z, stationärer Feldstärke ESF im Fallgebiet und Hystereseverlauf bei rückläufigem Strom [Spring-07]
- Bild 5.3:** Verlauf der Lichtbogenspannung und des Löschblechstroms in einer Simulation ohne Fußpunktmodell [Mut-07]

- Bild 5.4:** Stromdichteverteilung in einer Simulation ohne Fußpunktmodell aus [Mut-07], Verlauf der elektrischen Größen siehe Bild 5.3
- Bild 5.5:** Elektrisches Fußpunktmodell als Funktion  $U = f(J)$  mit monoton steigender Stromdichte ohne Zündspannung, stationäre Spannung  $U_{10} = 10 \text{ V}$
- Bild 5.6:** Verlauf der Lichtbogenspannung und des Löschblechstroms in einer Simulation mit Fußpunktmodell mit monoton steigender Spannung [Mut-07]
- Bild 5.7:** a) Elektrisches Fußpunktmodell als Funktion  $U = f(J)$  mit monoton steigender Stromdichte und Zündspannung  $U_Z$ , stationäre Spannung  $U_{10} = 10 \text{ V}$  und b) Stromdichteverteilung in einer Simulation mit Fußpunktmodell und einer Zündspannung von  $19,7 \text{ V}$  aus [Mut-07]

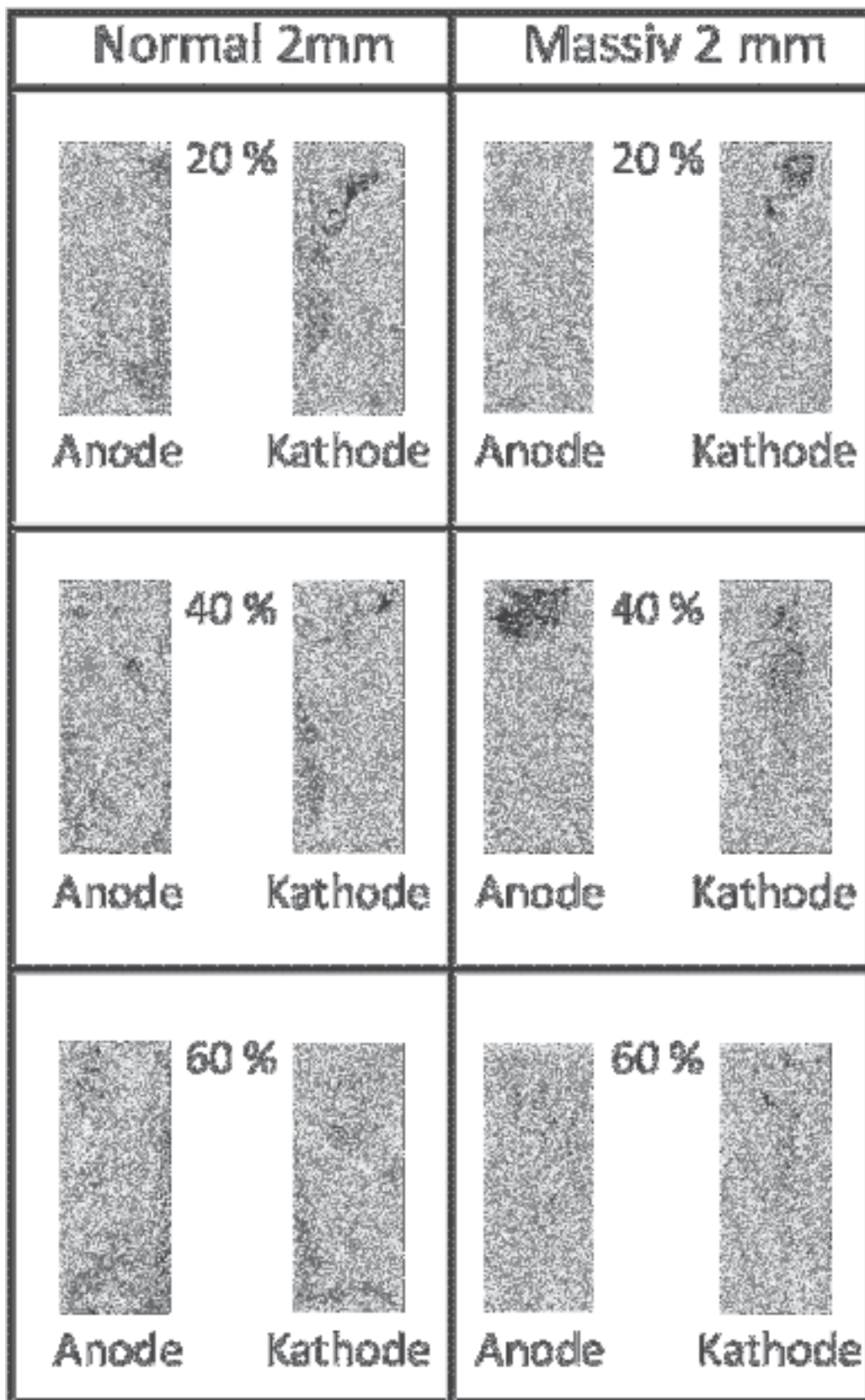
## 9. Tabellenverzeichnis

- Tabelle 2.1:** Elektrische und mechanische (geometrische) Parameter der Versuchsreihen
- Tabelle 3.1:** Spannungsanstieg bis zum Zeitpunkt der Fußpunktbildung auf dem Löschblech
- Tabelle 3.2:** Stromdichten aus verschiedenen Messungen bei der Auswertung Schnellfilmaufnahmen
- Tabelle 4.1:** Spannungsverlauf während der Phase der Lichtbogenunterteilung bei  $1 \text{ mm}$  dicken Löschblechen (Werte für  $U_{Rücken}$  sind Mittelwerte)

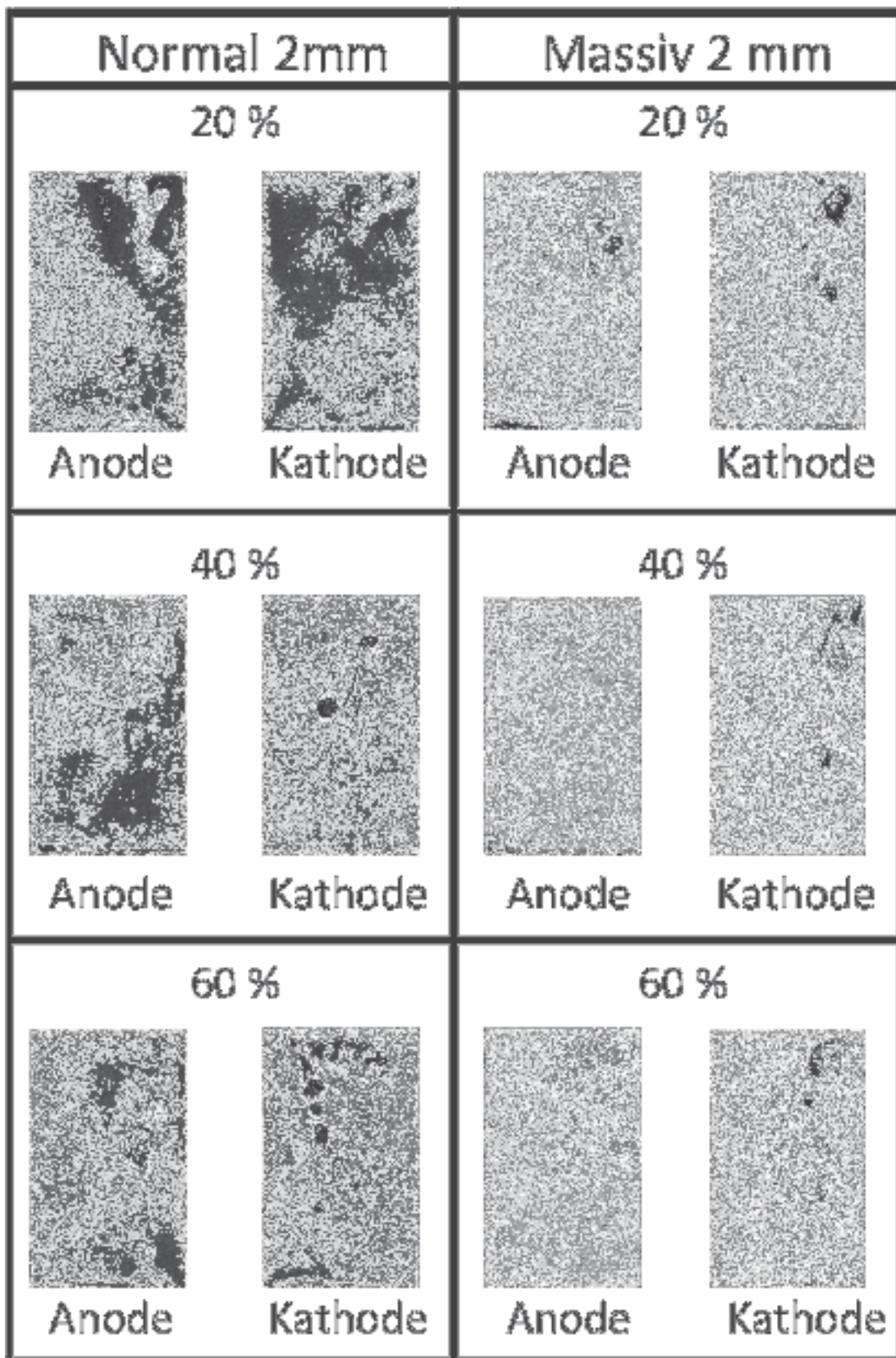
## 10. Bildteil / Abbildungen



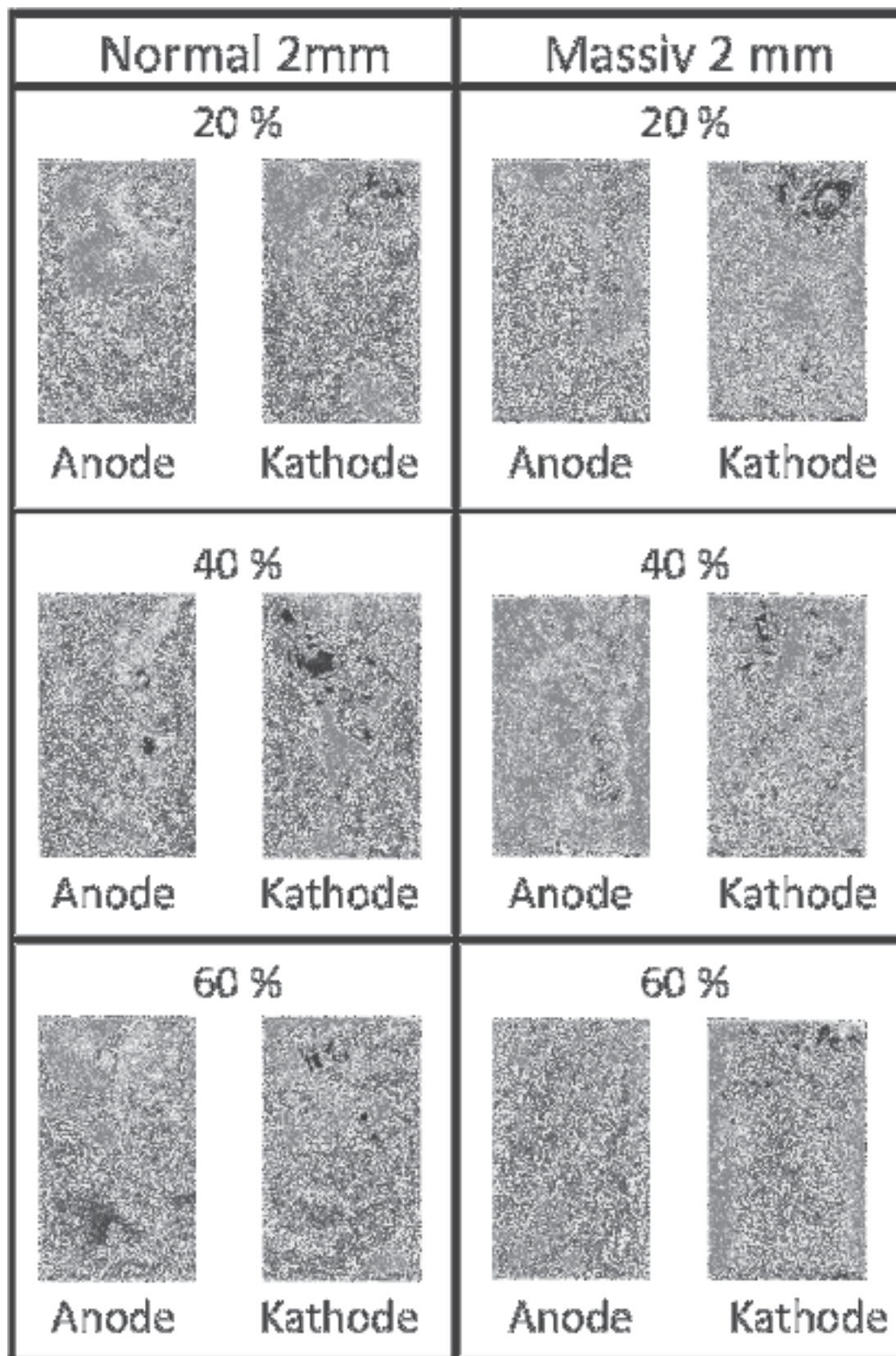
**Bild 10.1:** Oberflächen normaler und 2 mm dicker massiver Löschbleche der 8 mm tiefen Kammer aus Schaltungen mit 500 A



**Bild 10.2:** Oberflächen normaler und 2 mm dicker massiver Löschbleche der 8 mm tiefen Kammer aus Schaltungen mit 1000 A

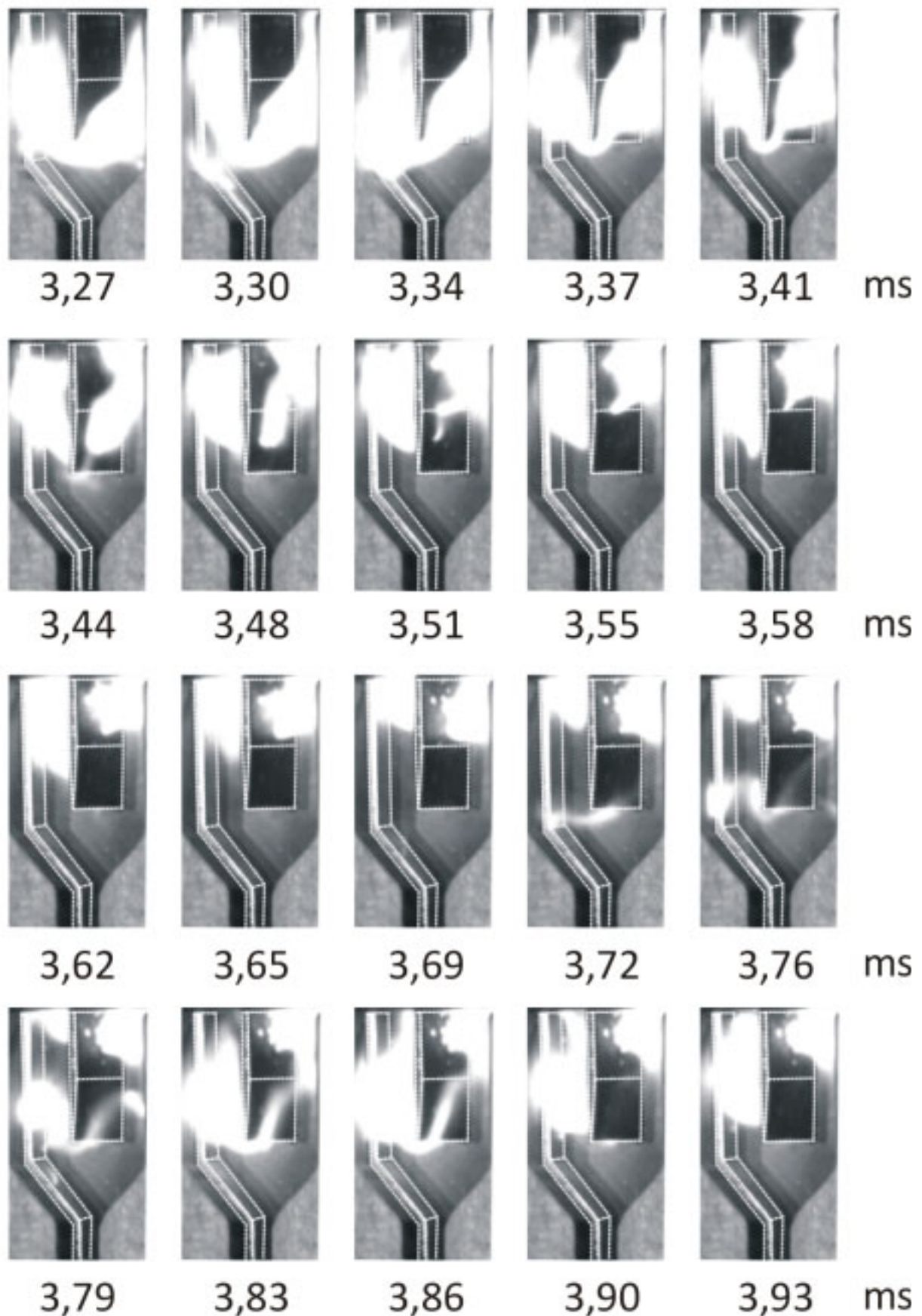


**Bild 10.3:** Oberflächen normaler und 2 mm dicker massiver Löschbleche der 12 mm tiefen Kammer aus Schaltungen mit 500 A

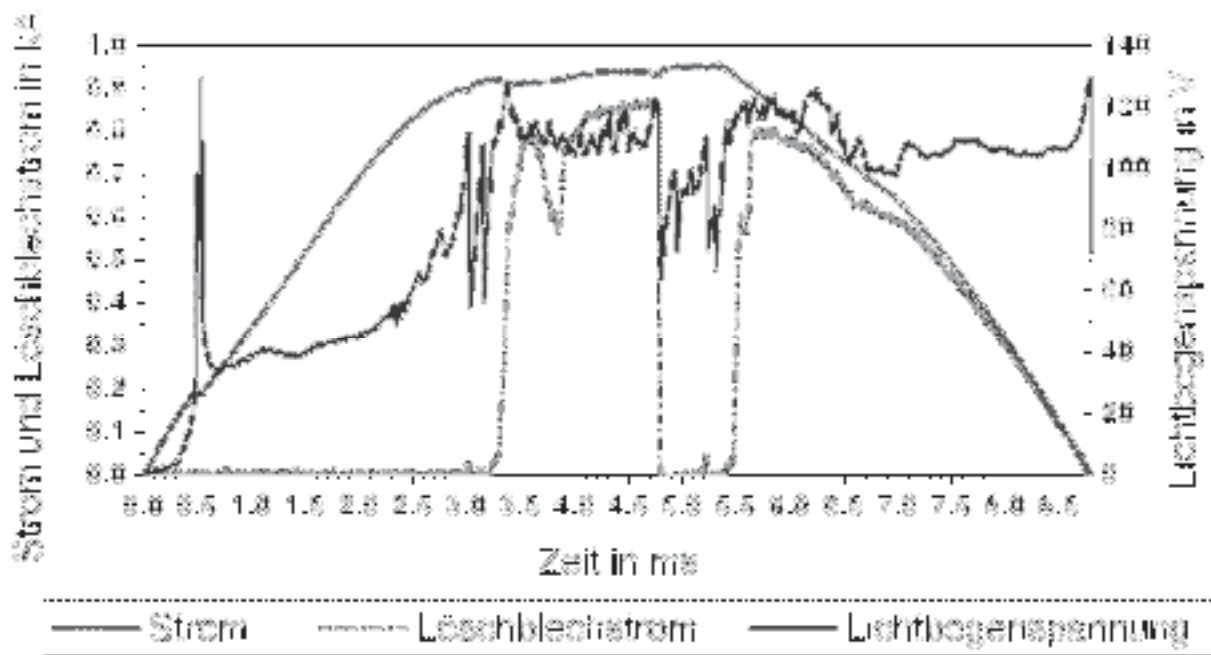


**Bild 10.4:** Oberflächen normaler und 2 mm dicker massiver Löschbleche der 12 mm tiefen Kammer aus Schaltungen mit 1000 A

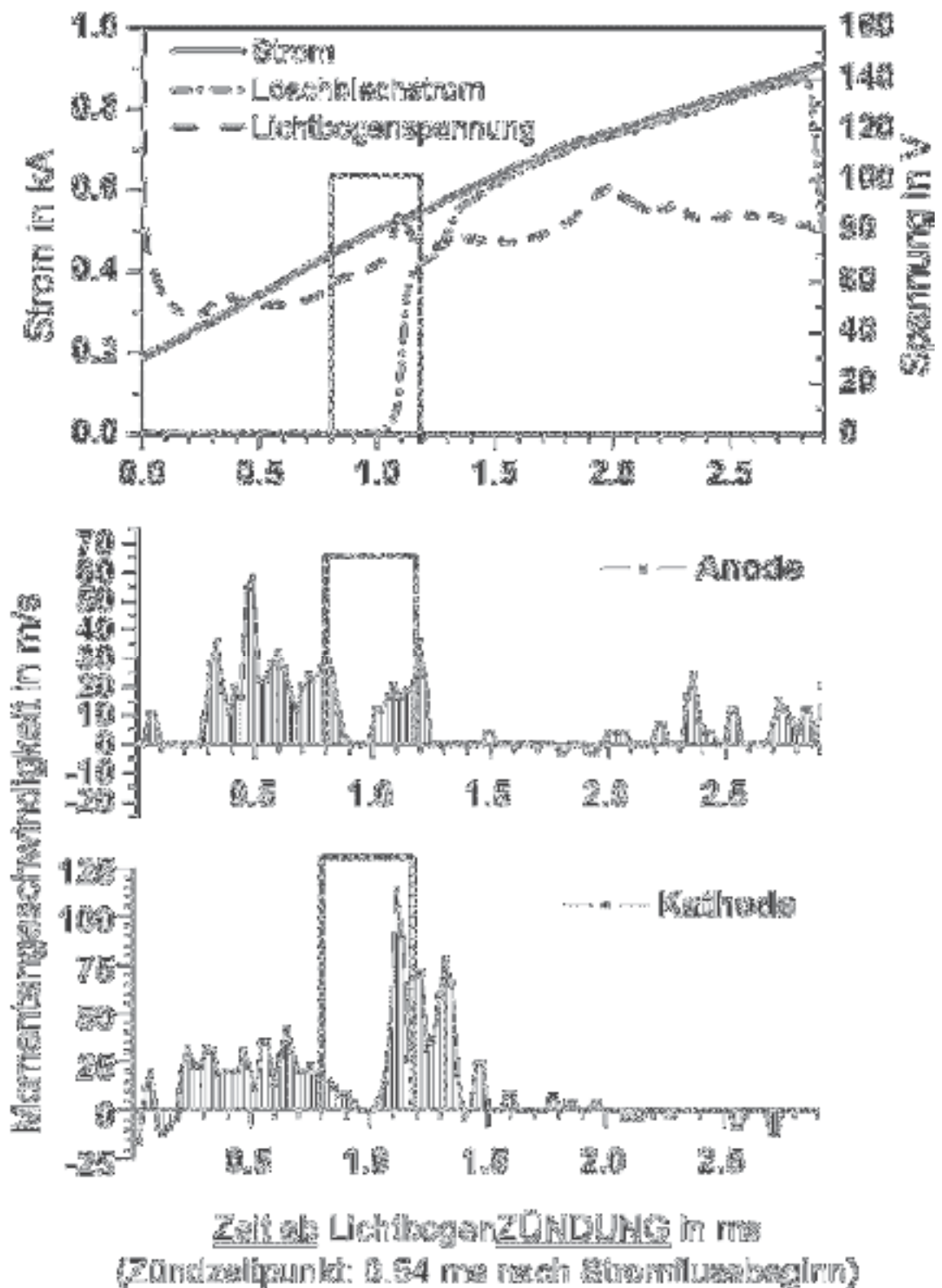




**Bild 10.5** Blick auf die Anodenseite eines spitz zulaufenden Löschblechs;  
Teilbilder der seitlichen Schnellfilmaufnahme eines Lichtbogens in einer  
12 mm tiefen Kammer bei 1000 A und einer zu 20 % geöffneten  
Verdämmung



**Bild 10.6:** Oszillogramm zu dem im Bild 10.5 gezeigten Versuch



**Bild 10.7:** Oszillogramm (oben) eines Versuches mit  $I = 1000 \text{ A}$ , 100 % geöffnete Verdämmung und dazugehörige Momentangeschwindigkeiten des anodischen (Mitte) und des kathodischen Laufschienefußpunktes (unten)

## Lebenslauf

### Persönliche Angaben:

Name: Thomas Rüter  
 Familienstand: ledig  
 Geburtstag: 13.04.1978  
 Geburtsort: Braunschweig  
 Eltern: Renate Rüter geb. Noack  
 Hans-Jürgen Rüter  
 Geschwister: Cornelia Rüter  
 Andreas Rüter



### Berufliche Tätigkeit:

seit 04/2007 Fachingenieur in der Anlagentechnik bei der Salzgitter Flachstahl GmbH  
 04/2003 - 03/2007 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen, TU Braunschweig

### Studium und Promotion:

2007 **Promotion:** Experimentelle Untersuchung der Lichtbogenaufteilung an Löschblechen  
 10/1998 bis 03/2003 **Studium** der Elektrotechnik an der TU Braunschweig, Studienschwerpunkt: Energietechnik, Vertiefungsrichtung: Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik  
**Diplomarbeit:** Inbetriebnahme eines Versuchsschalters zur Doppelunterbrechung im Vakuum

### Praktische Tätigkeiten:

05/1998 bis 07/1998 und 03/1999 bis 04/1999 14-wöchiges Praktikum bei der Firma ELWE-Lehrsysteme GmbH in Cremlingen  
 03/2002 bis 06/2002 12-wöchiges Fachpraktikum bei der Firma E-T-A Elektrotechnische Apparate GmbH in Altdorf bei Nürnberg

### Grundwehrdienst:

07/1997 bis 04/1998 2. Nachschubbattalion 7, Augustdorf

### Schulbildung:

1994 bis 1997 Gymnasium Kleine Burg, Braunschweig  
 1990 bis 1994 Realschule Vechede  
 1988 bis 1990 Orientierungsstufe Vechede  
 1984 bis 1988 Grundschule Vechede





