

Brandentstehung in Niederspannungsanlagen

Dem Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik
der Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

genehmigte
Dissertation

von

Dipl.-Ing. Youssef Dahmouni
geboren am 30. Januar 1968 in Moknine/Tunesien

1999

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. H. Haase
 2. Referent: Prof. Dr.-Ing. E. Gockenbach
- Tag der Promotion: 23.12.1999

Kurzfassung

Dahmouni, Youssef

Brandentstehung in Niederspannungsanlagen

Es werden die Bedingungen für die Brandentstehung mit elektrischen Zündquellen in Niederspannungsanlagen näher untersucht.

Einer der Gründe, warum Brände als weitgehend unerforscht gelten, sind fehlende oder in technischer Hinsicht meist unvollständige Daten. Es wird daher eine Software erstellt, welche die Eingabe und Auswertung der Branddaten in elektrotechnischer Hinsicht weitgehend vereinfacht.

Die Schadensaktensichtung bei einer Versicherungsgesellschaft zeigt, daß für die Brandentstehung Lichtbögen und/oder Stromverengungen verantwortlich sind. Die Vorgänge, die in dieser Hinsicht ein Brandrisiko darstellen, werden beschrieben.

Da die Schraubverbindung weit verbreitet ist, werden die kritischen Bedingungen für eine Brandentstehung in Abhängigkeit von Anzugsmoment und Laststrom an einer Reihenklemme erfaßt. Außerdem wird der Einfluß von Vibrationen auf den Kontakt untersucht.

Aufgrund der Häufigkeit der Isolationsfehler zwischen Kabeln und großflächigen Massen wird das Brandrisiko von Kriechströmen mit Hilfe einer einfachen Elektroden-Anordnung beurteilt.

Die Brandgefahr durch Isolationsfehler zwischen isolierten Kabeln wird an einer Entladungsstrecke untersucht.

Die gemessene Lichtbogenspannung in Drehstromnetzen weist überwiegend einen rechteckigen Verlauf auf. Basierend auf einem Abschaltkriterium, das einen solchen Verlauf erkennt, wird eine neuartige digitale Lichtbogen-Abschalteinrichtung entwickelt.

Schlagworte: Brandentstehung, Niederspannungsanlagen, Isolationsfehler

Abstract

Dahmouni, Youssef

Fire origins in low-voltage appliances

Potential ignition sources within low-voltage appliances are considered.

One of the reasons why fire causes remain uninvestigated is the missing or uncomplete technical data describing the fire scene. Therefore a software is developed to make the input and evaluation of the fire data easier.

A files evaluation at an insurance company lead to the conclusion, that electric arcs and/or contacts are the main causes of fires. The processes related to these causes are analyzed and described.

Due to the frequent use of screw connections, the critical conditions for a fire ignition and the dependence on the torque and the load current are investigated by using a modular terminal block. Furthermore the influence of vibrations on the electrical contact is examined.

The most insulation faults occur between cables and grounded enclosures. In this case, the influence of leakage currents on some insulation materials is analyzed by using a simple electrode set-up.

The fire risk of insulation failures between cables is also examined by using an arcing set-up.

The measured arcing voltage at three-phase-systems has mainly a rectangular wave form. A new protective circuit is developed to detect such arcs and disconnect the power supply.

Key words: fire origins, low-voltage appliance, insulation failure

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Meßtechnik der Universität Hannover.

Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Haase danke ich herzlich für die Anregung zu dieser Arbeit und die stetige und wertvolle Unterstützung.

Herrn Prof. Dr.-Ing. E. Gockenbach danke ich für das freundliche Interesse, das er dieser Arbeit als zweiter Referent entgegenbrachte.

Mein Dank gilt auch allen Studenten, Kollegen und Freunden, die mir mit Rat und Tat zur Seite standen.

Meinem Vater und meiner Familie danke ich für die wertvolle und vielfältige Unterstützung.

Inhalt

Inhalt	IX
Verzeichnis der wichtigsten Formelzeichen	XII
1 Einleitung und Zielsetzung	1
2 Elektrische Zündquellen	3
2.1 Kriechwege	3
2.2 Gasentladungen	3
2.2.1 Der Lichtbogen in einem Stromkreis	5
2.2.2 Einflußparameter auf die Lichtbogendauer	6
2.3 Erwärmung durch eine Stromverengung	10
2.3.1 Bestimmung der Kontaktfläche einer Schraubverbindung	12
2.3.2 Temperaturverteilung in einem Kontaktpaar	13
3 Kunststoffentzündung	16
3.1 Materialerwärmung	16
3.2 Thermische Zersetzung	18
3.3 Zündung und Verbrennung	19
4 Fehleranalyse und statistische Auswertung	21
4.1 Ausschluß chemischer Reaktionen	21
4.2 Fehlerursachen	21
4.3 Weitere Fehlerquellen	22
4.3.1 Einfluß der Schutzvorrichtungen	22
4.3.2 Einfluß der Elektroinstallation	24
4.4 Statistische Auswertung	25
4.4.1 Brandursachen	26
4.4.2 Schwierigkeiten bei der Ermittlung der Brandursache	26
4.4.3 Sichtung der Akten	26
4.4.4 Realisierung einer Auswertungssoftware für Brandursachen	30

5 Brandentstehung in einer Schraubverbindung	32
5.1 Beschreibung der untersuchten Schraubverbindung	32
5.2 Ausgangslage für die Bestimmung der Kontaktfläche	33
5.3 Mögliche Lagen der Übergangswiderstände in der Klemme	34
5.4 Ausgangsmodell für die numerische Berechnung der Klemmenerwärmung	36
5.5 Modellierung	39
5.6 Ergebnisse der Simulation	40
5.6.1 Isothermenbilder der Reihenklemme	40
5.6.2 Zusammenhang zwischen Verlustleistung und Temperatur in Kontaktnähe ...	42
5.7 Messung der Klemmenerwärmung im Überlastfall durch Wechselstrom	44
5.8 Vergleich Messung - Berechnung	46
5.9 Belastung der Klemme im Normal- und Überlastfall	51
5.10 Belastung kurzer Dauer	55
5.11 Belastung einer losen Klemme	57
5.11.1 Kontakt zwischen Schiene und Leiter	57
5.11.2 Kontakt zwischen Stahlbügel und Leiter	60
5.11.3 Entzündungsversuche	61
5.12 Einflußparameter auf das Erwärmungsverhalten einer Schraubverbindung und Ergebnisse der Untersuchung	67
6 Brandentstehung durch Gasentladungen	70
6.1 Simulation der Temperaturverteilung innerhalb unterschiedlicher Fremdschichten ..	70
6.1.1 Festlegung einer Elektrodenanordnung	70
6.1.2 Simulationsergebnisse	72
6.2 Meßtechnische Untersuchung des Brandrisikos durch thermische Beanspruchung verschmutzter Isolatoroberflächen	74
6.2.1 Beschreibung der Elektrodenanordnung.....	74
6.2.2 Destilliertes Wasser als Fremdschicht	75
6.2.3 Natriumchloridlösung als Fremdschicht	76
6.2.4 Graphit als Fremdschicht	83
6.3 Brandrisiko durch Entladungen zwischen isolierten Kabeln	86
6.3.1 Meßanordnung	86
6.3.2 Versuchsergebnisse	87

7 Realisierung einer digitalen Lichtbogenerkennung	92
7.1 Erzeugung des Lichtbogens	92
7.1.1 Lichtbögen zwischen Sammelschienen	93
7.1.2 Lichtbögen zwischen Schiene und Metallzylinder	93
7.2 Auslösekriterium	93
7.3 Technische Realisierung	96
7.3.1 Beschreibung des Lichtbogenschutzes	96
7.3.2 Schaltversuche und Grenzen des Lichtbogenschutzes	98
8 Zusammenfassung	100
Literaturverzeichnis	101
Anhang A	104
Anhang B	106

Verzeichnis der wichtigsten Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

c	spezifische Wärmekapazität	J / (kg K)
ρ	Dichte	kg / m ³
λ	Wärmeleitfähigkeit	W / (m K)
a	Temperaturleitfähigkeit	m ² / s
Φ	Wärmestrom	W
H	Wärmeenergie	J
α	Wärmeübergangskoeffizient	W / (m ² K)
$T(x, t)$	Temperatur	K
\vec{q}	Vektor der Wärmestromdichte	W / m ²
Nu	Nusselt-Zahl	
Pr	Prandtl-Zahl	
Ra	Rayleigh-Zahl	
F	mechanische Vorspannkraft	N
M_A	Anzugsdrehmoment	Nm
A	Kontaktfläche	m ²
b	Breite der Kontaktfläche	m
E	Elastizitätsmodul	N / m ²
t	Zeit	s
$i(t)$	Augenblickswert des Stromes	A
$u(t)$	Augenblickswert der Spannung	V
$u_B(t)$	Augenblickswert der Lichtbogenspannung	V
E_B	Elektrische Feldstärke in der Lichtbogenstrecke	V / m

l_B	Lichtbogenlänge	m
I	Effektivwert des Stromes	A
U	Effektivwert der Spannung	V
P	Wirkleistung	W
R	elektrischer Widerstand	Ω
L	Induktivität	H
C	Kapazität	F
R_V	Störwiderstand	Ω
τ	Zeitkonstante	s
S	Stromdichte	A / m ²
κ	Elektrische Leitfähigkeit	S
N	Anzahl der Messwerte	
s_M	mittlere Abweichung	V

Abkürzungen

PE	Polyethylen
PA	Polyamid
PVC	Polyvinylchlorid
PVCh	Hartes Polyvinylchlorid

1 Einleitung und Zielsetzung

In der Niederspannungsebene ist die Brandentstehung in elektrischen Anlagen bislang weitgehend unerforscht. Die festgestellten Ursachen beruhen meist auf Vermutungen, deren physikalische Zusammenhänge ungeklärt sind. Dies ist hauptsächlich auf die starke Beschädigung der Brandorte zurückzuführen. Dadurch wird die theoretische und praktische Rekonstruktion der abgelaufenen Prozesse im Labor erschwert. Mit dieser Arbeit soll daher ein Beitrag geleistet werden, in dem die Bedingungen für eine Brandeinleitung mit elektrischen Zündquellen näher untersucht werden.

Der Ladungsfluß bzw. der elektrische Strom kann nicht als direkte Ursache eines Brandes angesehen werden, wenn eine Anlage nicht normgerecht installiert, fahrlässig benutzt oder nicht regelmäßig gewartet wird. Schließt man diese Fehler aus, können noch unvorhersehbare Effekte wie Schmutzablagerungen, Alterungsprozesse bestimmter Komponenten und mechanische Schwingungen eine Brandgefahr darstellen. In der Norm¹ wird gefordert, daß im Fall des *vorhersehbaren abnormalen Gebrauches*, im *Fehlerfall* und beim *Ausfall* eines an Spannung liegenden Teils eine Minderung der Wahrscheinlichkeit eines Brandes angestrebt werden *muß*. Dazu werden die zu prüfenden elektrischen Komponenten Brennbarkeitsprüfungen unterzogen, die zur Einstufung in definierte Brennbarkeitsklassen führen. In dieser Arbeit werden hauptsächlich die physikalischen Vorgänge, die als brandgefährlich erscheinen, in den Vordergrund gestellt. Sie manifestieren sich in häufig benutzten elektrischen Komponenten oder Elektrodenanordnungen.

Im Zuge dieser Arbeit werden die häufigsten Ursachen eines Brandes innerhalb elektrischer Anlagen im Niederspannungsbereich statistisch ausgewertet. Dazu wird auf Daten aus Schadensakten einer hannoverschen Versicherung zurückgegriffen. Die daraus gewonnenen Ergebnisse führen zu der Erkenntnis, daß für die Brandentstehung *Lichtbögen* und/oder *Kontaktfehler* verantwortlich sind.

Elektrische Verbindungen können durch Umgebungseinflüsse (z.B. mechanische Schwingungen) gelockert und durch Fremdschichten (z.B. Oxidschicht) beeinträchtigt werden. Der daraus resultierende erhöhte Kontaktwiderstand bewirkt eine lokale Erwärmung der Verbindung.

Für die Entstehung von Entladungen oder Lichtbögen zwischen spannungsführenden Elektroden in der Niederpannungstechnik gilt die Verschmutzung von Isolatoroberflächen als Hauptursache. Bislang existieren in der Literatur jedoch keine Angaben über das Brandrisiko von Fremdschichten. Entsteht in einem Stromkreis ein Lichtbogen, verringert dieser den Betrag des Kurzschlußstromes um 30 bis 60% [7]. Man spricht dann nicht mehr von einem Kurzschluß,

¹ EN 60695-1-1:1995

sondern von einem *Lichtbogenkurzschluß*. So wird der Fehler für die Schutzvorrichtungen nicht mehr detektierbar und erhöht daher das Brandrisiko.

Ein wesentlicher Teil dieser Arbeit besteht deshalb darin zu untersuchen, unter welchen Bedingungen eine Schraubverbindung und spannungsführende Elektroden im Niederspannungsnetz einen Brand auslösen können. Dies soll am Beispiel einer einfachen *Reihenklemme* aufgrund ihres häufigen Einsatzes durchgeführt werden. Weiterhin wird die Auswirkung von Fremdschichten sowie von Lichtbogenkurzschlüssen auf bestimmte Isolierstoffe an einem einphasigen Spannungsnetz untersucht. Berichte in Schadensakten über die Brandgefährlichkeit von Lichtbogenkurzschlüssen sollen hiermit überprüft werden. Das Erwärmungsverhalten der Schraubverbindung wird in Abhängigkeit von Anzugsdrehmoment und Laststrom theoretisch simuliert und meßtechnisch erfaßt. Ferner werden die Bedingungen für die Bildung einer brandgefährlichen glühenden Verbindung [6] zwischen den Kontaktelementen bestimmt. Das Brandrisiko stromdurchflossener Fremdschichten wird mit Hilfe von einfachen Elektroden-Anordnungen untersucht. Die Entladungsenergie, -dauer und die erreichte Temperatur werden als Beurteilungsparameter für die Brandentstehung herangezogen.

Auf der Basis eines aus Meßdaten abgeleiteten Abschaltkriteriums wird eine neuartige digitale Lichtbogen-Abschalteinrichtung für Drehstromsysteme entwickelt und getestet.

Zur Vereinfachung der statistischen Auswertung der Schadensfälle wird außerdem eine Software erstellt, die sich hauptsächlich an Versicherungs-, Energieversorgungsunternehmen, Hersteller sowie an den Verband der Sachversicherer richtet.

2 Elektrische Zündquellen

Fließt elektrischer Strom über unvorhergesehene Wege, können sich lokale Wärmequellen innerhalb eines elektrischen Netzes bilden. Die Höhe ihrer abgegebenen Leistung an die Umgebung und ihre Einwirkungsdauer bestimmen das Erwärmungsverhalten eines sich unmittelbar in der Nähe befindlichen brennbaren Materials, bei dem es sich i. A. um einen Kunststoff handelt.

Wird einer verschmutzten und daher an der Oberfläche leitenden Isolation zwischen zwei Elektroden eine ausreichende Leistungsdichte zugeführt, entstehen Erwärmungsvorgänge, die sich in der Fremdschicht als *Kriechstromwärme*, *Gasentladungen* oder exotherme Reaktionen auswirken können.

In Schadensakten werden oft unvorhersehbare Isolationsfehler, Lichtbogenentladungen und elektrische Kontakte als potentielle Ursachen von Bränden angegeben. In diesem Kapitel werden die Erscheinungsformen dieser Zündquellen näher erläutert.

2.1 Kriechwege

Umgebungseinflüsse (Luftfeuchtigkeit, Staub und korrosive Gase) führen auf Dauer zur Bildung von Kriechwegen auf Isolationsoberflächen. Die abgelagerten Produkte bestehen aus Nichtleitern, Elektrolyten oder Elektronenleitern und werden als *Fremdschicht* bezeichnet.

Elektrolyte bilden in der Regel den bedeutsamsten Bestandteil einer Fremdschicht [31]. Durch Feuchtigkeitsniederschlag erhöht sich ihre Leitfähigkeit. Die elektrolytischen Bestandteile (z.B. Natriumchloridlösung NaCl) werden in Ionen dissoziiert (Na^+ und Cl^-) und es fließt ein Ionenstrom, der die Fremdschicht erwärmt. Das Wasser verdunstet oder verdampft anschließend. Dabei trocknen Orte erhöhter Stromdichte (Stromverengungen) schneller aus als die übrige Fremdschicht, die z.B. eine Leitfähigkeit k besitzt. Die angelegte Feldstärke \vec{E} bestimmt demnach die zugeführte Leistungsdichte $p = k\vec{E}^2$ und damit die Zeit bis zur maximal erreichbaren Temperatur in der Fremdschicht: die *Siedetemperatur* des Elektrolytes (Siedetemperaturen von Wasser: 100°C, NaCl-Lösung: 109°C, Kupferchlorid-Lösung: 120°C, Natronlauge: 318°C). Die frei gesetzten Reaktionswärmen an den Elektroden und die Stromwärme des Kriechstromes müssen jedoch die Wärmeverluste an die Umgebung ausgleichen sowie die Wärmekapazitäten der Fremdschicht aufladen, um wesentliche Übertemperaturen und Überschlüge verursachen zu können. Welches Brandrisiko sie darstellen, wird im Rahmen dieser Arbeit untersucht.

2.2 Gasentladungen

Bei Luftstrecken-Entladungen zwischen zwei Elektroden spricht man von *Durchschlägen*, bei Fremdschichten von *Überschlägen*. Luftdurchschläge im homogenen Feld werden mit Hilfe der

durch zahlreiche Messungen bestätigten Paschenkurve¹ $U = f(p, d)$ (U : Gleichspannung, d : Abstand zwischen den Elektroden, p : Druck) beschrieben. Danach beträgt z.B. die Durchschlagsspannung bei atmosphärischem Druck $p = 10^5 \text{ N/m}^2$ und bei einem Elektrodenabstand $d = 7 \text{ mm}$: $U = 327 \text{ V}$. Der elektrische Durchschlag setzt eine ausreichende Ionisierung (Stoßionisation oder Thermoionisation) des Gasraumes zwischen den Elektroden bei gegebener Feldstärke voraus.

Mit Hilfe der Saha-Gleichung (siehe GA1 in Anhang A) kann der Ionisierungsgrad eines Plasmas (Elektronen, Ionen, neutrale Atome und Moleküle) bestimmt werden. Aus der Gleichung folgt, daß ein Metaldampf-Plasma bei 10000 K bereits zu etwa 50% ionisiert ist, während bei einem Luftplasma gleichen Volumens der Wert lediglich bei 1% liegt. Dies zeigt, welche hohen Temperaturen notwendig sind, um Gase mit fester Molekülbindung wie sie in der Luft enthalten sind, zu dissoziieren und damit leitfähig zu machen. Im Niederspannungsbereich reichen die Feldstärken für eine direkte Stoßionisierung meist nicht aus. So bleibt die *Thermoionisation* die primäre Ursache für die Leitfähigkeit des Plasmas.

Je nach Höhe der Stromdichte können sich *Dunkel-*, *Glimm-* oder *Bogen-*Entladungen nach der Entzündung stationär aufrechterhalten. Tabelle 2.2. zeigt, daß die Wärmeentwicklung durch stationäre Dunkelentladungen aufgrund der niedrigen Ströme vernachlässigt werden darf. Bogenentladungen können dagegen bei niedrigen Brennspannungen hohe Stromdichten und beträchtliche Temperaturen hervorrufen. So treten durch Thermo- oder Feldemission an der Kathode (beide Emissionsarten wirken meistens zusammen) fortlaufend Elektronen in den Gasraum ein.

Tabelle 2.2 Stationäre Brennspannungen und entsprechende mögliche Ströme der drei Entladungsarten nach [9]

Entladungsart bei Gleichspannung ²	Mindestbrennspannung / V	Strom / A
Dunkelentladung	600	$10^{-20} - 10^{-5}$
Glimmentladung	300	$10^{-5} - 1$
Bogenentladung	20	> 1

In Schadensakten wird über *unvorhersehbare* Lichtbogenkurzschlüsse berichtet, die in Hausinstallationen oder Verteilerschränken zu Bränden geführt haben sollen. In dieser Arbeit wird daher das Brandrisiko von Glimm- und Bogenentladungen untersucht. Ihre Auswirkungen auf den Stromkreis (in der Nähe von Transformatorstationen) und umgekehrt werden im Folgenden beschrieben. Außerdem wird der Unterschied zu *beeinflußbaren* Lichtbögen innerhalb von Schaltern deutlich gemacht.

¹ Gilt auch im inhomogenen Feld bis zum Elektrodenabstand $d = 0,1 \text{ mm}$ [31].

² Für Wechselspannungen sind Scheitelwerte zu betrachten.

2.2.1 Der Lichtbogen in einem Stromkreis

Drei Hauptursachen können zur Bildung eines Lichtbogens in einem Stromkreis führen (Bild 2.2.1):

- a Trennung stromdurchflossener Kontakte
- b Schmelzen eines stromdurchflossenen Leiters
- c Isolationsfehler (siehe 2.1) zwischen gegeneinander isolierten Leitern (Durchschlag, Überschlag).

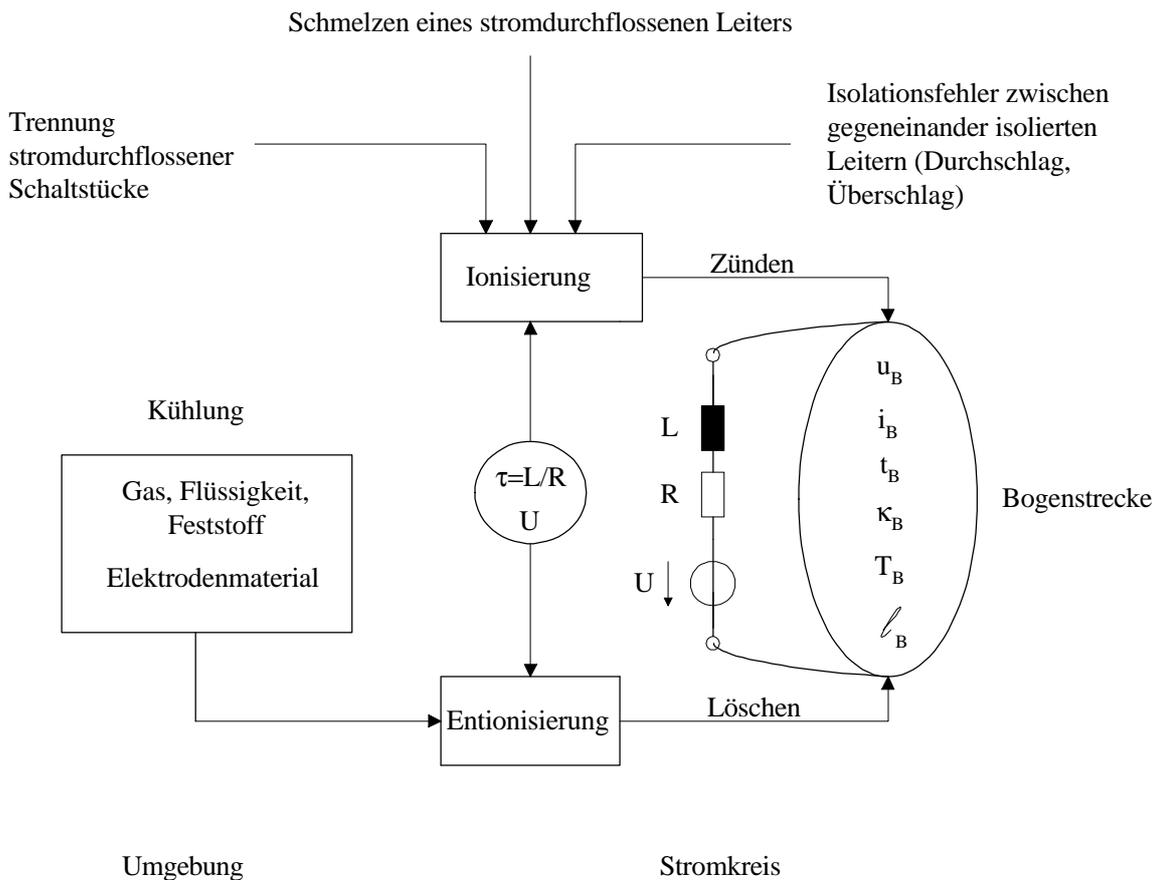


Bild 2.2.1: Ursachen eines Lichtbogenkurzschlusses und Einflußparameter auf seine Dauer

Die Zündung eines Lichtbogens setzt eine genügende Ionisierung der Luftstrecke zwischen den betreffenden Elektroden voraus. Die entsprechend hohe Temperatur der Bogensäule T_B (meist größer als 5000 K) verleiht dem Bogen eine hohe elektrische Leitfähigkeit κ_B [10]. Die Kühlung durch die unmittelbare Umgebung (Gas, Flüssigkeit, Feststoff, Elektrodenmaterial), die Höhe der Versorgungsspannung U sowie die Zeitkonstante des Stromkreises t entscheiden über das Weiterbrennen des Lichtbogens und damit über das Brandrisiko.

Eine hohe Wiederkehrspannung des Lichtbogens nach seinem Erlöschen und eine ungünstige Stromreduzierung verlängern seine Brenndauer bzw. verhindern eine rechtzeitige Abschaltung durch eine Schutzvorrichtung. Diese brandgefährlichen Einflüsse werden in den nächsten Abschnitten beschrieben.

2.2.2 Einflußparameter auf die Lichtbogendauer

In der Nähe von Trafostationen oder Hausinstallationen können Lichtbogenkurzschlüsse meist durch den in Bild 2.2.1 dargestellten Stromkreis mit der Differentialgleichung $L \frac{di}{dt} = U - Ri - u_B$ beschrieben werden, wobei u_B die Bogenspannung ist.

Durch die Gleichung wird deutlich, daß eine Stromabnahme (d.h. Einleitung der Löschung des Lichtbogens) erst erreicht wird, wenn die treibende Spannung $U - Ri$ die Bogenspannung unterschreitet, d.h. ein Lichtbogen erlischt nur, wenn in ihm die gesamte in der Induktivität gespeicherte Energie $W_L = \frac{1}{2} Li^2$ komplett in Lichtbogenarbeit umgesetzt wird. W_L geht gegen Null, falls im Nulldurchgang eines Wechselstromes ausgeschaltet wird.

Die praktisch realisierbare Minimierung der Lichtbogenarbeit ist *nur* im Fall der Trennung stromdurchflossener Schaltstücke möglich. So wird das Nullwerden des Stromes durch eine künstliche schnelle Erhöhung der Lichtbogenspannung über die treibende Spannung erzwungen. Dies kann durch Verlängerung des Lichtbogens (z.B. Aufteilung in Teillichtbögen in einer Anordnung von querliegenden Blechen durch magnetische Beblasung³) oder durch Erhöhung seiner Feldstärke $E_B \approx \frac{u_B}{l_B}$ (intensive Kühlung) erfolgen.

Zum Abschalten von Wechselstrom wird der natürliche Nulldurchgang genutzt. Erst dann soll eine intensive Kühlung einsetzen, um eine rasche Entionisierung der Strecke zu erzielen.

Die Wiederkehrspannung. Betrachtet man einen Wechselstromkreis, bei dem der Strom durch Induktivitäten und ohmsche Widerstände begrenzt wird, so ist parallel zu einem Schalter oder Fehler der Art **b** oder **c** nach Abschnitt 2.2.1 immer eine Kapazität vorhanden (Bild 2.2.2.1), die durch die Eigenkapazitäten der Anlage gebildet wird (hier konzentriert in C angenommen). Die Wiederkehrspannung setzt nach dem Nulldurchgang von Bogenstrom und -spannung ein. Der Schaltvorgang des Reihenschwingkreises nach Bild 2.2.2.1 kann durch die Differentialgleichung $L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt + Ri = u$ beschrieben werden.

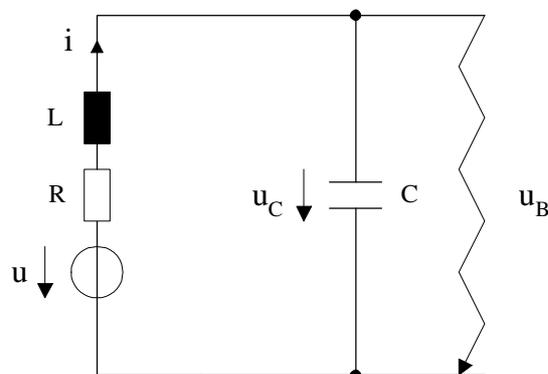


Bild 2.2.2.1: Einphasennetz mit einem Lichtbogenfehler

³ Erzeugung von zusätzlichen Magnetfeldern durch Spulen oder besonders geformte Kontaktgeometrien

Beim Nulldurchgang der Lichtbogenspannung ($u_c(t)=0$) setzt eine Verfestigung der Lichtbogenstrecke ein. Mit den Anfangswerten $i(t=0)=0$, $u_c(t=0)=0$, mit einer Dämpfung $0 < D < 1$ und $u(t)=U\sqrt{2}\cos(\omega t)$ ergibt sich für die Wiederkehrspannung nach dem Nulldurchgang $u_c(t) = 2|a|e^{st} \cos(\omega_1 t + j_a) + \frac{I\sqrt{2}}{\omega C} \sin(\omega t + j_i)$

$$\text{mit } j_i = -\arctan\left(\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}\right), s = -\frac{R}{2L}, \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \omega_1 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2},$$

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}, a = -\frac{I\sqrt{2}}{2\omega C} \sin j_i + j \frac{-\frac{I\sqrt{2}}{2\omega C} s \sin j_i + \frac{I\sqrt{2}}{2C} \cos j_i}{\omega_1} \text{ und } j_a = \text{Arc}(a).$$

$u_c(t)$ ist qualitativ für den in der Praxis am häufigsten anzutreffenden Fall $\omega_1 \gg \omega$ in Bild 2.2.2.2 dargestellt. Die Netzkapazität C wird von der Lichtbogenspannung auf die Netzspannung umgeladen. Das Amplitudenverhältnis $\frac{u_c}{u}$ sowie das Kreisfrequenzverhältnis⁴ $\frac{\omega_1}{\omega}$ bestimmen den Einschwingvorgang der wiederkehrenden Spannung. Diese muß um den Scheitelwert der Netzspannung herumschwingen, wenn die Phasenverschiebung zwischen Strom und Netzspannung 90° beträgt. Ihr Wert kann erheblich über dem Maximum der Netzspannung liegen und damit eine Wiederzündung des Lichtbogens bewirken.

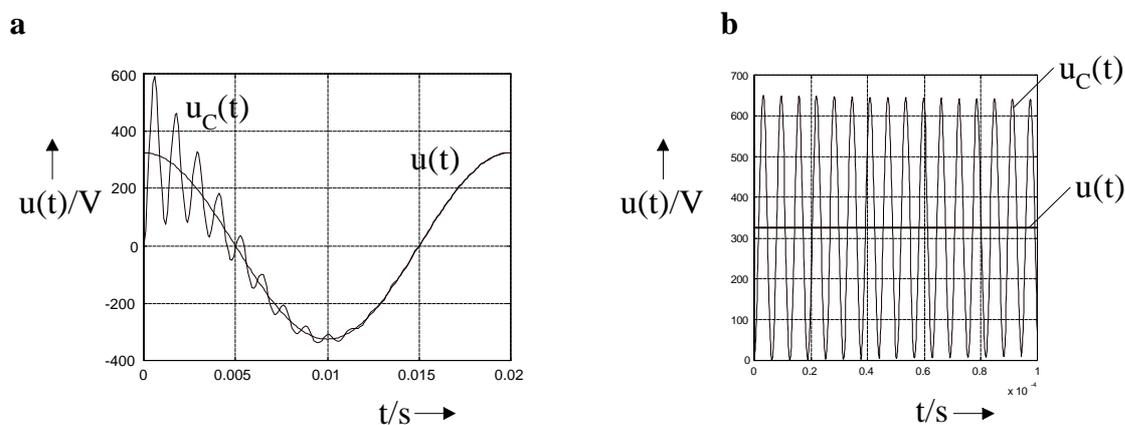


Bild 2.2.2.2: Wiederkehrspannung $u_c(t)$

a qualitativ

b simuliert für das Beispiel mit $U = 230\text{V}$, $R = 0,27\Omega$, $L = 6,2\text{mH}$, $C = 1\text{nF}$,

$\omega = 2\pi 50\text{Hz}$ (Simulationszeit: 0,1 ms)

Die Stromreduzierung. Die Aneinanderreihung von leitenden Kriechspuren zu einem Kriechweg (Abschnitt 2.1) kann zum Kurzschluß führen. In Drehstromnetzen der Niederspannungstechnik

⁴ In praktischen Fällen gilt $1 < \frac{u_c}{u} < 1,8$ und $500 \text{ Hz} < f_1 < 50 \text{ kHz}$ [11].

sind die Kurzschlußarten einpoliger Erdkurzschluß und Erdschluß am häufigsten anzutreffen. Diese können sich zu mehrpoligen Kurzschlüssen entwickeln.

Die Impedanz des Lichtbogens an der Fehlerstelle begrenzt den Strom, für den die Schutzrichtungen eingesetzt sind. Im Folgenden sollen rechnerisch für die Fälle 1 (reiner Kurzschluß), 2 und 3 (Lichtbogenkurzschluß) laut Bild 2.2.2.3 die Bogenleistung, die im Mittel an die Umgebung abgegeben wird, und im Vergleich dazu die mittlere Leistung, welche die ohmschen Widerstände in der Kurzschlußbahn aufnehmen, bestimmt werden. Als Beispiel werden die Netzparameter einer typischen Trafostation $u(t) = 230\text{V}\sqrt{2} \sin(2\pi 50\text{Hz } t)$, $R = 0,27 \Omega$ und $L = 6,21\text{mH}$ angenommen. Eigene Messungen mit den obigen Parametern haben ergeben, daß die Spannung am Lichtbogen zwischen Sammelschienen aus Kupfer bei Abständen bis zu 30mm überwiegend eine Rechteckform mit einer mittleren Amplitude von ca. 100 V aufweist. Daher wird die Bogenspannung als $u_B(t) = 100 \text{ V} \cdot \text{sign}(i)$ angenommen.

Die hier benutzten Zahlenbeispiele sollen nur zur Veranschaulichung der erwarteten Größenordnung der Lichtbogenleistung im Vergleich zur Kurzschlußleistung und der Stromreduzierung an der Fehlerstelle dienen.

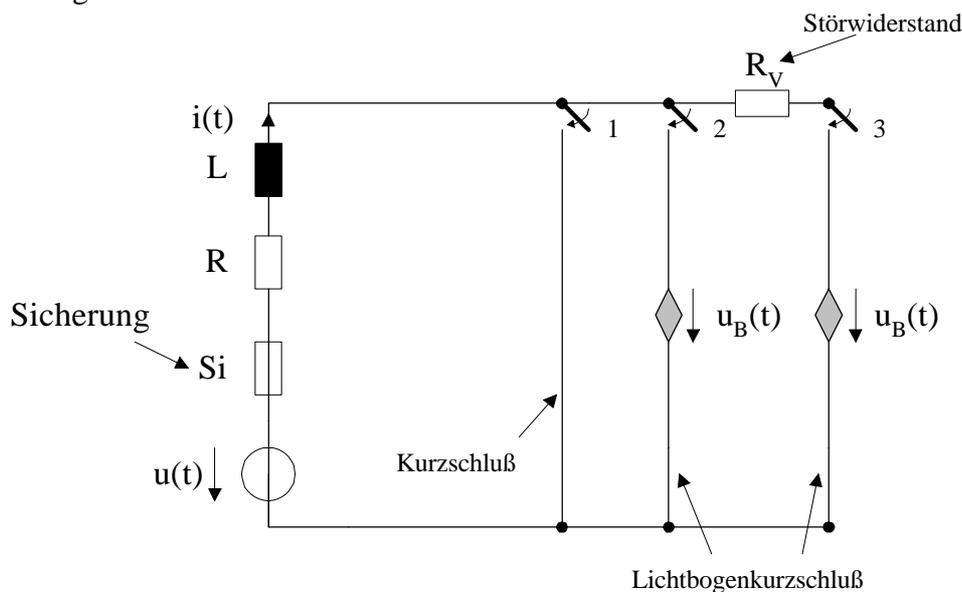


Bild 2.2.2.3: Vereinfachtes Ersatzschaltbild einer Kurzschlußbahn (L: Gesamtinduktivität der Kurzschlußbahn, R: Gesamtwiderstand der Kurzschlußbahn)

Für $i(t)$ erhält man dann die Differentialgleichung

$$\frac{di}{dt} = \frac{u(t) - u_B(t) - (R + R_V)i}{L}$$
 mit $i(t=0) = 0$. Es werde im Nulldurchgang der Versorgungsspannung eingeschaltet.

Die berechneten Werte (Tabelle 2.2.2) zeigen, daß innerhalb der ersten Strom-Halbwelle (ca. eine halbe Netzperiode) bei reinem Kurzschluß (Stellung 1) eine mittlere Leistung von $P_R = 8,455 \text{ kW}$ vom Widerstand R aufgenommen wird. Diese ist gleichmäßig auf die Stromkreisleitungen verteilt und kann mit einer entsprechend dimensionierten Sicherung minimiert

werden. Entsteht hingegen ein Lichtbogen an der Fehlerstelle (Stellung 2), gibt die Bogenstrecke ca. das vierfache der in R verbrauchten Leistung an die Umgebung ab. Der maximale Strom wird dabei um 42% reduziert (Bild 2.2.2.4). Es wird der Lichtbogenstrecke eine beträchtliche Leistung P_B vom Netz zugeführt. Während dieser kritischen Zeit kann es zu erheblichen Schäden an der Fehlerstelle kommen.

Tabelle 2.2.2 Berechnete Mittelwerte für eine Strom-Halbwellen zur Beurteilung der Gefährdung durch den Lichtbogenkurzschluß (R_V : eventuelle Leitungs- und Übergangswiderstände in der Kurzschlußbahn, ℓ_V : entsprechende Leitungslänge für R_V als Kabel mit dem Querschnitt $1,5 \text{ mm}^2$ bei $T = 80^\circ\text{C}$; P_R : verbrauchte Leistung in R bzw. $(R + R_V)$, P_B : umgesetzte mittlere Leistung im Lichtbogen)

ℓ_V / m	0	0	136,5
R_V / Ω	0	0	2
Stellung	1	2	3
I_{eff} / A	177	100,8	47,3
I_{max} / A	273,8	160,3	73,8
P_R / kW	8,455	2,742	5,088
P_B / kW	0	10,078	4,735

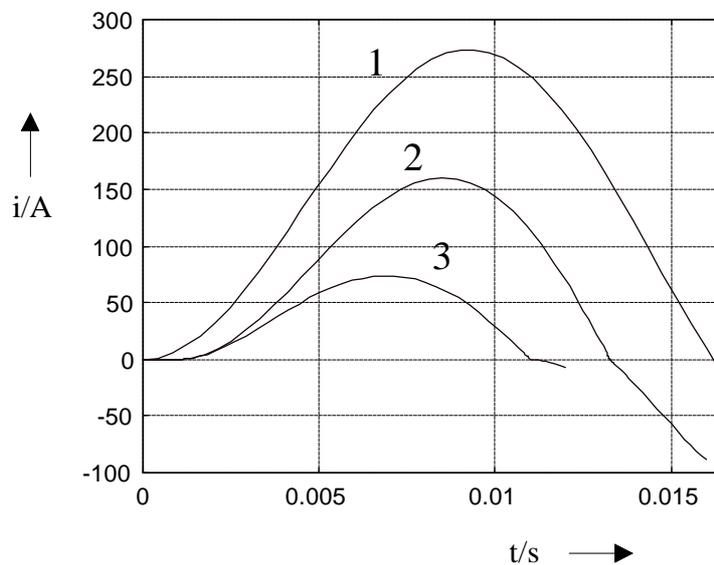


Bild 2.2.2.4: Simulierte Kurzschluß- und Lichtbogenkurzschlußströme für die unterschiedlichen Stellungen

Berücksichtigt man noch eventuelle Übergangswiderstände sowie Erdschleifen durch den Widerstand $R_V = 2\Omega$ (maximal zulässiger Erdungswiderstand nach VDE 0100 § 10), werden an der Fehlerstelle und in den Leitungen je 5 kW an Leistung umgesetzt.

2.3 Erwärmung durch eine Stromverengung

Elektrische Kontakte gelten nach den Schadensakten als gefährliche Brandursache, besonders weil ihre Erwärmung nur schwer detektierbar ist. In diesem Abschnitt wird die Temperatur in einem Kontakt als Funktion der Verlustleistung beispielhaft bestimmt. Anhand eines numerischen Kontaktmodells wird die zeitliche Temperaturentwicklung simuliert. Außerdem wird die Kontaktfläche der in dieser Arbeit untersuchten Schraubverbindung näherungsweise berechnet.

Fließt elektrischer Strom durch eine Kontaktstelle, wird in ihr eine größere Leistung verbraucht als in einem ungeteilten Leiterstück gleicher Ausdehnung. In Abhängigkeit von der einwirkenden Kraft entstehen durch plastische und elastische Verformung mikroskopische Kontaktstellen (Spots). Diese sind zufällig verteilt und weder experimentell noch rechnerisch bestimmbar [1]. Man hilft sich daher mit theoretischen Modellen, die lediglich die physikalischen Erscheinungen in Kontakten veranschaulichen. Als realitätsnah hat sich das Ellipsoiden-Modell erwiesen [1]. In diesem Modell hat die Kontaktfläche die Form einer Ellipse oder eines Kreises. Sowohl Äquipotentiallinien als auch Isothermen sind dann ellipsoidenförmig. In einem symmetrischen Kontakt ergibt sich nach [1] unter den obigen Voraussetzungen für den stationären Zustand folgender Zusammenhang zwischen anliegender Spannung und Höchsttemperatur T_K im Kontakt (Bild 2.3.1):

$$U^2 = 8 \int_{T_u}^{T_K} \rho \lambda dT. \quad (1)$$

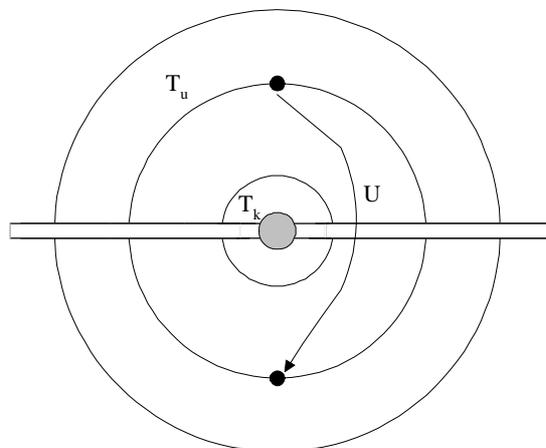


Bild 2.3.1: Gemessene Kontaktspannung U zwischen den Isothermen T_u und T_K

Die Spannung U wird dabei zwischen zwei Punkten gleicher Temperatur T_u beiderseits der Kontaktstelle gemessen. Nach dem Wiedemann-Franz-Lorenz-Gesetz für Metalle gilt weiterhin:

$$r \mathbf{l} = L T. \quad (2)$$

Es sind dabei:

r : spezifischer Widerstand

\mathbf{l} : Wärmeleitfähigkeit

$$\text{Lorenz-Zahl } L = 2,48 \cdot 10^{-8} \frac{\text{V}^2}{\text{K}^2}.$$

Sieht man außerdem vom Einfluß der Temperatur auf die plastische und elastische Verformung und damit von der Verschiebung der Kontaktstellen ab, stellt sich nach [1] im stationären Zustand der Kontaktwiderstand einer Engstelle bei der Temperatur T_K entsprechend der Beziehung

$$R_K = R_u \left(1 + \frac{2}{3} \alpha (T_K - T_u)\right) \quad (3)$$

ein.

Dabei sind:

R_u : Widerstand der Engstelle bei der Temperatur T_u

α : Temperaturkoeffizient des Werkstoffwiderstandes $3,9 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$ [23].

Aus den Gleichungen (1), (2) und (3) ergibt sich eine Beziehung zwischen der Verlustleistung P im Kontakt und dessen Höchsttemperatur T_K . Sie lautet:

$$P = \frac{4L(T_K^2 - T_u^2)}{R_u \left(1 + \frac{2}{3} \alpha (T_K - T_u)\right)} \quad (4)$$

Mit $R_u = 1 \text{ m}\Omega$ bei $T_u = 20^\circ \text{C}$ ergibt sich die Höchsttemperatur in Abhängigkeit von der Verlustleistung nach Bild 2.3.2.

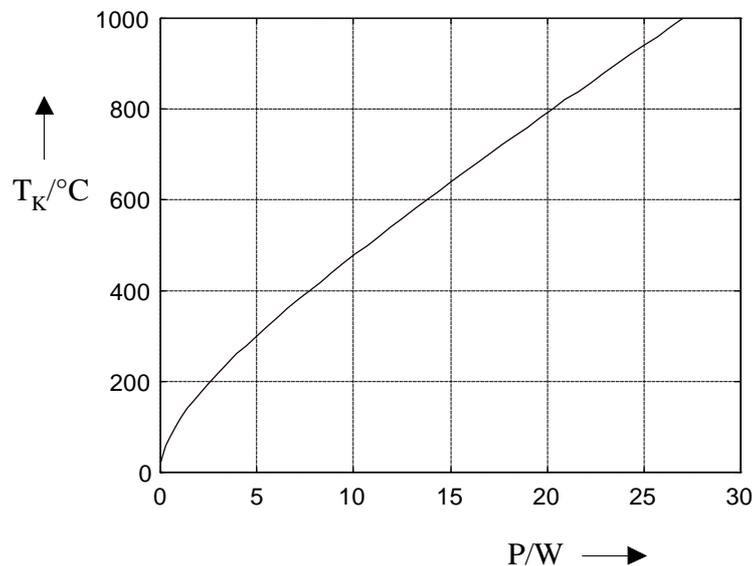


Bild 2.3.2: Abhängigkeit der Temperatur von der Verlustleistung in einem Kupferkontakt im stationären Zustand ausgehend von einem Anfangswiderstand $R_u = 1 \text{ m}\Omega$

Der Verlauf zeigt einen steilen Anstieg der Temperatur bei Erhöhung der im Kontakt verbrauchten Leistung. Der Kontakt reagiert empfindlich auf Leistungszunahme. Für Leistungswerte, die größer sind als 5 W kann der Verlauf durch eine Gerade angenähert werden, die eine Empfind-

lichkeit oder einen Wärmewiderstand von $33 \frac{\text{K}}{\text{W}}$ ergibt. Es ist dabei zu beachten, daß diese Betrachtung nur die Widerstandszunahme aufgrund der Vergrößerung des spezifischen Widerstandes durch Erwärmung der Kontaktstücke berücksichtigt. Tatsächlich ändern sich im Experiment auch ihre Festigkeitseigenschaften, so daß der Widerstand mit zunehmender Temperatur nicht stetig zunimmt. Durch Rekristallisationsprozesse (Fließen der Kontakt gebenden Mikrospitzen) geht ein Teil der ursprünglichen Festigkeit verloren. Dies beginnt bei einer charakteristischen Temperatur T_E , die Entfestigungstemperatur genannt wird (siehe Tabelle TA2, Anhang A) und erzwingt eine sprunghafte Abnahme des Kontaktwiderstandes. Danach steigt er erneut an. Der Vorgang kann sich mehrmals wiederholen, bis schließlich bei zunehmendem Strom (d.h. steigender Temperatur) der Schmelzpunkt T_S erreicht wird und der Kontaktwiderstand zusammenbricht: Die Kontaktstücke sind miteinander verschweißt. Entfestigungs- und Schmelztemperatur können entsprechende Spannungen zugeordnet werden, die mit Hilfe von Gleichung (1) berechnet werden können. [2] zeigt jedoch, daß diese keine Konstanten, sondern abhängig vom Stromscheitelwert sind.

Im Folgenden wird die im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Schraubverbindung, die in der Elektroinstallation sehr häufig eingesetzt wird und für die die oben beschriebenen Vorgänge gelten, näher betrachtet.

2.3.1 Bestimmung der Kontaktfläche einer Schraubverbindung

Durch Ausüben eines Anzugs-Drehmomentes M_A wird der abisolierte Abschnitt eines elektrischen Leiters zwischen einer leitenden Schiene (meist gleichen Werkstoffes) und einer umgebenden Halterung fest eingeklemmt (Bild 2.3.1.1). Zur Bestimmung der entstandenen Kontaktfläche zwischen Leiter und Schiene wird angenommen, daß eine rein elastische Verformung durch HERTZsche Pressung stattfindet [4]. Aus dem Anzugsdrehmoment M_A , das sich aus der Summe von Gewinde- (M_G) und Kopf-Reibungsmoment (M_K) ergibt, resultiert eine näherungsweise gleichmäßige Vorspannkraft F auf die Kontaktfläche [3]. Diese errechnet sich näherungsweise

$$\text{aus: } F = \frac{M_A}{0,16 \cdot P + 0,58 \cdot \mathbf{m}_G d_2 + \mathbf{m}_K r_m}.$$

hergestellt, daß ein Leiter auf eine leitende Schiene gedrückt wird. Für einen solchen unsymmetrischen Kontakt ergibt sich ein Potentialbild wie es in Bild 2.3.2.1 dargestellt ist.

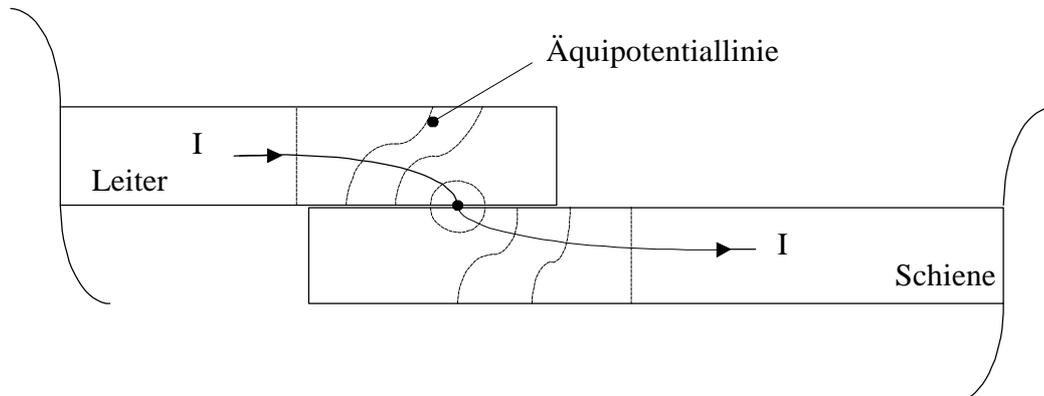


Bild 2.3.2.1: Potentialbild und Stromlinie zwischen Leiter und Schiene

Zur Ermittlung der Temperaturverteilung in einer Engstelle, wurde beispielhaft die in Bild 2.3.2.2 skizzierte Anordnung untersucht.

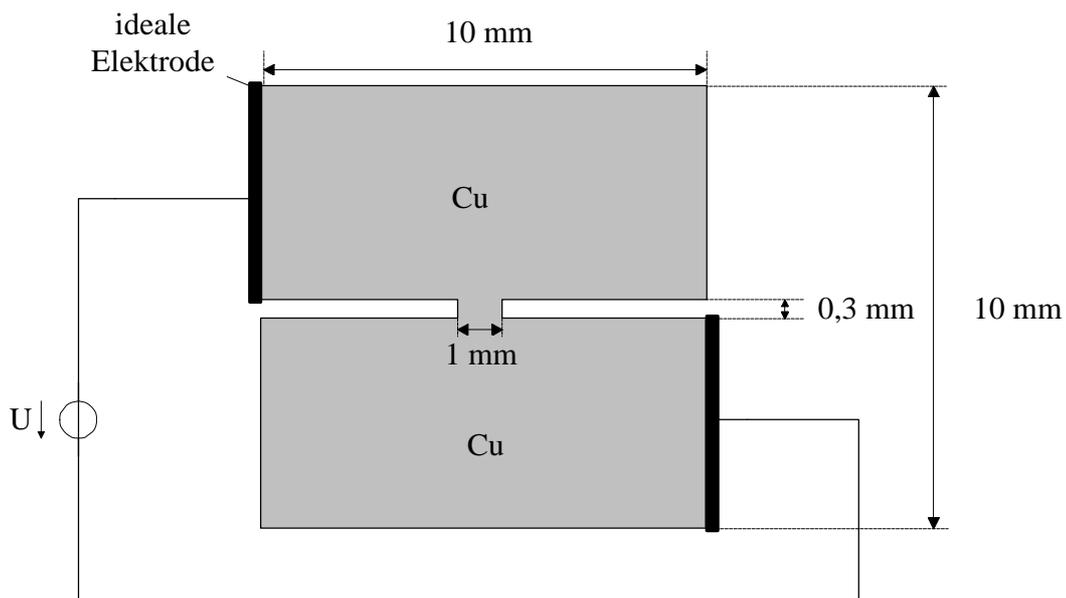


Bild 2.3.2.2: Anordnung zur Ermittlung der Temperaturverteilung in der Kontaktstelle

Diese besteht aus zwei senkrecht zur Zeichenebene sehr langen Kupfer-Kontaktstücken, die jeweils mit einer ideal leitenden Elektrode verbunden sind. An die Elektroden wird die konstante Spannung $U = 0,5 \text{ V}$ angelegt. Vernachlässigt man die Wärmeabgabe an die Umgebung (überall adiabate Grenzen) und in Längsrichtung, erhält man für eine Belastungsdauer von $0,2 \text{ ms}$ das nach Bild 2.3.2.3 dargestellte Temperatur- und Potentialfeldbild.

Dieses mit ANSYS berechnete Finite-Elemente-Modell zeigt, daß am Rand der Verengung eine höhere Temperatur herrscht als in ihrem Inneren. Aufgrund der hohen Stromdichte an den Rändern der Kontaktfläche ist zu erwarten, daß dort für eine bestimmte Zeit die Temperatur am höchsten sein wird. Weitere Simulationen zeigen, daß der Rest der Kontaktstelle rasch diese

Temperatur annimmt, so daß sich schon nach kurzer Belastungszeit eine gleichmäßig verteilte Temperatur innerhalb des Kontaktbereiches ergibt. Die erzeugte Verlustleistung im Kontaktbereich führt zu einem Wärmestrom, der durch die umgebenden Werkstoffe und gegebenenfalls durch die Luft abgeführt wird.

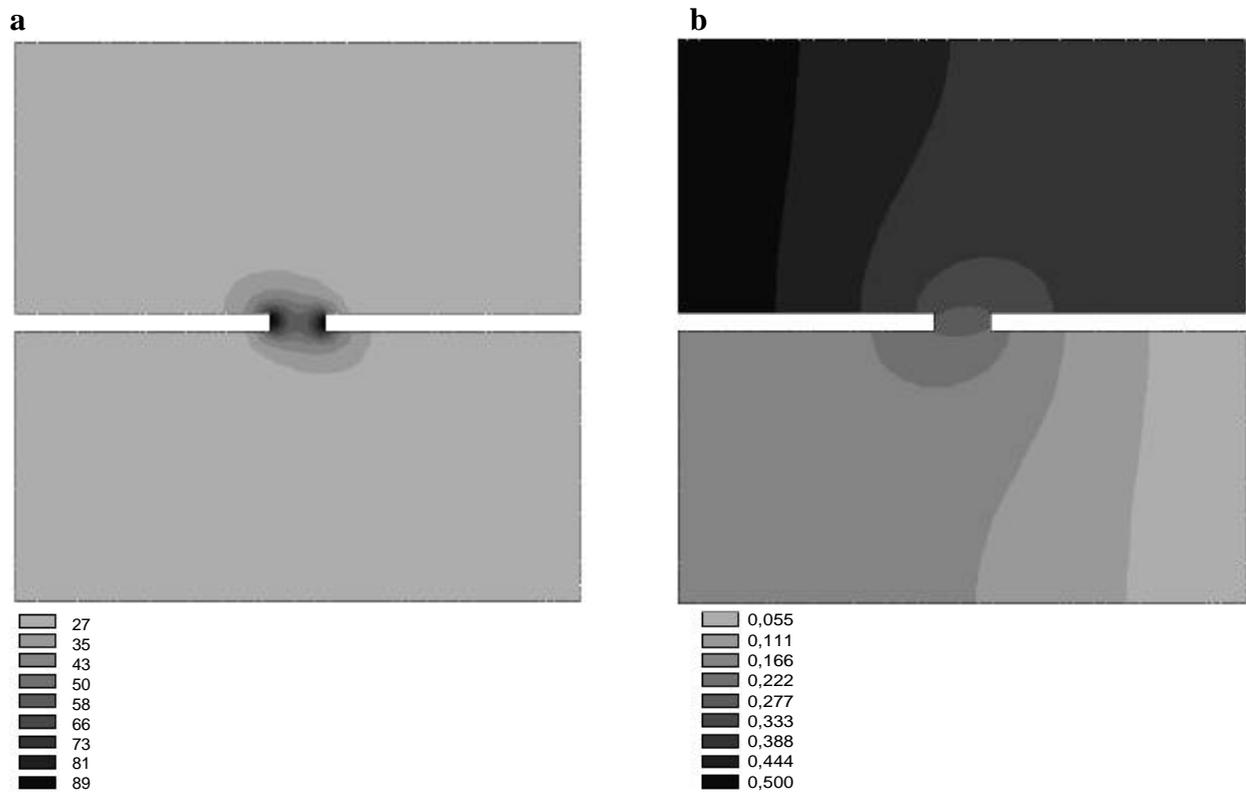


Bild 2.3.2.3: **a** Temperaturverteilung nach 0,2 ms Belastungsdauer (/ °C)
b Zugehöriges Potentialbild (/ V)

3 Kunststoffentzündung

Brennbare Materialien kommen in der Elektrotechnik hauptsächlich als Kunststoffe vor. Ihr Brandverhalten ist von mehreren Parametern wie Art der Zündquelle (Flamme, Funken, glühendes Objekt), Übertragungsart (Leitung, Strahlung, Konvektion), Übertragungsweg, Wärmemenge, Geometrie und Ventilation abhängig.

Dabei kann die Erwärmung auf eine kritische Temperatur als die Ursache der Zersetzung des Kunststoffes angesehen werden. Unter ungünstigen Bedingungen können seine Entzündung und Verbrennung sowie eine weitere Ausbreitung des entstandenen Feuers folgen.

In diesem Kapitel wird der Prozess der Erwärmung von Kunststoffen sowie die Entzündung ihrer Zersetzungsprodukte näher beschrieben.

3.1 Materialerwärmung

Bevor sich ein Material entzündet, findet in ihm ein Wärmeleitungsvorgang statt. Dies gilt für Kontaktpaare hoher Verlustleistung und für Leiter mit Stromüberlast, welche die Wärme meist über das Metall direkt auf den Kunststoff übertragen. Es wird in diesem Kapitel gezeigt, daß die Schnelligkeit der Erwärmung durch die Wahl bestimmter Materialeigenschaften beeinflußt werden kann. Eine Entzündung kann damit zumindest verzögert werden.

Solange keine chemischen Prozesse innerhalb eines inerten und isotropen Materials stattfinden, kann sein Erwärmungsverhalten durch die Wärmeleitungsgleichung beschrieben werden. Einem unendlichen Halbraum, ohne Wärmequellen im Volumen (siehe Bild 3.1.1), der Temperaturleitfähigkeit $a = \frac{\lambda}{\rho c}$ und mit den oben beschriebenen Eigenschaften wird eine

konstante Wärmestromdichte q an der Oberfläche eingepreßt. Die zugehörige Wärmeleitungsgleichung lautet $\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$. Die Lösung soll zusätzlich die Anfangsbedingung

$T(x, 0) = T_0$ und die Randbedingungen: $-\lambda \frac{\partial T(t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = q$, $T(\infty, t) = T_0$ erfüllen.

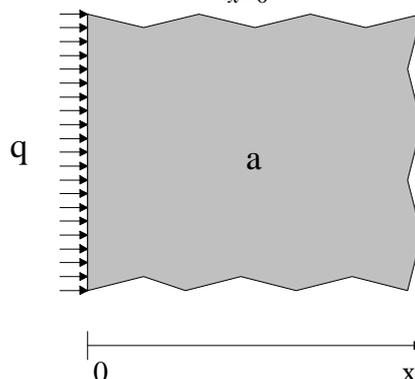


Bild 3.1.1: Unendlich ausgedehnte Platte

Mit Hilfe des Separationsansatzes (nach Variablensubstitution) oder mit der Laplacetransformation bekommt man die Lösung für das Temperaturfeld (siehe auch [38]):

$$\Delta T = T(x,t) - T_0 = \frac{2q\sqrt{at}}{\lambda} \operatorname{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) = 2q \frac{1}{\sqrt{\lambda\rho c}} \sqrt{t} \cdot \operatorname{ierfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right).$$

Die Funktion ierfc ist in Bild A1 (siehe Anhang A) dargestellt¹. Ist das Argument von ierfc größer als Zwei, findet aufgrund von $\operatorname{ierfc}(2) = 9,7802 \cdot 10^{-4}$ keine nennenswerte Temperaturänderung mehr innerhalb des Materials statt. Dies gilt für $\frac{x}{2\sqrt{at}} > 2$ oder $x > 4\sqrt{at}$. In Abhängigkeit von einer bestimmten Belastungsdauer ändern sich damit die Wärmeübertragungseigenschaften eines Materials nicht, wenn seine Dicke weiter vergrößert wird. Es kann also beurteilt werden, ob es an einer bestimmten Stelle nach einer gewissen Zeit entzündet werden kann.

Bild 3.1.3 zeigt beispielhaft die Temperaturentwicklung an der Oberfläche ($x = 0$) unterschiedlicher Kunststoffe und Metalle für $q = 1 \text{ W/cm}^2$ während einer Millisekunde. Die erhaltenen Temperaturverläufe zeigen, daß die Kunststoffe eine höhere Temperaturzunahme aufweisen als Metalle. Je kleiner das Produkt $\lambda\rho c$ ist, desto größer ist der Temperaturzuwachs ΔT . So ist bei gleicher Wärmebelastung die Temperatur an der PVC-Oberfläche nach $t = 1 \text{ ms}$ ca. 80-fach höher als die an der Oberfläche einer Kupferplatte.

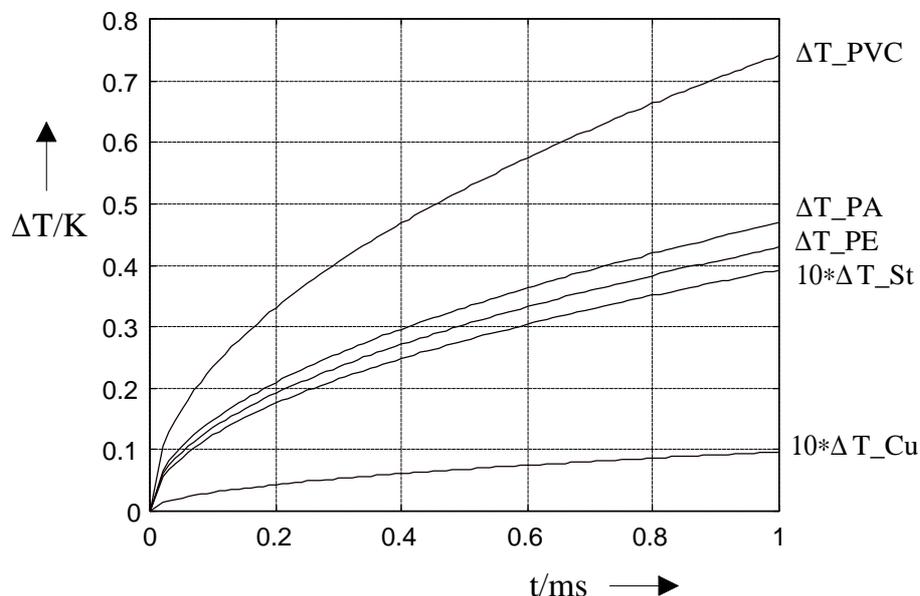


Bild 3.1.3: Temperaturentwicklung an der Oberfläche unterschiedlicher Kunststoffe und Metalle während $t = 1 \text{ ms}$, PVC: Polyvinylchlorid, PA: Polyamid, PE: Polyethylen, St: Stahl, Cu: Kupfer

¹ $\operatorname{ierfc}(x) = \int_x^\infty (1 - \operatorname{erf}(u)) du = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-x^2} - x(1 - \operatorname{erf}(x))$ mit $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-u^2} du$

Werden Wärmeleitfähigkeit, Dichte und spezifische Wärmekapazität minimiert, vermindert sich die Entzündungswahrscheinlichkeit der Materialoberfläche.

3.2 Thermische Zersetzung

Kunststoffe werden durch chemische Verknüpfung von Monomeren (einfache Moleküle, z.B. Ethylen) in Polymere (Makromoleküle, z.B. Polyethylen) gebildet. Die Bindungen zwischen den Atomen können wiederum durch Aufwendung einer bestimmten Energie (pro Mol) aufgespalten werden (Pyrolyse oder Depolymerisation). Die Reihenfolge der Bindungen nach abnehmender Dissoziationsenergie $C-F > C-H > C-C > C-Cl$ zeigt, daß die Bindung $C-Cl$ (326 kJ/mol) die geringste Bindeenergie besitzt. In einem Polyvinylchlorid-Makromolekül stellt es das schwächste Glied dar. Somit wird die Aufspaltung zuerst dort stattfinden. Ein höheres Temperaturniveau ist erforderlich, damit eine kontinuierliche Zersetzung eingeleitet wird. In der Tabelle TA1 (siehe Anhang A) sind die erforderlichen minimalen Zersetzungstemperaturen einiger Kunststoffe der Elektrotechnik angegeben. Bei der Zersetzung entstehen freie Radikale, die neben der Wasserstoffmigration einen Zerfall der Makromoleküle verursachen. Weiterhin sind Polymere in der Lage, atmosphärischen Sauerstoff so zu absorbieren, daß bei kontinuierlicher Wärmezufuhr (Thermo-Oxidation) Alkohole, Ketone, Aldehyde und Carbonsäuren entstehen können. Die Oxidationsprozesse kontrollieren die Zusammensetzung der Gasphase, die eine minimale Gas-Konzentration für eine eventuelle Zündung erreichen kann. Bild 3.2 zeigt die nach Paciorek [12] gemessene Konzentration der entstandenen Gase durch die Pyrolyse von PVC in Luft bei $T = 400^{\circ}\text{C}$. Die erhaltenen Produkte bestehen zu ca. 50% aus Chlorwasserstoff. Der Rest der Gase beinhaltet überwiegend Dämpfe und Kohlendioxid. Benzol ist giftig und brennt mit rußender Flamme.

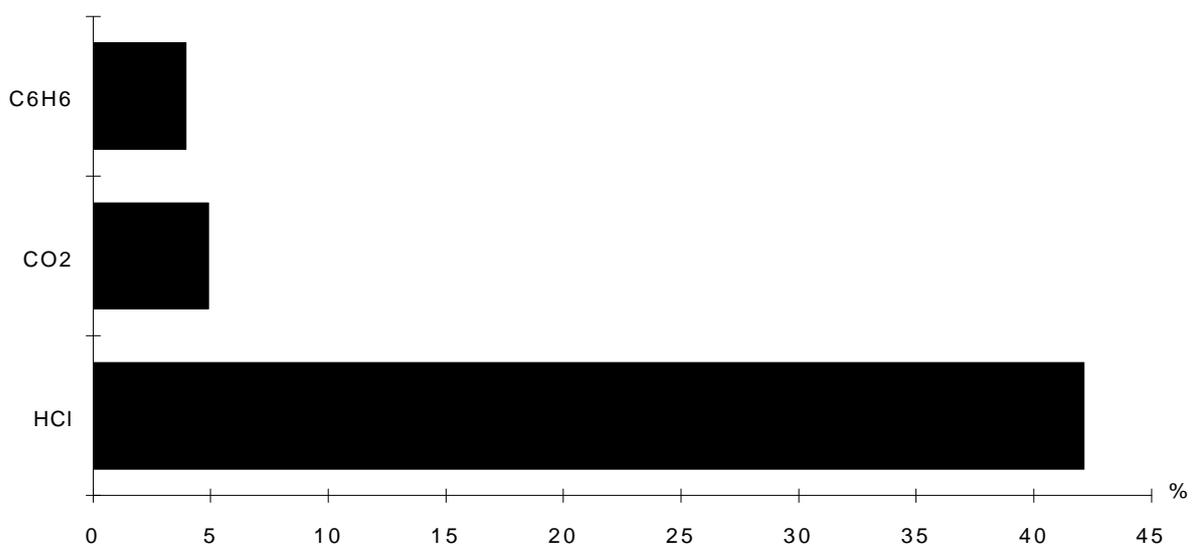


Bild 3.2: Konzentration der wichtigsten detektierten Pyrolyse-Gase bei der Pyrolyse von PVC (ohne Zusatz von Weichmachern) in Luft bei $T = 400^{\circ}\text{C}$ nach Paciorek [12]

3.3 Zündung und Verbrennung

Die Verbrennung ist ein Oxidationsprozeß, der sowohl durch Lichterscheinung als auch durch Wärmeentwicklung begleitet wird. Die Lichterscheinung wird durch die Zündung eingeleitet. Die Verbrennung der Kunststoffe beginnt meistens mit einem Flash-over² der Zersetzungsprodukte in der Gasphase.

Nach Hilado [13] muß ein Gasgemisch bestimmte Eigenschaften aufweisen, damit es zündfähig wird. Die Konzentrationsmenge eines zündfähigen Gasgemisches liegt zwischen einer unteren G_u und oberen Grenze G_o (Bild 3.3.1). Unterhalb von G_u und oberhalb von G_o reicht die Brennstoff- bzw. die Sauerstoffmenge (keine stöchiometrischen Verhältnisse³) nicht aus, um eine Oxidation aufrecht zu erhalten. Erst oberhalb einer minimalen Temperatur T_{Min} ist die Gasmenge $G_u < G < G_o$ durch eine äußere Zündquelle entzündbar. Ab T_{Auto} ist eine Selbstentzündung ohne fremde Zündwirkung möglich. Analysen der Gasphase [12] haben ergeben, daß die Oxidation der Kohlenwasserstoffe (C_xH_y) in einer Entfernung von wenigen Millimetern von der schmelzenden Materialschicht stattfindet (Zone der Pyrolyse: Bild 3.3.2). Direkt über dieser Verbrennungszone wurden nur noch Verbrennungsendprodukte wie Wasser, Kohlenmonoxid und Kohlendioxid detektiert. Nach Stütz [28] findet die Oxidation der festen Phase unter der brennenden Oberfläche in einer Entfernung statt, die kleiner als 1,6 mm ist.

Die Überlagerung aller thermischen Effekte der endotherm und exotherm in der festen und in der Gasphase ablaufenden Reaktionen ergibt die gesamte Verbrennungswärme. Johnson [29] hat festgestellt, daß die Mindestmenge an Sauerstoff, die zur selbstständigen Weiterunterhaltung eines Kunststoffbrandes dient, (Sauerstoffindex) umgekehrt proportional zur Verbrennungswärme ist. Bei den meisten Bränden liegt der Sauerstoffgehalt über dem nötigen Minimum. Weiterhin hängt die Flammen-Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Orientierung des brennenden Objektes zur Schwerkraft ab. Ist das Material aufrecht gelagert, kann es entweder nach oben oder nach unten abbrennen. Sind seine Seiten zusätzlich durch ein nichtbrennbares Material isoliert, verringert sich dabei die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Brandes⁴. Welchen Einfluß die Materialbreite dabei spielt, ist ungeklärt. Ferner trägt eine raue im Gegensatz zu einer glatten Oberfläche dazu bei, daß eine Materialprobe schneller abbrennt.

² Es handelt sich um den Punkt, wo die meisten brennbaren Materialien ihre Zündtemperatur erreichen, so daß sie fast gleichzeitig in Flammen aufspringen.

³ Verhältnisse, in denen sich Atome verschiedener Elemente nach einer chemischen Gleichung verbinden

⁴ Dies wird u.a. innerhalb von Schaltschränken der Mittelspannungsebene praktiziert (Abschottungen der Schaltfelder gegeneinander durch Gießharzplatten)

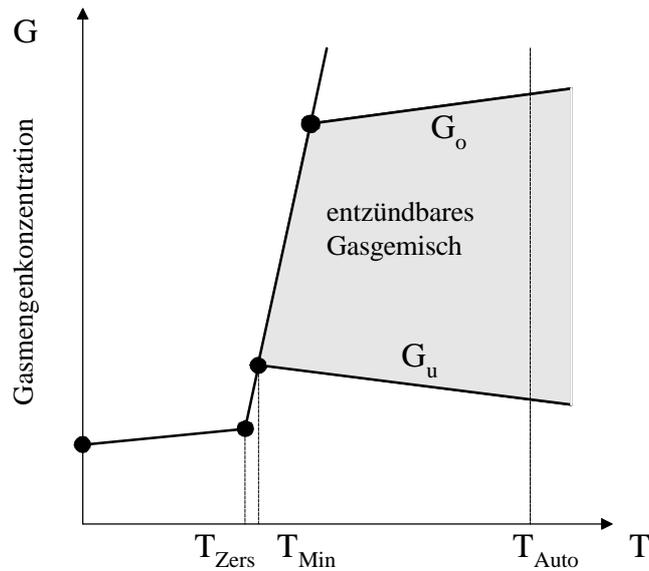


Bild 3.3.1: Zündung von Pyrolyse-Gasen aus Kunststoffen

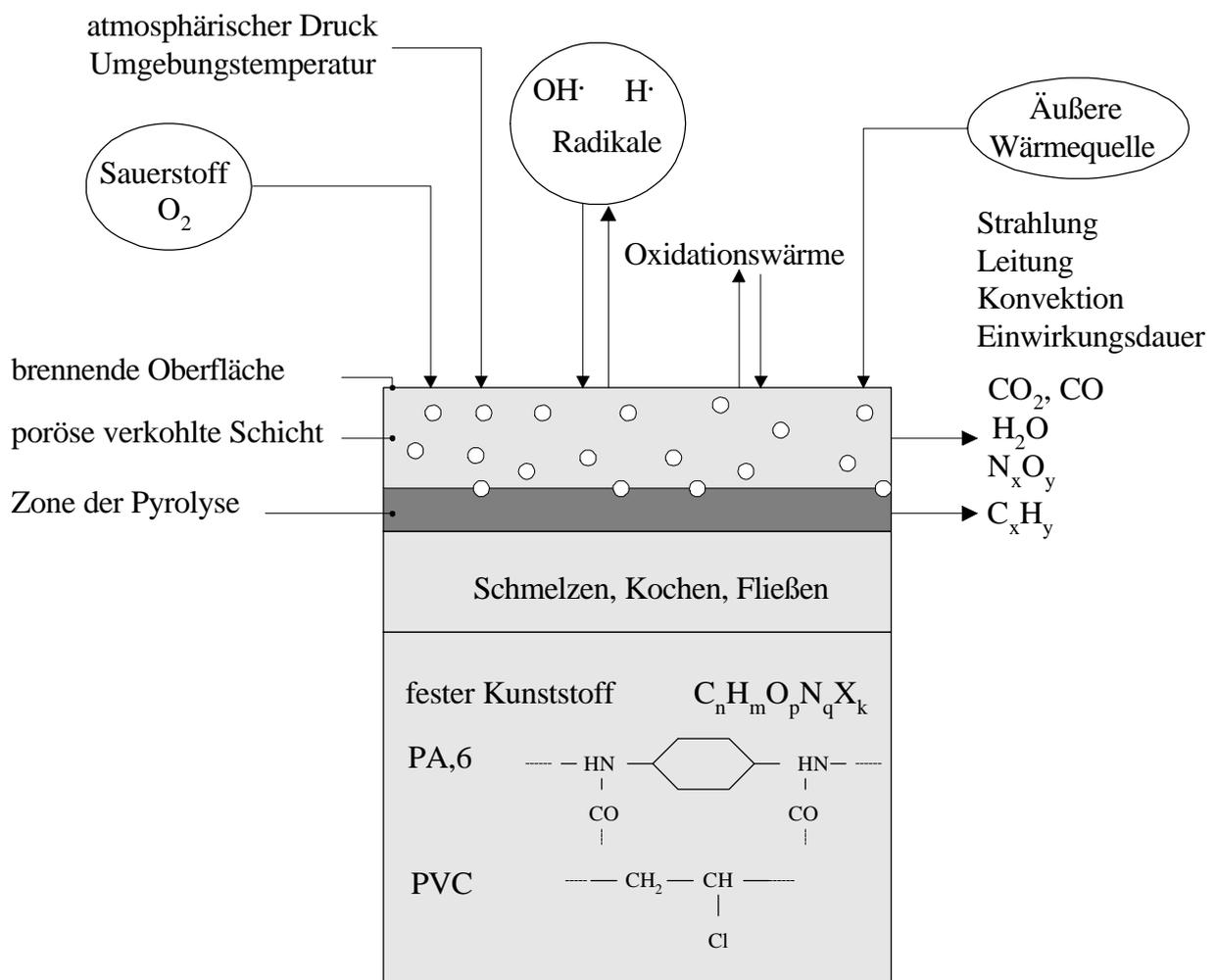


Bild 3.3.2: Verbrennungszonen und Verbrennungsprodukte eines Kunststoffes

4 Fehleranalyse und statistische Auswertung

In diesem Kapitel werden die Bedingungen erläutert, die in elektrischen Anlagen Brände auslösen können. Anhand der Analyse von Schadensakten einer Versicherungsgesellschaft werden die im Niederspannungsbereich möglichen Brandursachen vorgestellt. Die häufigsten Zündquellen sind elektrische Verbindungen und Lichtbogenkurzschlüsse.

4.1 Ausschluß chemischer Reaktionen

Außer einer (elektrischen) Zündquelle sind zur Einleitung eines Brandes in elektrischen Anlagen zwei Reaktionskomponenten in ausreichender Menge (stöchiometrische Verhältnisse) notwendig: Sauerstoff (z.B. aus der Luft) sowie brennbares Material (z.B. Kunststoff). Dem Kunststoff wird eine bestimmte Wärmeleistung Φ_{zu} (meist über das Metall) zugeführt, die, vermindert um die an die Umgebung abgegebenen Wärmeverluste Φ_{ab} , das Ansteigen seiner mittleren Temperatur T verursacht. Bis zum Erreichen der Zersetzungstemperatur des Kunststoffes läuft eine endotherme Reaktion ab. Die Abhängigkeit zwischen T und Φ kann mit Hilfe der physikalischen Gesetze der Wärmeleitung, -konvektion und -strahlung beschrieben werden.

Überschreitet die zugeführte Leistung Φ_{zu} die an die Umgebung abgeführte Wärmeleistung Φ_{ab} , wird schließlich die Zündtemperatur $T = T_z$ des Kunststoffes erreicht. Ab diesem Zeitpunkt läuft die Reaktion gleichzeitig exotherm ab und führt dem Kunststoff eine zusätzliche Wärmeleistung Φ_{ex} zu. Die Temperatur im Brandsystem steigt weiter an. Zu seiner vollständigen Beschreibung ist die Kenntnis der chemischen Zusammenhänge der ablaufenden Reaktionen notwendig. Diese ist aufgrund der Komplexität der meisten Anlagen und der chemischen Reaktionen nicht bestimmbar. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten theoretischen Berechnungen schließen exotherme Reaktionen aus ($\Phi_{ex} = 0$) und beschränken sich auf die Prozesse, die mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einer Materialzündung innerhalb einer Anlage führen können.

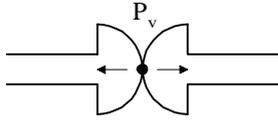
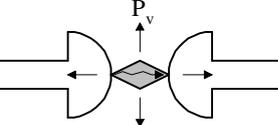
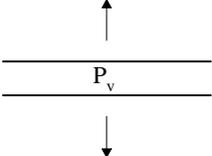
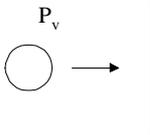
4.2 Fehlerursachen

Brände entstehen in elektrischen Anlagen, die mindestens einen Fehler laut Tabelle 4.2 aufweisen. Diese können durch unvorhersehbare Effekte wie Schmutzablagerungen und Alterungsprozesse oder durch Fahrlässigkeit wie Konstruktions- und Bedienungsfehler entstehen. Die Brandausbreitung hängt sehr wesentlich von der *Brandlast* im betroffenen Brandraum (Gerät, Schaltanlage usw.) ab. Diese ist als Quotient der Summe der Heizwerte¹

¹ Ein kg PVC liefert einen Heizwert oder Verbrennungswärme von 5 kWh (18 MJ) [14].

der insgesamt vorhandenen einzelnen brennbaren Stoffe und der Grundfläche des Raumes definiert.

Tabelle 4.2: Die grundsätzlichen Fehlerarten, die in elektrischen Anlagen zu Bränden führen können

Ursache	Ergebnis	Wärmeabführungsart	Schutz
hoher Übergangswiderstand	 erhöhte Verlustleistung am Kontakt	Wärmeleitung	Kein wirksamer Schutz ohne aufwendige Überwachung
Isolationsfehler	 Lichtbögen, Kurzschlüsse, Erdschlüsse	Wärmeleitung, -konvektion und -strahlung	Sicherungen, FI-Schalter, optische und akustische Detektierung
Überlast	 erhöhte Verlustleistung im Leiter	Wärmeleitung	Sicherungen, FI-Schalter
ungenügender Abstand	 hohe Wärmeaufnahme des Nachbarmaterials	Wärmeleitung, -konvektion und -strahlung	Beachtung der Vorschriften

4.3 Weitere Fehlerquellen

Fehlerhafte Schutzvorrichtungen sowie eine unsachgemäße Elektroinstallation können auch zu den oben erwähnten Fehlern führen, obwohl ihre einwandfreie Funktion normalerweise vorausgesetzt wird. In diesem Abschnitt werden die Fälle beschrieben, in denen Funktionsstörungen von Schutzvorrichtungen und die Ausführungsmängel in Elektroinstallationen ein Brandrisiko darstellen können.

4.3.1 Einfluß der Schutzvorrichtungen

Schutzvorrichtungen sind entsprechend der maximalen Strombelastbarkeit der Anlage einschließlich ihrer Kabelverbindungen zu dimensionieren. Sie sollen während der Stromun-

terbrechung in der Lage sein, eine bestimmte Lichtbogenenergie aufzunehmen und diese rasch abzuführen. Gelangt diese Energie nach außen oder reagiert die Schutzvorrichtung nicht rechtzeitig, ist eine Zündung benachbarter Materialien möglich.

Kritische Zustände bei Schutzvorrichtungen. Die Unterbrechung von fehlerhaften Stromkreisen erfolgt mit Hilfe von Schmelzsicherungen oder durch Schutzschalter. Solange ein thermisches Gleichgewicht ($I < I_{\min}$)² zwischen dem Sicherungsdraht und seiner Umgebung herrscht ($P_{zu} = P_{ab}$), kann kein Schmelzprozeß des Sicherungsmaterials eingeleitet werden (Bild 4.3.1). Erst der Fluß eines höheren Stromes ($I \geq I_{\min}$) bringt den Schmelzdraht einer Sicherung nach einer bestimmten Zeit zum Verdampfen.

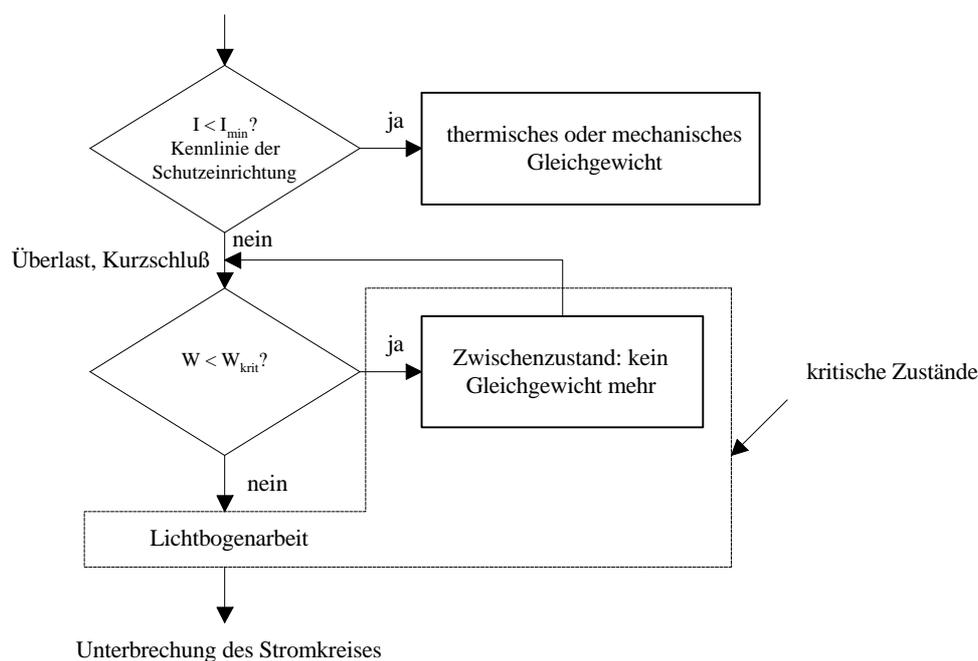


Bild 4.3.1: Thermisches Gleichgewicht und kritische Zustände bei Schutzvorrichtungen, die zur Entzündung umgebender Stoffe führen können.

Die Sicherung ist so dimensioniert, daß sie bei einem Strom $I_2 \leq 1,45I_z$ (I_2 : großer Prüfstrom, I_z : Strombelastbarkeitsgrenze der Leitung) nach ca. einer bis vier Stunden den Stromfluß unterbricht [39]. Aufgrund ihrer unpräzisen Zeit-Strom-Kennlinie kann dieser Zwischenzustand (Überlastfall) jedoch auch länger andauern (z.B. $I = 1,40I_z$) und zur beschleunigten Alterung von Sicherung und Leitungsisolation führen. Erreicht die Stromstärke einen kritischen Wert $I_{krit} \approx 10...20I_N$ mit I_N = Nennstrom der Sicherung, kann es zu einer längeren Lichtbogenphase kommen [15]. Die frei werdende Lichtbogenarbeit W ist dann am größten und führt zu hohen momentanen Drücken innerhalb des mit Luft oder mit reinem feinkörnigem Quarzsand gefüllten Sicherungsrohres. Hier besteht die Gefahr, daß der Bogen herausschlägt und umgebende Materialien entzündet.

² Aufgrund der unendlichen Meßperiode kann der Strom I_{\min} nur unscharf bestimmt werden.

Anforderungen an die Schutzvorrichtungen. Im Gegensatz zu den Schmelzsicherungen sind die Schutzschalter wie Leitungs-, Leistungsschutzschalter und Schütze aus einem Bi-Metall und Magneten zusammengesetzt. Hier wird die Lichtbogendauer beeinflusst. Sie wird durch eine rasche Vergrößerung der Lichtbogenanspannung verkürzt, die u.a. mit Hilfe des dynamischen Abhebens der Schaltstücke (Schütze und Leistungsschalter) erzielt wird. Die Kontaktstücke bestehen aus abbrandfestem Metall (z.B. galvanisch versilbertes Kupfer, Silber-Cadmiumoxid). Sie sind Prellvorgängen und Umgebungseinflüssen ausgesetzt und dürfen bei energiereichen Lichtbögen nicht verschweißen.

Weiterhin ist eine Schutzvorrichtung dem jeweiligen Stromkreis anzupassen. Die Parameter wie z.B. treibende Spannung, Zeitkonstante $t = \frac{L}{R}$ (Abschnitt 2.2), Umgebungstemperatur, Impedanz der Erdschleife, überlagerte Fehlerströme (FI-Schalter) und mögliche Stromfrequenzen sind so zu berücksichtigen, daß Überspannungen und lange Lichtbogenphasen (Schaltvermögensgrenze) vermieden werden können.

4.3.2 Einfluß der Elektroinstallation

Die Einhaltung von Normen (DIN, VDE)³ bei der Installation von elektrischen Anlagen spielt eine entscheidende Rolle für die Sicherheit von Bauten. Normen und Regelwerke dienen der Erfüllung der baurechtlichen Forderungen⁴. Diese sind verbindlich, wobei jedoch alternative Lösungen möglich sind, sofern sie nachweislich zur gleichen Sicherheit führen. Um einen Überblick zum aktuellen Stand der Sicherheit in der Elektroinstallation zu erhalten, hat [16] eine Befragung von 13 Elektromeistern im Raum Hannover durchgeführt.

Die Mehrheit der befragten Elektromeister ist im Besitz eines DIN-VDE 0100-Normenwerkes⁵. Die meisten weisen jedoch daraufhin, daß sie dieses kaum benutzen, da es eher als „umständlich“ und als „nicht praxisorientiert“ beurteilt wird. Auftretende Probleme werden aus der Erfahrung heraus in Zusammenarbeit mit Kollegen oder Vorgesetzten gelöst. Nur drei Elektromeister versichern, ihre Anlagen seien *immer* normgerecht installiert worden. Für die nichtnormgerechte Ausführung elektrischer Anlagen führen die Befragten verschiedene Gründe an:

- Kosten

³ DIN: Deutsches Institut für Normung, VDE: Verband der Elektrotechniker Elektronik Informationstechnik e.V.

⁴ Als Grundlage für das Baurecht eines Landes gilt die Musterbauordnung MBO

⁵ Planen, Schützen, Errichten und Prüfen von Starkstromanlagen mit Nennspannungen bis 1000 V

- Bei Neubauten werden die Technikräume von Architekten zu Gunsten der Nutzfläche zu klein bemessen.
- Die Abstimmung mit anderen Handwerkern (Heizung, Lüftung, Sanitär) erfordert ebenfalls Kompromisse in der Ausführung, insbesondere bei der Leitungsführung.
- Bei nachträglichen Installationen werden häufig nichtnormgerechte Lösungswege eingeschlagen⁶ oder ungeschultes Personal eingesetzt.
- Schraubverbindungen werden nicht mit Hilfe des Drehmomentschlüssels angezogen.
- Beim Ausfall von Anlagen in gewerblichen Betrieben fordern die Betreiber ein schnellstmögliches Wiederanlaufen ihrer Maschinen. Hier werden oftmals nichtnormgerechte Provisorien eingesetzt, deren Austausch aus Kostengründen hinausgeschoben wird.

85% der Befragten nannten aus betrieblicher Erfahrung "schlechte Klemmverbindungen" und die dadurch entstehenden hohen Wärmeverluste als Hauptursache für Brände in Niederspannungsanlagen. Als zweithäufigste Ursache werden die Leuchten genannt, die zu nahe an brennbaren Materialien stehen. Eine falsche Dimensionierung der Leiterquerschnitte oder der Schutzvorrichtungen (z.B. hohe Absicherung) tritt am dritthäufigsten auf. An vierter Stelle stehen überfüllte Verteilerschränke oder Installationskanäle. Nachinstallationen führen zu ihrer Überfüllung und ermöglichen damit keine ausreichende Abkühlung mehr.

Nach DIN VDE 0100 Teil 610 muß eine Prüfung der installierten Anlage vor ihrer Inbetriebnahme durchgeführt werden. Dies ist bei großen Bauten (z.B. Flughäfen u.s.w.) Aufgabe des TÜVs. Die erhaltenen Meßwerte sind in einem Übergabebericht und Prüfprotokoll festzuhalten. In Zusammenhang mit solchen oder ähnlichen Projekten gibt ca. die Hälfte der befragten Elektromeister ausdrücklich an, die notwendigen Prüfmessungen *immer* durchgeführt zu haben.

4.4 Statistische Auswertung

In diesem Abschnitt wird eine Statistik auf der Basis von Schadensakten einer Versicherungsgesellschaft erstellt, um die elektrischen Komponenten (keine Gesamtanlagen) festzustellen, die am häufigsten zu Bränden im Niederspannungsbereich führen. Die zeitliche Entwicklung bis zur Brandentstehung kann oft nicht rekonstruiert werden. Die Brände sind häufig so verheerend, daß keine interpretierbaren Spuren mehr zurückbleiben. Hinzu kommt, daß die dokumentierten Auswertungen der Brände nicht von Fachleuten stammen.

⁶ Kompromisse sind bei Sanierungen in Altbauten immer wieder nötig, da die Platzverhältnisse beengt sind.

4.4.1 Brandursachen

Polizei, Versicherungen und Feuerwehr sind mögliche Ansprechpartner für die Durchführung einer Brandursachen-Statistik. Die Polizei weist die Feuerwehr darauf hin, Veränderungen nur soweit vorzunehmen, wie es die Brandbekämpfung erfordert. Stellt sich im Verlaufe der Ermittlungen heraus, daß keine Straftat vorliegt, wird die Untersuchung aus kriminalistischer Sicht beendet [17]. Die Polizei führt keine Statistik über Brände (Anzahl, Ursachen, Schadenshöhen usw.), die nicht auf Straftaten zurückzuführen sind. Es wurde daher eine Schadensanalyse bei einer hannoverschen Versicherungsgesellschaft durchgeführt. Dazu wurden alle 188 Schadensakten der Jahre 1993 bis 1998 eingesehen.

4.4.2 Schwierigkeiten bei der Ermittlung der Brandursachen

Während eines Brandes schmilzt die Isolierung von stromführenden Leitern. Lichtbögen können entstehen. Damit sind die Kabel nicht immer der direkte Auslöser des Brandes. Aus diesem Grund muß die betroffene Stelle noch zusätzlich auf genügenden Zündenergieinhalt überprüft werden. Leitungen, die keine Lichtbogenspuren aufweisen, zeigen, daß die Elektroinstallation nicht die Brandursache sein kann. Außerdem setzt die Entstehung eines Lichtbogens zwischen zwei Leitern voraus, daß beide Leiter einen Fehler der Isolierung an der gleichen Stelle aufweisen.

Kontakt- und Kabelfehler führen nicht immer zu Bränden, die sich auf den Fehlerort begrenzen. Ist die elektrische Isolierung nicht mehr in der Lage, den Brand zu unterhalten, kann ein umgebendes brennbares Material (mit meist niedrigerer Zündtemperatur) durch tropfendes oder verspritztes Metall entzündet werden. Damit wandert die Wärmequelle innerhalb des Brandraumes. Ihre Verschiebung erschwert dann die Lokalisierung des wahren Brandherdes.

4.4.3 Sichtung der Akten

Bei den gesichteten Daten der Schadensakten handelt es sich um kurze Beschreibungen der möglichen Brandursache belegt mit photographischen Aufnahmen⁷ des Brandortes. Die Leistungsdaten der betroffenen Anlage werden selten vermerkt oder sind durch den Brand nicht mehr identifizierbar. Ist es zu einem offenen Feuer gekommen, das sich unkontrolliert ausgebreitet hat, gilt der verursachte Schaden, jedoch nicht die *brandauslösende Komponente* selbst, seitens der Versicherung als ersatzpflichtig.

In Fällen mit hohem Schaden wird meist ein Sachverständiger eingesetzt, der den Brandort analysiert und ausführlich über die betroffene Anlage berichtet. Auf diese Art wird die Brandursache bis hin zur brandauslösenden Komponente ermittelt.

⁷ häufig Polaroid-Bilder schlechter Qualität

Die Auswertung der Brandursachen der o.g. Schadensakten hat ergeben, daß überwiegend Kabel oder elektrische Verbindungen den umgebenden Kunststoff entzündet haben (Bild 4.4.3.1).

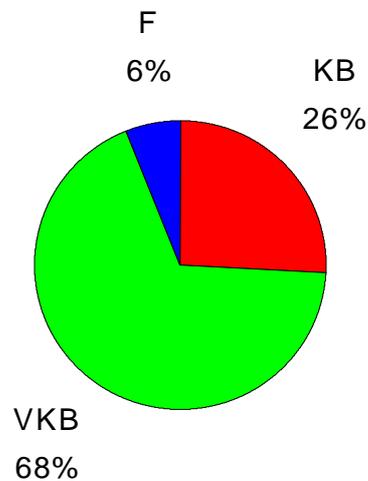


Bild 4.4.3.1: Brandursachenverteilung für den Zeitraum 1993 bis 1998 (bis Juni 1998) im Raum Niedersachsen mit Ausschluß der Landkreise Aurich und Weser-Ems (KB: Kurzschluß, Lichtbogen; VKB: KB oder Verbindungsfehler; F: Fälle, in denen ein elektrisches Gerät nicht ordnungsgemäß benutzt wurde).

In vielen Fällen war jedoch aufgrund der hohen Beschädigung keine Unterscheidung mehr möglich (VKB). Dies gilt besonders für Brände in Verteilerschränken. Auch für die Kurzschlußfälle (übliche Annahme) kann es sich entweder um ein Versagen der Schutzvorrichtung oder um Lichtbogenkurzschlüsse handeln. Als weitere Ursache wird die fahrlässige Bedienung von elektrischen Geräten, in denen der vorgeschriebene Abstand zu Lampen und Elektrowärme-Geräten nicht eingehalten wurde, angegeben.

Die Leitungen in der Elektroinstallation und die mit Thermostatsteuerung betriebenen Geräte (Kühl- und Elektrowärme-Geräte) sind der häufigste bzw. zweithäufigste Brandort (Bild 4.4.3.2). Anschließend folgen die Fernseher-Impllosionen.

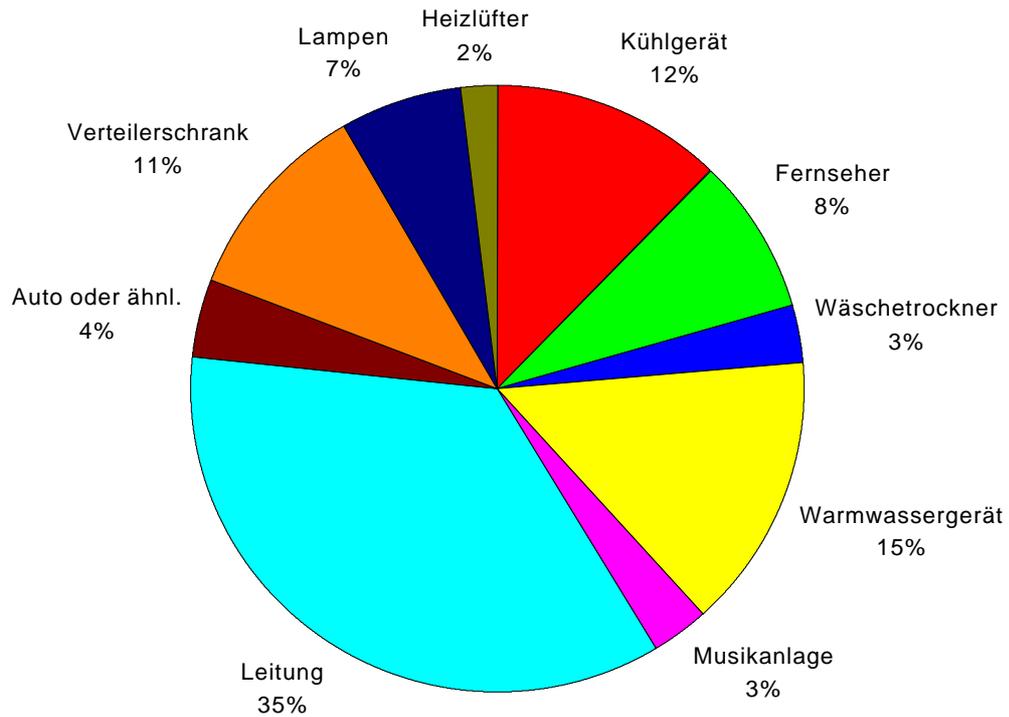


Bild 4.4.3.2: Verteilung der Brandfälle auf die betroffenen Geräte (1993-1998)

Über den gesamten Zeitraum betrachtet, finden Brände mit elektrischer Ursache überwiegend in Wohnräumen statt (Bild 4.4.3.3). An zweiter Stelle sind Maschinenbetriebe, gefolgt von Gaststätten zu verzeichnen. Wohnbereiche scheinen ideale Brandherde zu sein, da diese oft große Mengen an Kunststoff und Holz enthalten.

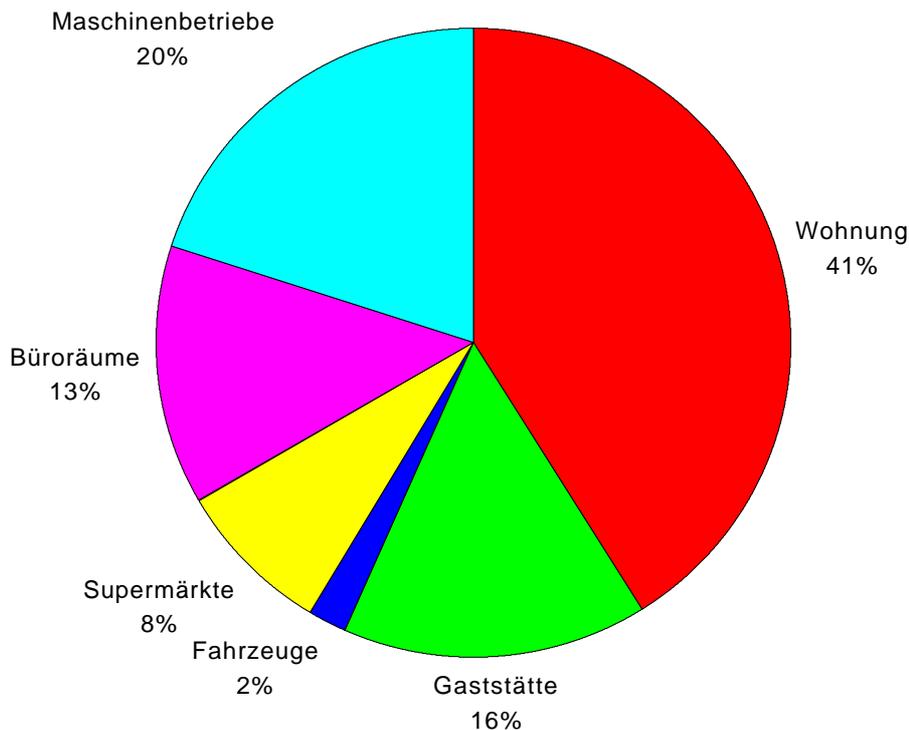


Bild 4.4.3.3: Verteilung der Brandfälle auf die betroffenen Orte (1993-1998)

Die Statistik zeigt, daß Kühlgeräte überwiegend in Supermärkten in Brand geraten. Den Akten ist zu entnehmen, daß diese Geräte nach einer mittleren Betriebsdauer von fünf Jahren einen technischen Defekt in der Thermostatsteuerung aufweisen.

Nach längerer Betriebsdauer neigen die schaltenden Kontakte offenbar zur Verschweißung und schließen nicht mehr richtig aufgrund nachlassender Federwirkung. Kühlschränke moderner Bauart verfügen über aufgeschäumte Dämmkunststoffe aus Styropor oder Polyurethan, die als brennbar gelten. Die Schaltkontakte des Regelthermostates, der zwischen Innenwand des Kühlraumes (Hartkunststoff) und Dämmmaterial häufig ungekapselt eingebaut ist, werden mit Motor-Nennstrom (Kompressor) so belastet, daß eine Verschweißung und *Korrosion* durch verstärkte Lichtbogenbildung beschleunigt wird. Ferner weisen Elektrowärmegeräte wie z.B. Elektrospeicher-Heizgeräte oft einen Regler auf, der auf der Basis eines Flüssigkeitsfühlers arbeitet (selten Bi-Metall). Es wird vermutet, daß die Flüssigkeit im Laufe der Zeit nach außen diffundiert (Kapillarbruch) und damit die Reglerfunktion außer Kraft setzt. Weiterhin führt die Fettablagerung an Schaltelementen innerhalb von Herden und Dunstabzugshauben zur Entzündung des umgebenden Fettes.

Ferner sind Brände in Verteilerschränken hauptsächlich in Maschinenbetrieben mit höherem Leistungsbedarf vorzufinden.

Im Wohnbereich ist sowohl die Elektroinstallation als auch der Fernseher die wichtigste Brandursache. Bei diesem handelt es sich meistens um eine eingeleitete Implosion der Bildröhre durch Schwelbrände⁸ in benachbarten Bauteilen innerhalb des Apparates. Durch eine ungünstige Schalterstellung oder wegen Schalterbeschädigung (Phase am Chassis) liegen bestimmte Bauteile unter Spannung und es fließt eventuell (unter Bereitschaftsstellung) ein niedriger Strom. Verschmutzung und Alterung tragen dazu bei, daß sich Kriechstrecken bilden. Die Kriechstromwärme leitet dann Entladungen ein und führt zu mechanischen Spannungen im Glaskolben mit anschließender Implosion.

Die statistische Auswertung zeigt deutlich, daß Kabel und Kontakte die häufigsten Ursachen für Brände im Niederspannungsbereich sind. Ferner neigen besonders schaltende Kontakte als Stellglieder für Temperatur-Regler nach längerer Betriebszeit zum Verschweißen.

Vor diesem Hintergrund sollen in dieser Arbeit die Bedingungen, unter denen Brände durch *Kontakt-* und *Lichtbogenfehler* entstehen, näher untersucht werden. Hierzu wurde in Kapitel 5 die weitverbreitete Schraubverbindung als elektrischer Kontakt gewählt. Weiterhin wurde in Kapitel 6 die Zündung von Lichtbögen und ihr Einfluß auf umgebende Isolierstoffe mit Hilfe von einfachen Elektrodenanordnungen untersucht.

⁸ Schwelen: langsame Oxidation (aufgrund langsamer Sauerstoffdiffusion) eines Materials ohne Leuchterscheinungen, im Allgemeinen durch Rauch und Temperaturanstieg gekennzeichnet (DIN 50060). Ab ca. 500°C gehen Schwelbrände in Glimmbrände über.

Glimmen: Verbrennen eines Feststoffes ohne Flammen-Erscheinung, jedoch mit Ausstrahlung von Licht aus der Verbrennungszone.

4.4.4 Realisierung einer Auswertungssoftware für Brandursachen

Einer der Gründe, warum Brände elektrischer Ursache als weitgehend unerforscht gelten, sind fehlende oder in technischer Hinsicht nicht immer vollständige oder aussagekräftige Daten. Sie liegen meistens in verstreuter, ungeordneter und unaufbereiteter Form vor. In Fällen mit hohen Schadenssummen wird eine aufwendige Ursachenforschung betrieben, nicht jedoch bei „Bagatellfällen“. Gerade diese Fälle spielen eine große Rolle, da sich hier die gleichen Mechanismen wie bei Großbränden abspielen.

Die eigene Erfahrung hat gezeigt, daß die Sammlung und Auswertung der „Branddaten“ nur unter schwierigen Umständen möglich ist. Polizei, Sachverständige, Versicherungs- und Energieversorgungsunternehmen verfügen zwar über solche Daten, jedoch mangelt es an Mitteln für deren Verwaltung und Auswertung. Hierdurch entsteht der Wunsch nach einem Werkzeug zum systematischen Erfassen, Verwalten und Auswerten dieser Daten. Die Entwicklung eines geeigneten Programmes bietet sich an.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Software [25] realisiert, die bei den oben aufgeführten und in Frage kommenden Institutionen eine größtmögliche Akzeptanz erreichen soll. Sie enthält eine graphische Oberfläche, die sich auch von ungeschulten Benutzern bedienen läßt. Um die Daten in einer für die Auswertung sinnvollen Weise zu erfassen, bietet das Programm die Durchführung einer Klassifizierung bezüglich verschiedener Merkmale an. Eine Brandursachenklassifizierung kann z.B. nach den Gruppen „ungenügende Kontaktkraft“, „Isolationsfehler“, „Überlastung“ usw. realisiert werden. Weiterhin existiert eine Filterfunktion mit deren Hilfe Brandfälle nach bestimmten Kriterien ausgewertet werden können. Eine statistische Darstellung ist auch möglich. Ferner weist die Software, die in einer 32-Bit-Version für Windows 95/98/NT und in einer 16-Bit-Version für alle Windows-Versionen einschließlich Win-OS/2 zur Verfügung steht, Datenbankfunktionalität auf (Bild 4.4.4).

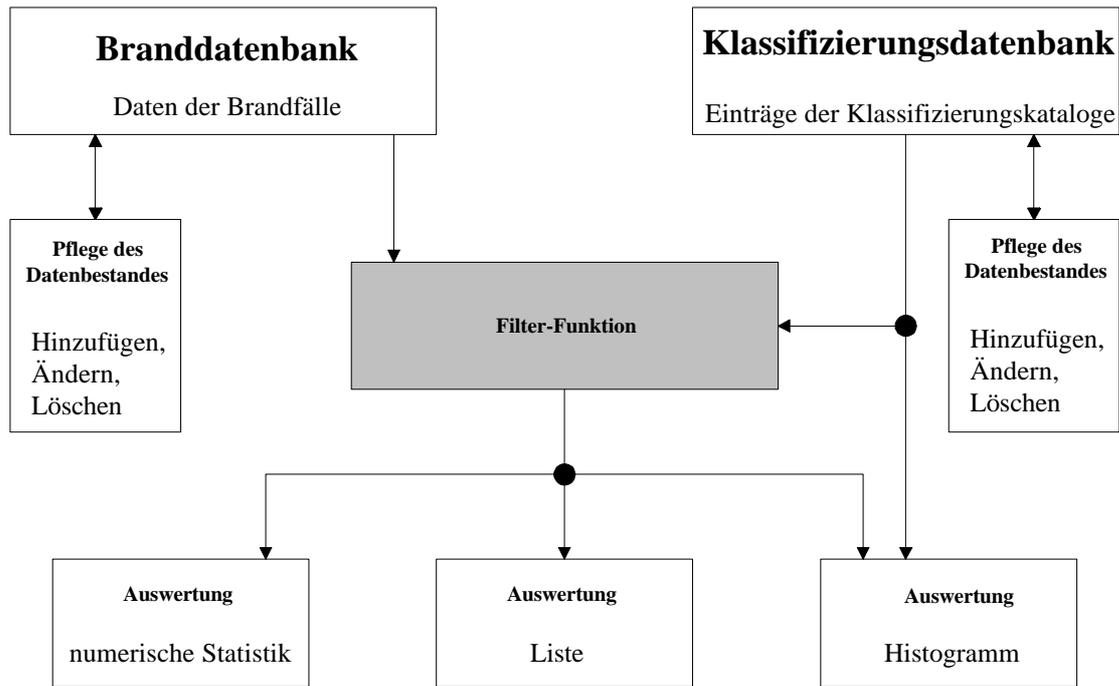


Bild 4.4.4: Datenfluß der realisierten Software zur Branddatenerfassung:

Brandursachenklassifizierung z.B. nach den Gruppen „ungenügende Kontaktkraft“, „Isolationsfehler“, „Überlastung“, Auswertung der Brandfälle nach bestimmten Kriterien mit Hilfe einer Filterfunktion und statistische Auswertung der Ergebnisse

5 Brandentstehung in einer Schraubverbindung

Im letzten Kapitel wurde festgestellt, daß es aufgrund des hohen Zerstörungsgrades des Brandortes oft nicht ersichtlich ist, ob ein Kabel oder eine ruhende elektrische Verbindung in der nahen Umgebung die primäre Ursache des Brandes war. Dies gilt insbesondere für Verteilerschränke, in denen mehrere Reihenklemmen auf Trageschienen befestigt sind.

In diesem Kapitel werden die Bedingungen ermittelt, unter denen ein ruhender Kontakt einen Brand einleiten kann. Dabei wird aufgrund ihres häufigen Einsatzes eine Reihenklemme als Schraubverbindung untersucht.

Da eine Reihenklemme einen komplizierten geometrischen Aufbau sowie verschiedene Materialien aufweist, kann keine geschlossene Lösung zur Beschreibung ihres Erwärmungsverhaltens gefunden werden. Aus diesem Grund wird die Problemlösung mit Hilfe der Methode der finiten Elemente durchgeführt. Dabei wird anhand eines geeigneten vereinfachten Modells festgestellt, welche elektrischen Verlustleistungen zu kritischen Temperaturen der Isolierung führen können.

Anschließend soll das Verhalten der Klemme im Überlastfall bei kurzer und langer Dauer experimentell untersucht werden. In Abhängigkeit vom Anzugsdrehmoment einer Schraube stellt sich bei Stromfluß eine Übertemperatur an der Kontaktstelle ein. Aufgrund seiner mikroskopischen Größe ist ein Kontaktpunkt nicht zugänglich. Aus diesem Grund wird die Temperatur in Kontaktnähe gemessen. Die erhaltenen Ergebnisse werden vorgestellt und diskutiert.

In einem letzten Schritt werden Zündversuche an der Schraubverbindung durchgeführt. Außerdem wird der Einfluß von Entladungen auf deren Werkstoffe sowie ihr Zündverhalten beschrieben.

5.1 Beschreibung der untersuchten Schraubverbindung

Die untersuchte Reihenklemme (siehe Bild 5.1) besteht aus drei Werkstoffarten: Kupfer, Stahl und Polyamid (Tabelle 5.1).

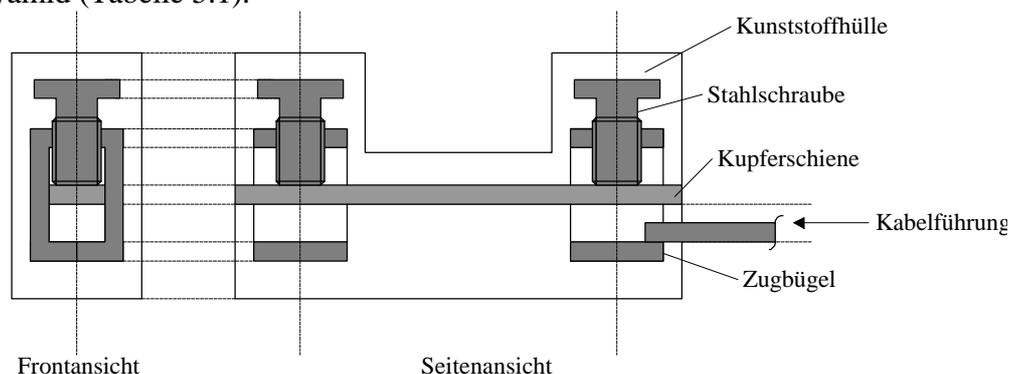


Bild 5.1: Längs- und Querschnitt durch die untersuchte Schraubverbindung (schematisch)

Tabelle 5.1: Werkstoffarten der Schraubverbindung

Werkstoffart	Masse/g	Funktion	Besondere Merkmale	Bemessungsspannung/ -strom/ -querschnitt/ anzugsmoment	Breite/Länge/ Höhe/mm
Kupfer	0,6	Stromschiene	mit Zinn und Blei beschichtet	690V/17,5A/ 1,5mm ² , H07V-U/ 0,4 Nm	-
Stahl	0,9	Zugbügel + Schraube	galvanisch verzinkt	-	-
Polyamid	2,3	Isolierung	flammschützende Zusatzstoffe	-	5/44/37,5

Die einzelnen Komponenten der Verbindung, d.h. Schiene und Zugbügel, werden in den Kunststoff (siehe Bild 5.1) eingesteckt. Dabei dient die Kupferschiene der Stromführung und der Zugbügel zur Befestigung von Leiter und Schiene.

5.2 Ausgangslage für die Bestimmung der Kontaktfläche

Der mechanische Aufbau der Verbindung ist so konzipiert, daß elektrische Übergangswiderstände an den kontaktgebenden Stellen durch Feder- oder Druckkräfte minimiert werden. Je nach Lage des Kabels in der Verbindung ergibt sich beim ersten Einbau ein Anfangsübergangswiderstand, der die Lebensdauer und damit das Übererwärmungsrisiko der Verbindung mitbestimmt. Die optimale Lage der Massiv-Kabeleinführung ist in Bild 5.2.1.a abgebildet.

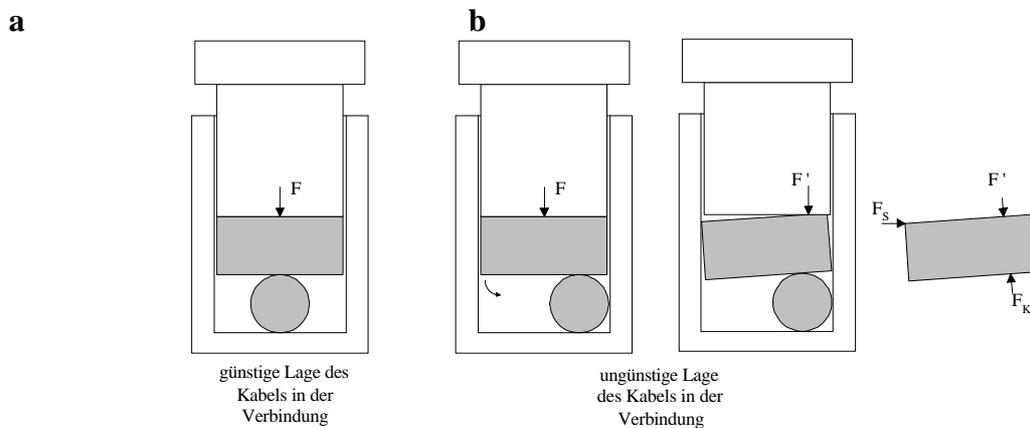


Bild 5.2.1: a günstige b ungünstige Lage des Massiv-Kabels in der Verbindung (übertriebene Darstellung)

Nach der Leiterführung wird die Schraube mit einem Anzugsdrehmoment belastet, das der Summe aus Gewinde- und Kopfreibungsmoment entspricht. Die damit wirkende Vorspannkraft sorgt für die nötige elastische Verformung und mithin für den optimalen Kontakt zwischen Kabel und Kupferschiene. Fallen Kabel- und Schraubenachse nicht zusammen, ist mit dem in Bild 5.2.1.b schematisch dargestellten Fall zu rechnen.

Es entsteht kurzzeitig ein instabiles System, das die Tendenz zum Kippen hat. Die neue ungleichmäßige Kräfteverteilung auf der Kupferschiene zwingt diese, sich um die Achse durch die Kontaktstelle zu drehen und wird durch den Stahlbügel arretiert. Die Schraube übt dann einen Druck auf die Kupferschiene mit verminderter Druckfläche aus, was die Klemme gegenüber mechanischen Schwingungen anfälliger macht. Dieser Mangel wird an anderen Reihenklammen vom Hersteller so behoben, daß die Kupferschiene eine mittige Vertiefung zur Aufnahme des Leiters aufweist. So kann dieser nicht mehr unzulässig ausweichen.

5.3 Mögliche Lagen der Übergangswiderstände in der Klemme

In einer Verbindung können verminderte Kontaktflächen u.a. aufgrund von Lockerung an mehreren Stellen des Kontaktbereiches entstehen. Dann ist mit mehreren erhöhten Übergangswiderständen mit den entsprechenden Verlustleistungen gleichzeitig zu rechnen. Bild 5.3.1 zeigt einen kritischen Zustand in der Verbindung, der deutlich macht, daß die Bildung von vier Übergangswiderständen gleichzeitig möglich ist: R_{CS} zwischen Kabel und Zugbügel, $\frac{r_{SC}}{2}$ zwischen Zugbügel und Schiene und R_{CC} zwischen Kabel und Schiene. Die Stromdichte zwischen Kabel und Schiene ist aufgrund der geringeren elektrischen Leitfähigkeit von Stahl im Vergleich zu Kupfer ($k_{St} \approx \frac{1}{6} k_{Cu}$) am größten. Damit wird an dieser Stelle die wichtigere Wärmequelle auftreten.

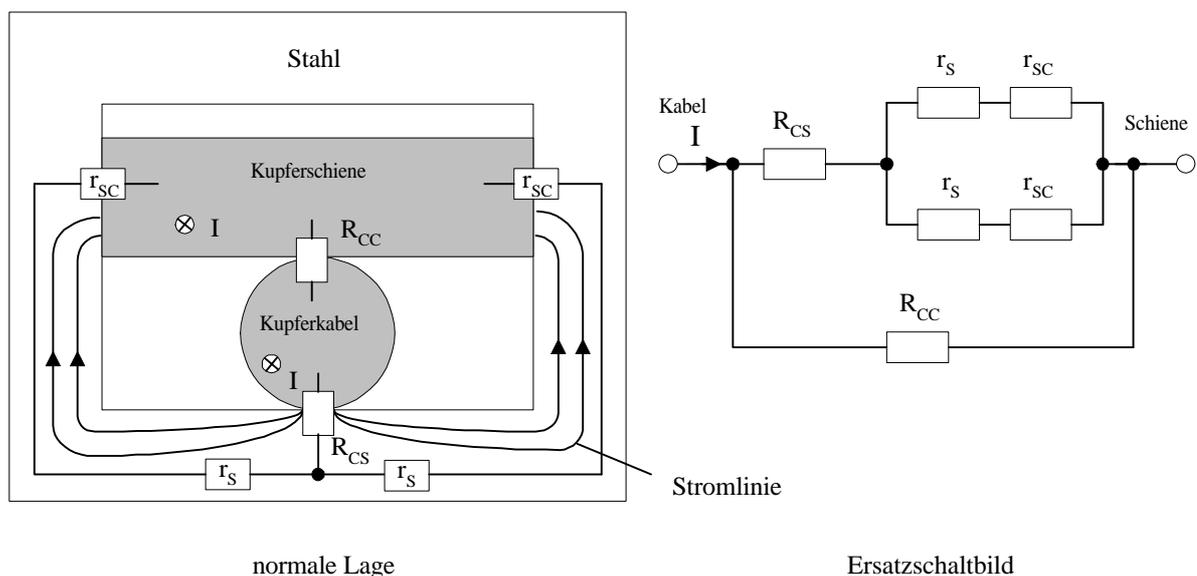


Bild 5.3.1: Mögliche Übergangswiderstände in der Schraubverbindung (r_s : Stahlwiderstand)

Mit Hilfe des in Kapitel 2 gewonnenen Zusammenhanges zwischen Kontaktkraft F und Anzugsdrehmoment M ergeben sich die in Bild 5.3.2 dargestellten Verläufe. Die Kontaktfläche A , ihre halbe Breite b und die entsprechende Kontaktkraft F sind in Abhängigkeit vom Anzugsdrehmoment M dargestellt. Messungen an der Schraubverbindung haben gezeigt, daß der Bereich $M < 0,1$ Nm zu kritischen Temperaturen führt.

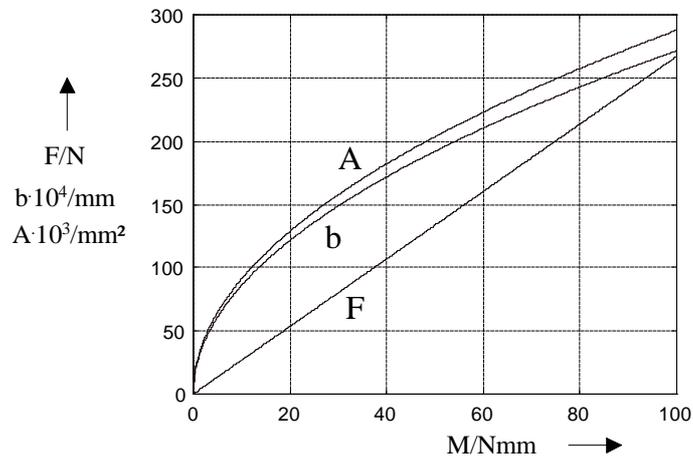
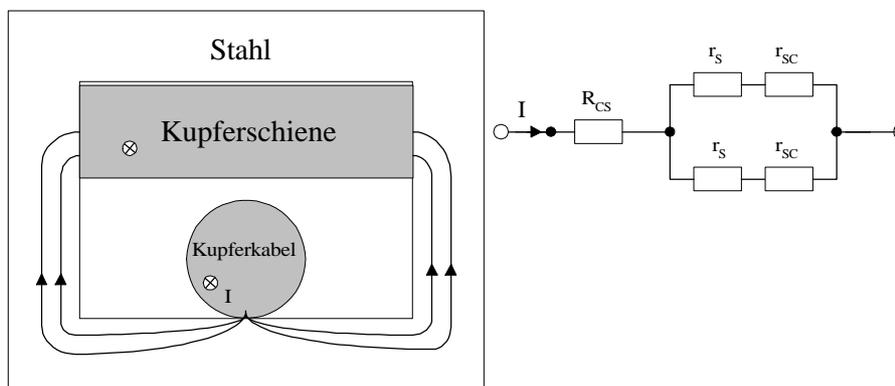


Bild 5.3.2: Kontaktfläche A , Breite b der Kontaktfläche und Kontaktkraft F bei $M < 0,1$ Nm ($l = 5$ mm)

Bei einer lockeren Klemme, in der Kabel und Schiene sich nicht mehr berühren, fließt der gesamte Strom über den Stahlbügel zur Schiene (Bild 5.3.2). Gegenüber Bild 5.3.1 fehlt dann im Ersatzschaltbild der Kontaktwiderstand R_{CC} .



Ersatzschaltbild

Bild 5.3.2: Stromverteilung bei fehlendem Kontakt zwischen Kabel und Schiene

5.4 Ausgangsmodell für die numerische Berechnung der Klemmenerwärmung

Die Betrachtung der Wärmeübertragungsvorgänge in einer Reihenklemme in Luft ergibt ein dreidimensionales Problem. Mit gewissen Vereinfachungen ist es jedoch möglich, die wichtigsten Vorgänge zweidimensional zu modellieren.

Die zweidimensionale Nachbildung des Kontaktbereiches wäre bei unendlicher Ausdehnung in Längsrichtung exakt. Die Wärmeleitung in Längsrichtung geschieht überwiegend durch Kabel und Kupferschiene, da der Zugbügel in gleicher Richtung eine reduzierte Länge und eine schlechtere Wärmeleitfähigkeit hat. Geht man außerdem von einer gleichmäßigen Erwärmung entlang der durch elastische Verformung (HERTZsche Pressung) entstandenen Kontaktfläche aus, erfüllt die Klemme in diesem Bereich recht gut die Bedingung für eine zweidimensionale Betrachtung.

Die Kontaktfläche ist als Summe vieler mikroskopisch kleiner Kontaktflächen anzusehen. Aufgrund der starken Größenunterschiede zu den anderen Abmessungen sind diese nicht modellierbar. Da eine Analyse sehr schneller transienter Vorgänge, wie in Kapitel 2 beschrieben, und ihr Einfluß auf die einzelnen Kontakt-Spots nicht von Interesse ist, wird auf eine gekoppelte elektrisch-thermische Analyse verzichtet. Die durch Stromfluß erzeugte Verlustleistung im Bereich der Kontaktstelle kann dann, bezogen auf die Kontaktfläche, als konstante Wärmestromdichte aufgefaßt werden.

Das für die numerische Simulation zugrunde gelegte Klemmenmodell ist in Bild 5.4 gezeigt. Es stellt einen Querschnitt der Klemme durch den Kontaktbereich dar. Die Symmetrie bezüglich der fett eingezeichneten Linie wurde genutzt. Da Schraube und Zugbügel gleiches Material aufweisen, wurde zur Vereinfachung zwischen ihnen ein stetiger Übergang vorausgesetzt. Das gleiche gilt für die Übergänge Kupferschiene-Schraube und Kupferschiene-Zugbügel. Auch dort wurde ein idealer Kontakt unterstellt.

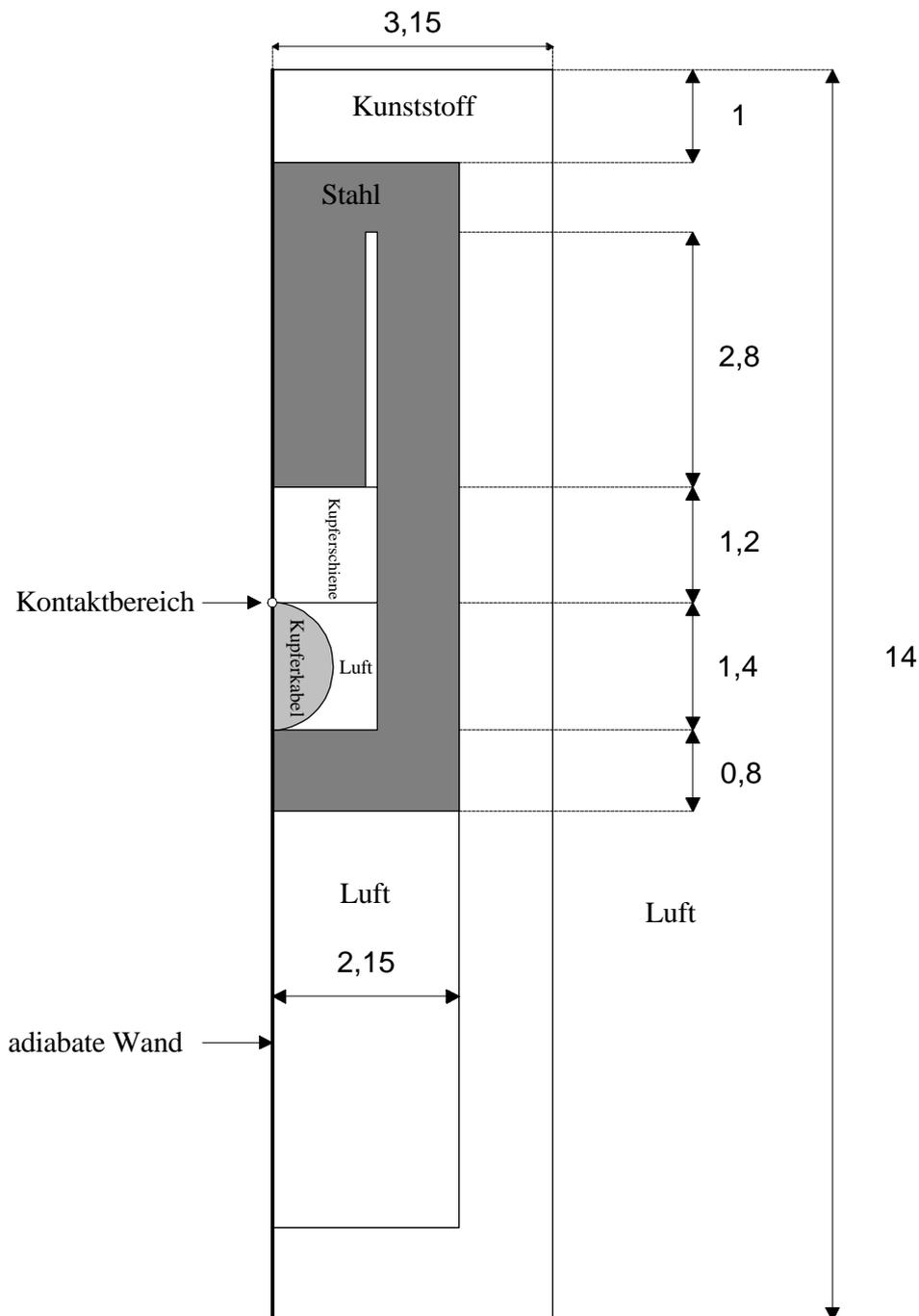


Bild 5.4: Vereinfachtes Klemmenmodell (Maße in mm)

Die Leiterisolierung, die meistens aus PVC besteht, beginnt bei ca. 200°C zu fließen. Ab diesem Zeitpunkt spielen auch chemische Vorgänge, die zusätzliche Wärmeenergien liefern, eine wichtige Rolle. Man kann nicht mehr von isotropen Stoffen ausgehen. Diese Vorgänge werden durch das gebildete Modell nicht erfaßt. Die Berechnung der Temperaturverteilung in Abhängigkeit von der Verlustleistung soll in erster Linie zeigen, daß es möglich ist, die kritischen Zustände bei der Erwärmung der Klemme theoretisch abzuschätzen und damit Aufschluß über ihre Belastbarkeit zu liefern. Die berechneten Temperaturen der Reihenklemme lassen die Vernachlässigung der Strahlungseinflüsse gegenüber der freien Konvektion in Luft zu.

Mit Hilfe des Newton'schen Gesetzes

$$q = \mathbf{a}(T_W - T_F)$$

kann der Wärmestrom durch Konvektion berechnet werden. Aufgrund von Temperaturunterschieden zwischen einer wärmeübertragenden Oberfläche der Temperatur T_W und einem Fluid mit der Temperatur T_F kommt es zu Auftriebsströmungen, die nur noch empirisch beschrieben werden können. Sie dienen der Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten \mathbf{a} und gelten jeweils nur für eine Oberflächengeometrie.

Im Klemmenmodell werden die horizontalen und die vertikalen Abschnitte als horizontale bzw. vertikale Platten in freier Konvektion mit Luft betrachtet¹. Der Leiter wird ebenfalls als horizontaler Zylinder in freier Konvektion mit Luft angesehen. Zur Bestimmung des jeweiligen Wärmeübergangskoeffizienten ist zunächst die Nusselt-Zahl

$$Nu = \frac{\mathbf{a}\ell}{\mathbf{l}} = f(P_r, R_a)$$

zu berechnen. Sie ist eine Funktion der Prandtl-Zahl P_r und der Rayleigh-Zahl R_a , worin die Stoffwerte der Luft bei der mittleren Temperatur $T_m = \frac{T_W + T_F}{2}$ und bei einer festzulegenden Überströmlänge ℓ berücksichtigt werden (Tabelle 5.4). Da bei kleinen Verlustleistungen bereits Temperaturen größer als 50°C erreicht werden, wurde mit $T_W = 50^\circ\text{C}$ und $T_F = 20^\circ\text{C}$ gerechnet.

Tabelle 5.4: Festlegung der Randbedingungen für die freie Konvektion an der Klemme [22]

Abschnitt	Überströmlänge ℓ	mittlere Temperatur $T_m = \frac{T_W + T_F}{2}$	Nusselt-Zahl Nu
vertikal	H	35 °C	$f_v(P_r, R_a)$
horizontal	$\frac{L \cdot B}{2(L + B)}$	35 °C	$f_h(P_r, R_a)$
zylindrisch	D	35 °C	$f_z(P_r, R_a)$

¹ $15 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} < \alpha < 100 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$

5.5 Modellierung

Bild 5.5 zeigt das endgültige Finite-Elemente Modell.

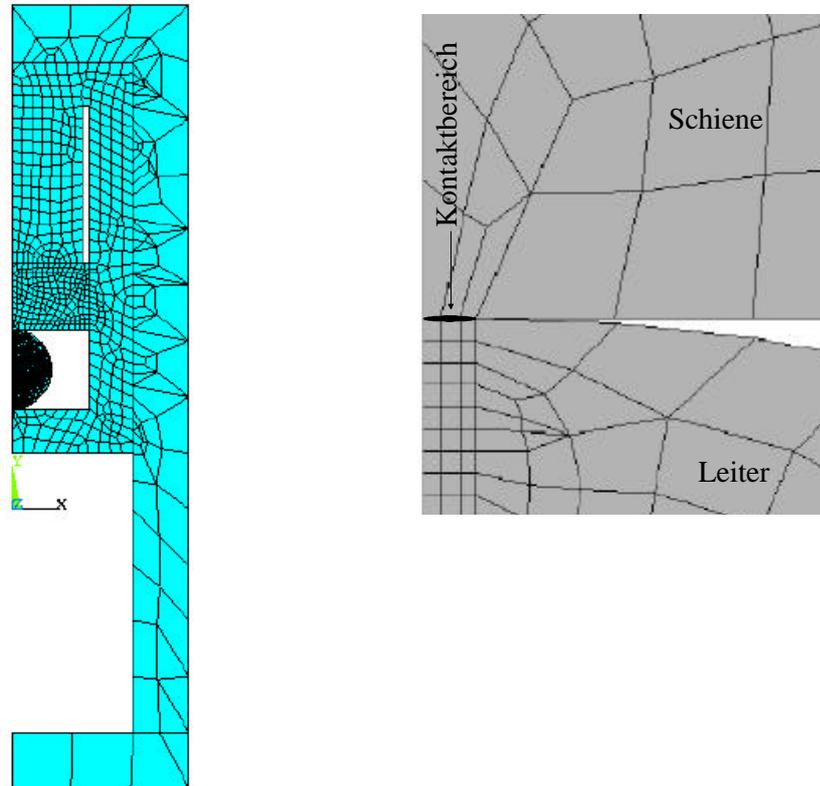


Bild 5.5: Zerlegung des Klemmen-Modells in mehrere Elemente mit Berücksichtigung der Kontaktstelle

Die durch HERTZsche Pressung entstandene Kontaktfläche zwischen Leiter und Schiene ist sehr klein gegenüber den übrigen Abmessungen der Reihenklemme. Es handelt sich um eine Anordnung von Teilbereichen stark unterschiedlicher Abmessungen, was einer erfolgreichen Vermaschung des Modells durch Finite Elemente Schwierigkeiten bereiten kann. Die Kontaktstelle weist die kleinsten Elementgrößen auf. Eine überall so feine Vermaschung wie an der Kontaktfläche macht die Anzahl der Elemente numerisch nicht mehr handhabbar. Die minimale Fläche beträgt $A = 2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ und entspricht nach Bild 5.3.1 einem Anzugsmoment $M = 0,05 \text{ Nm}$. Die Breite der Kontaktfläche ist $B = 38,50 \text{ mm}$. Durch eine automatische Vermaschung von ANSYS entstehen z.T. unregelmäßige Strukturen, die aber keine schlechteren Ergebnisse zur Folge haben als regelmäßige.

Weiterhin wird aufgrund der Verlustleistung eine *konstante Wärmeleistungsflächendichte* in den Kontaktbereich eingepreßt. Der Einfluß der Stromwärme außerhalb der Kontaktstelle wird gegenüber den Verlusten im Kontakt vernachlässigt.

5.6 Ergebnisse der Simulation

Ziel der Simulation ist es, festzustellen, welche Verlustleistungen zu welchen kritischen Temperaturen führen können. Außerdem soll die numerische Berechnung einen Zusammenhang zwischen Verlustleistung und Temperatur sowie einen Aufschluß über die Erwärmungszeitkonstanten der Reihenklemme liefern.

Das für die numerische Simulation zugrunde gelegte Modell wird auf der Basis der in den letzten Abschnitten getroffenen Voraussetzungen generiert. Es berücksichtigt den Fall eines massiven Leiters. Alternativ besteht auch die Möglichkeit, feindrähtige Leiter (Litze) anzuschließen. Dieser Fall wird nicht betrachtet. Es ist jedoch davon auszugehen, daß bei gleicher Kontaktfläche ähnliche Ergebnisse erzielt werden. Die Materialwerte werden als temperaturunabhängig betrachtet. Sie können Tabelle TA5 (siehe Anhang A) entnommen werden. Alle Bestandteile der Verbindung haben als Anfangstemperatur $T_A = 20^\circ C$. Die Luft hat ebenfalls $T_u = 20^\circ C$.

5.6.1 Isothermenbilder der Reihenklemme

Eine durch einen erhöhten Übergangswiderstand entstandene Verlustleistung bewirkt eine entsprechende Erwärmung innerhalb des betroffenen Klemmenkontaktes. Die entstandene Wärmemenge wird durch Wärmeleitung und Konvektion an die Umgebung abgeführt. In Bild 5.6.1.1 sind die Ergebnisse der Erwärmung bei einer Verlustleistung von $P = 4 \text{ W}$ in Form von Isothermenbildern zu unterschiedlichen Zeitpunkten angegeben.

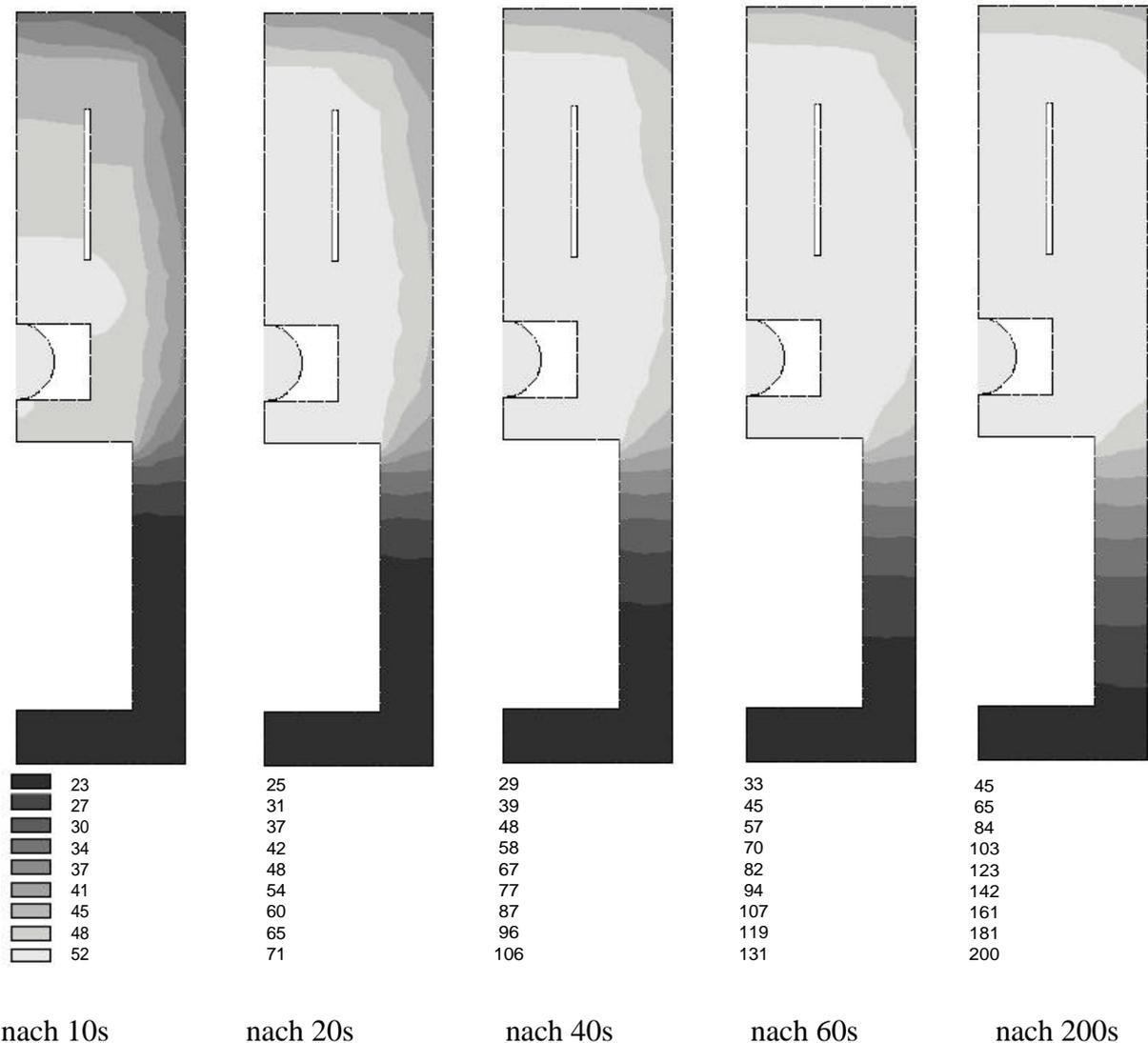


Bild 5.6.1.1: Isothermen in °C bei einer Verlustleistung $P = 4 \text{ W}$ ($A = 0,2 \text{ mm}^2$)

Die Bilder zeigen, daß sich die Temperaturfront sehr rasch zum Zugbügel über die Kupferschiene bewegt. Zunächst ist der Bereich in Höhe der Kupferschiene am stärksten belastet. Nach Vergleichsrechnungen ist das Erwärmungsverhalten der Klemme unabhängig davon, ob die Kupferschiene einen Kontakt mit dem Stahlbügel hat oder nicht. In beiden Fällen erreicht die Temperatur des Kunststoffes bereits nach wenigen Sekunden die des Kontaktbereiches. Dies bestätigen die in Abschnitt 2.3.2 erhaltenen Ergebnisse.

Damit würde ein Schmelzen des Polyamids bei höherer Belastung in Kupferschienenhöhe beginnen. Es ist folglich damit zu rechnen, daß entlang der Grenzfläche zwischen Zugbügel und Kunststoff die höchste thermische Beanspruchung des Polyamids stattfindet. Da die größte Wärmekontaktfläche in Höhe des Zugbügels zwischen Stahl und Polyamid besteht, wird diese vom Wärmestrom bevorzugt. Ein Schmelzprozeß des Kunststoffes würde bei höherer Belastung an der Außenwand genau in dieser Höhe stattfinden.

Eine Reihenklammer befindet sich meistens zwischen zwei auf einer Tragschiene befestigten Nachbarverbindungen gleichen Aufbaus. Setzt in ihr der oben beschriebene Schmelzprozeß

ein, schmilzt der ganze Kunststoff zur benachbarten Klemme hin und es kann zu Entladungen zwischen den spannungsführenden Stahlbügeln kommen. Eine solche Entladung ist in diesem Fall eine ideale Zündquelle, vor allem weil der Kunststoff bereits bis auf seine Zündtemperatur vorerwärmt wurde.

Die o.g. Feststellungen werden auch durch eine Erwärmung der gleichen Klemme im Versuchsfeld bei verminderter Kontaktfläche bestätigt. Bild 5.6.1.2 zeigt eine solche Verbindung in einem Erwärmungsstadium, das durch eine überhöhte Verlustleistung im Kontakt hervorgerufen wurde.

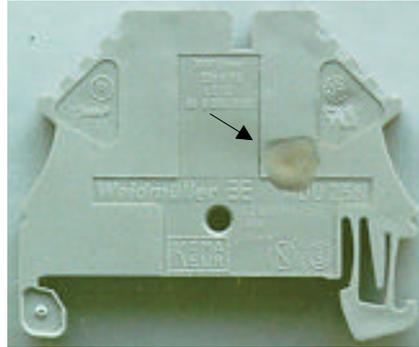


Bild 5.6.1.2: Auswirkungen der Erwärmung einer Klemme bei verminderter Kontaktfläche

5.6.2 Zusammenhang zwischen Verlustleistung und Temperatur in Kontaktnähe

Es wurde im letzten Abschnitt festgestellt, daß die Temperatur der Isolierung schnell die des Kontaktes annimmt. Deshalb ist es irrelevant, ob im FEM-Modell ein Bewertungsknoten im Bereich des Leiters oder an der Grenzfläche zwischen Kunststoff und Stahlbügel selektiert wird.

Zur Beurteilung der Temperaturentwicklung in Abhängigkeit von der Verlustleistung im Kontakt wird die Temperatur eines Knotens ausgewählt und ausgewertet (Bild 5.6.2.1).

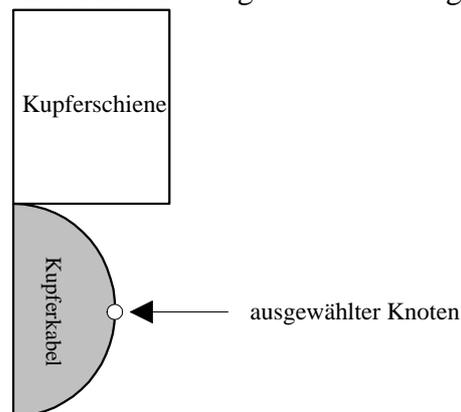


Bild 5.6.2.1: Für die Temperaturentwertung ausgewählter Knoten

Bei den entzündlichen Werkstoffen, die sich in unmittelbarer Nähe der Kontaktstelle befinden, handelt es sich um die aus Polyamid bestehende Klemmenisolierung und die aus PVC bestehende Kabelisolierung.

Es wurde im Versuchsfeld festgestellt, daß Polyamid bei einer Temperatur $T = 300\text{ °C}$ und PVC bei $T = 200\text{ °C}$ zu fließen beginnen. Die Werte entsprechen denen der Literatur [30] und werden als Zersetzungstemperaturen bezeichnet.

Die im Abschnitt 5.5 beschriebene Kontaktstelle wurde mit unterschiedlichen Verlustleistungen belastet. Die Anfangstemperatur der Klemme beträgt $T = 20\text{ °C}$. Bild 5.6.2.2 zeigt die erhaltenen Verläufe der Temperatur am ausgewählten Knoten in der Nähe der Kontaktstelle in Abhängigkeit von der Zeit. Mit einer mittleren Zeitkonstante $t = 50\text{ s}$ stellt sich jeweils eine stationäre Temperatur ein, die für die verwendeten Kunststoffe kritisch werden kann.

Es zeigt sich, daß eine Verlustleistung von mindestens $P \approx 6\text{ W}$ erforderlich ist, um eine Zersetzung des Polyamids einzuleiten. Im Vergleich dazu ist für das PVC eine niedrigere Leistung $P \approx 4\text{ W}$ notwendig. Die erhaltenen Werte berücksichtigen keine Alterungseinflüsse der Isolierung, die zu einer höheren und schnelleren Erwärmung führen können.

Da PVC eine niedrigere Zersetzungstemperatur hat als Polyamid, ist das bei Kontakterwärmung im Leistungsbereich $P \approx 4\text{ W}$ angeschlossene Kabel die primäre Zündquelle. Die Entzündung der Reihenklemme kann dadurch erfolgen. Überschreiten die Leistungswerte die $P \approx 6\text{ W}$ -Grenze, kann die Polyamidisolierung am Zündprozeß ebenfalls teilnehmen. Die Leistungswerte $P \approx 4\text{ W}$ und $P \approx 6\text{ W}$ entsprechen bei Nennstromfluß $I = 17,5\text{ A}$ (Tabelle 5.1) einem Kontaktwiderstand von $140\text{ m}\Omega$ bzw. $114\text{ m}\Omega$.

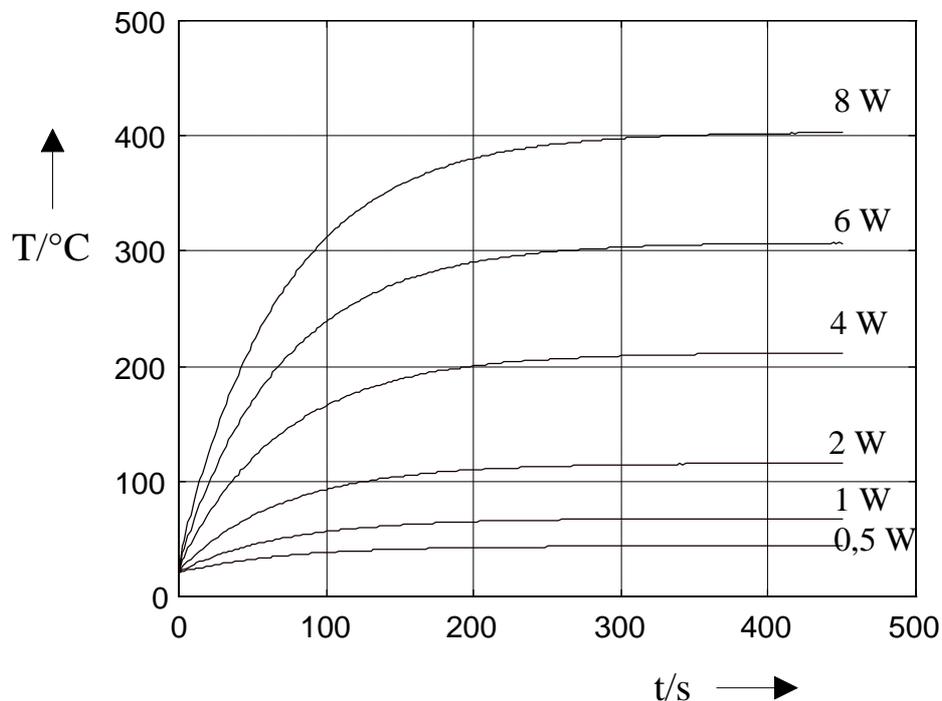


Bild 5.6.2.2: Eine Verlustleistung von mindestens $P \approx 6\text{ W}$ ist erforderlich, um eine Zersetzung des Polyamids einzuleiten (Einschaltzeit $t = 0\text{ s}$, Kontaktfläche $A = 0,2\text{ mm}^2$, Klemme nach Tabelle 5.1)

Die stationäre Temperatur in der Nähe des Kontaktes ist linear abhängig von der Verlustleistung (siehe Bild 5.6.2.3). Der Temperaturanstieg oder der Wärmewiderstand des Kontaktes beträgt ca. $47 \frac{\text{K}}{\text{W}}$.

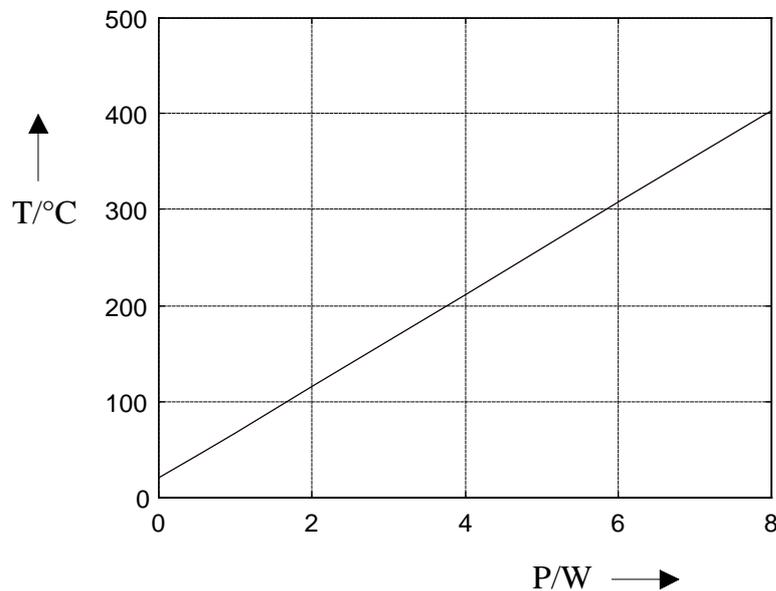


Bild 5.6.2.3: Stationäre Temperatur in der Nähe der Kontaktstelle in Abhängigkeit von der Verlustleistung ($A = 0,2 \text{ mm}^2$)

5.7 Messung der Klemmenerwärmung im Überlastfall durch Wechselstrom

Um die in den vorigen Abschnitten erzielten Simulationsergebnisse durch Messungen an Reihenklammern zu überprüfen, werden Ströme im Bereich 0-150 A benötigt. Dazu wird einem Stelltransformator (0-230 V) ein Hochstromtransformator (380V/15V; 0-185A) nachgeschaltet (Bild 5.7.1). Da hier nur langsam veränderliche Vorgänge von Bedeutung sind, werden die Effektivwerte der Spannung und des Stromes am Kontakt sowie die Temperatur in Kontaktnähe erfaßt. Alle Signale werden einem Digitalmultimeter PREMA DMM 6001 mit einer Effektivwert-Auflösung von $1 \mu\text{V}$ und einem Eingangswiderstand von $1 \text{ G}\Omega$ (Meßbereich $\pm 2 \text{ V}$) zugeführt. Die digitalisierten Meßwerte werden im Arbeitsspeicher eines über eine IEEE-488-Bus-Schnittstelle angeschlossenen Tischrechners zwischengespeichert. Nach Ende der Erwärmungsmessung werden die Daten ausgewertet und auf einem Datenträger abgelegt.

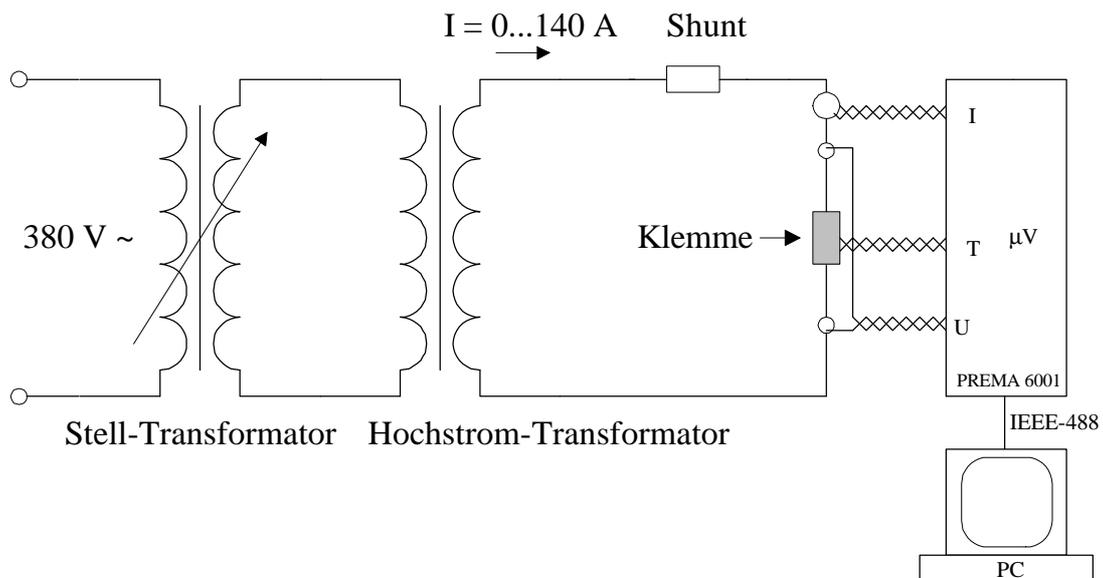


Bild 5.7.1: Meßaufbau (schematisch)

Da hier kleine Spannungen gemessen werden, müssen die Meßleitungen aufgrund möglicher induktiver Kopplungen durch hohe Ströme sorgfältig verlegt werden. Soweit möglich, müssen sie abgeschirmt und stark verdrillt werden. Die Schleifen sind klein zu halten.

Die Temperatur in Kontaktnähe wird mit Hilfe eines Ni-Cr-Ni Thermoelementes mit der in Bild BA1 (siehe Anhang A) dargestellten Temperatur-Spannungskennlinie erfaßt. Sie weist im Bereich bis 500°C einen linearen Verlauf mit der Steigung 0,041 mV/°C auf.

Für die Zersetzung der Isolierung ist die erreichte Temperatur in der Nähe des Kontaktes maßgebend. Die Thermoelement-Spitze wird, ohne die Oberflächeneigenschaften des Kontaktbereiches zu beeinflussen, durch eine Punktschweißung am Kabelaußenrand angebracht (Bild 5.7.2).

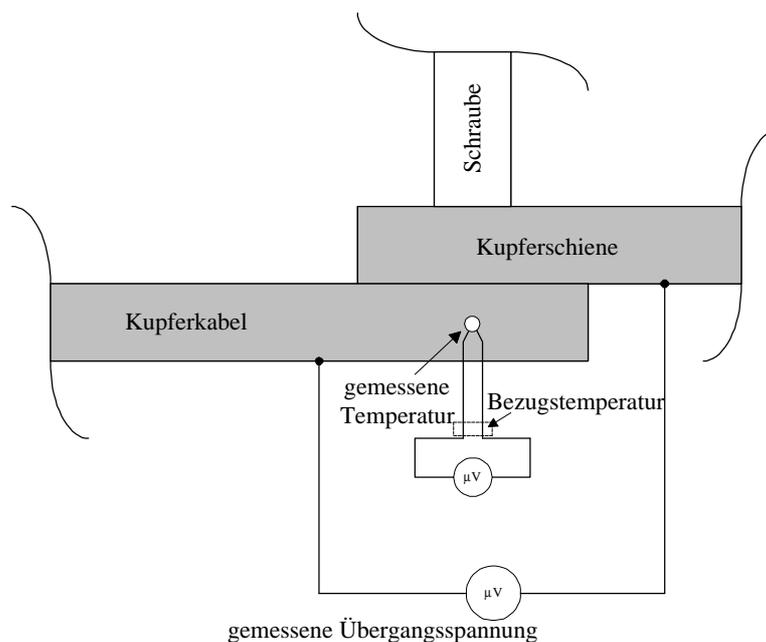


Bild 5.7.2: Anbringung der Meßsensoren an der Reihenklemme nach Tabelle 5.1 zur Erfassung der Temperatur (in Kontaktnähe) und der Kontaktspannung

Die untersuchte Reihenklemme wird ohne Reinigung oder Nachschliff der kontaktgebenden Bereiche bei Raumtemperatur $T_u = 20^\circ\text{C}$ eingesetzt. Ihr zulässiger Dauerstrom beträgt in Verbindung mit einem Kabel, das einen $1,5\text{ mm}^2$ -Querschnitt aufweist, $17,5\text{ A}$. Das Anzugsdrehmoment darf zwischen $0,4$ und $0,7\text{ Nm}$ liegen.

Alle Versuche werden mit einem H07V-U-Kabel (oben genannten Querschnittes) der Länge $L = 15\text{ cm}$ und mit der Abisolierlänge 10 mm durchgeführt. Dabei ist die Reihenklemme auf einer Tragschiene TS $35 \times 7,7\text{ mm}$ in horizontaler Lage befestigt. Um einen gleichmäßigen Kontaktbereich zu erhalten, wird darauf geachtet, daß das Kabel möglichst flach unter der Kupferschiene liegt.

Eine Erhöhung des Kontaktwiderstandes kann durch Verringerung des Anzugsmomentes mit Hilfe eines empfindlichen Drehmomentschlüssels erzielt werden.

Im Rahmen der Meßgenauigkeit, die hauptsächlich bei hohen Strömen durch unzureichende Schirmung und allgemein durch Schwankungen der Bezugstemperatur des Thermoelementes gestört wird, erhält man die im folgenden Abschnitt vorgestellten Ergebnisse. Einleitend wird der Verzicht auf eine Leistungsregelung zur Einstellung einer konstanten Verlustleistung im Kontakt begründet.

5.8 Vergleich Messung - Berechnung

Um die aus der numerischen Berechnung gewonnenen Daten mit denen aus der Messung optimal vergleichen zu können, bietet sich eine Leistungsregelung nach Bild 5.8.1 an.

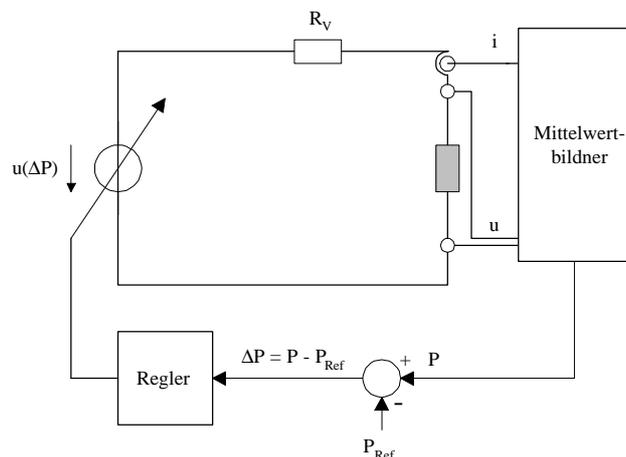


Bild 5.8.1: Verworfenen Leistungsregelungsmethode zur Einstellung einer konstanten Verlustleistung im Kontakt

Die Meßdaten von Strom und Spannung am Kontakt und die anschließende Mittelwertbildung der Momentanleistung erlauben die Bestimmung der Verlustleistung P . Ein Vergleich mit einem Sollwert P_{Ref} und eine darauf folgende Regelung der Netzspannung können dafür sorgen, daß eine konstante Verlustleistung im Kontaktbereich herrscht. Diese Methode würde jedoch dazu führen, daß der fließende Strom gegebenenfalls sehr hoch werden muß, wenn die Span-

nung am Kontakt durch Schmelz- oder Entfestigungsvorgänge zusammenbricht. Außerdem würde dies einen Vergleich mit der Berechnung erschweren, da die verursachte Stromwärme auch in unmittelbarer Umgebung des Kontaktbereiches beträchtlich ist. Sie würde in diesem Fall der lokalen Verlustleistung überlagert werden. Aus diesem Grund wird auf diese Methode verzichtet. Im Rahmen dieser Arbeit stellt sich die Verlustleistung in Abhängigkeit vom konstanten eingespeisten Strom und vom Anzugsdrehmoment ein.

Der erste Versuch mit einer (von insgesamt 50) Reihenklemme wird mit dem vorgeschriebenen Mindest-Anzugsdrehmoment des Herstellers $M = 0,4 \text{ Nm}$ durchgeführt. Dabei wird der Strom von 10 A bis 50 A in 10 A-Schritten erhöht. Nach Abkühlung der gleichen Klemme auf die Umgebungstemperatur wird das Anzugsdrehmoment in den darauf folgenden Versuchen allmählich verringert. Nach Beendigung einer Versuchsreihe werden Leiterstück und Reihenklemme ausgetauscht. Der beschriebene Vorgang wird zur Beurteilung der Reproduzierbarkeit an 50 Klemmen wiederholt. Es wird bei jedem Versuch der stationäre Zustand abgewartet. Die Bilder 5.8.2 und 5.8.3 zeigen beispielhaft die Versuchsergebnisse der an der Reihenklemme durchgeführten Messungen bei einem Anzugsmoment $M = 0,01 \text{ Nm}$ und einem Laststrom $I = 10 \text{ A}$ bzw. $I = 50 \text{ A}$.

In Bild 5.8.2a sind der am Kabel gemessene und der berechnete Temperaturverlauf dargestellt. Die gemessenen Ströme und Spannungen sind in den Grafiken unter dem Temperaturverlauf abgebildet. Im untersten Bild ist die aus den Strom- und Spannungswerten berechnete Leistung im Kontaktstück gezeigt.

Wie bereits erwähnt, ist es bei einer solchen Versuchseinrichtung nicht möglich, über die gesamte Meßzeit die Verlustleistung konstant zu halten. Auch die Spannung ist nicht konstant. Durch Entfestigungs- oder Schmelzvorgänge im Kontakt erhält man eine fallende Spannung. Wird der Kontaktwiderstand der Klemme größer (kleiner) als der Innenwiderstand des Transformators, nimmt die aufgenommene Leistung bei Vernachlässigung rein induktiver Impedanzen mit der Zeit ab (zu). Sie ist maximal, wenn beide Widerstände gleich sind. Da nur langsame Vorgänge von Bedeutung sind, werden die Effektivwerte von Strom und Spannung als Berechnungsgrundlage für die Verlustleistung herangezogen.

Die Berechnungen nach Bild 5.8.2a zeigen Abweichungen im Vergleich zu den Messungen. Dies ist hauptsächlich durch die Wärmeabfuhr in Längsrichtung der Reihenklemme zu begründen. So erwärmt sich das Klemmenmodell mit einer Zeitkonstante $t = 25 \text{ s}$, die reale Klemme dagegen etwas langsamer mit $t = 35 \text{ s}$. Auch die im Modell stationär erreichte Temperatur weicht im Mittel ca. 5°C von der der durchgeführten Versuche ab. Diese Fehler können jedoch in Kauf genommen werden, wenn es nur darum geht, die kritischen Belastungsfälle in Hinsicht auf die Entzündung der Klemme zu untersuchen.

Es ist außerdem zu bemerken, daß die Widerstandsabnahme durch Entfestigungsvorgänge² um so weniger Einfluß hat, je kleiner der Strom ist. Der Kontakt weist bei $I = 10$ A stationär eine Übertemperatur³ von ca. 17 K auf.

Aus den Ergebnissen von Bild 5.8.3 ist zu folgern, daß Belastungen des Kontaktes durch hohe Ströme u.a. zur Zerstörung von Fremdschichten und damit zur Senkung des Kontaktwiderstandes führen. Ab einem bestimmten Zeitpunkt steigt die Übergangsspannung steil an, während der Strom abnimmt. Die Temperatur folgt verzögert dem Anstieg der Verlustleistung und erreicht Werte von über 200°C. Das PVC beginnt sich an dieser Stelle zu zersetzen und es bilden sich Rauchgase.

Der Anstieg der Übergangsspannung hält solange an, bis die kontaktgebenden Mikrospitzen anfangen zu fließen ($U > 120$ mV) und damit die eventuell vorhandene Fremdschicht zerstört wird. Während der Strom konstant bleibt, sinkt die Übergangsspannung, weil der Kontaktwiderstand abnimmt. Die Kontaktfläche vergrößert sich und die Temperatur in Kontaktnähe sinkt wieder. Solche Vorgänge können vom Rechenmodell, in dem eine konstante Wärmeleistungsdichte vorausgesetzt wird, nicht erfaßt werden. Dazu müßten die vom Werkstoff abhängigen Entfestigungsbedingungen innerhalb der Kontaktstelle berücksichtigt werden.

Nach dem Versuch ist die Klemme zerstört.

² erst ab einer Mindestspannung $U = 120$ mV bei einem symmetrischen Kupferkontakt (siehe Tabelle TA2, Anhang A)

³ Die Werte beziehen sich auf die Raumtemperatur im Labor.

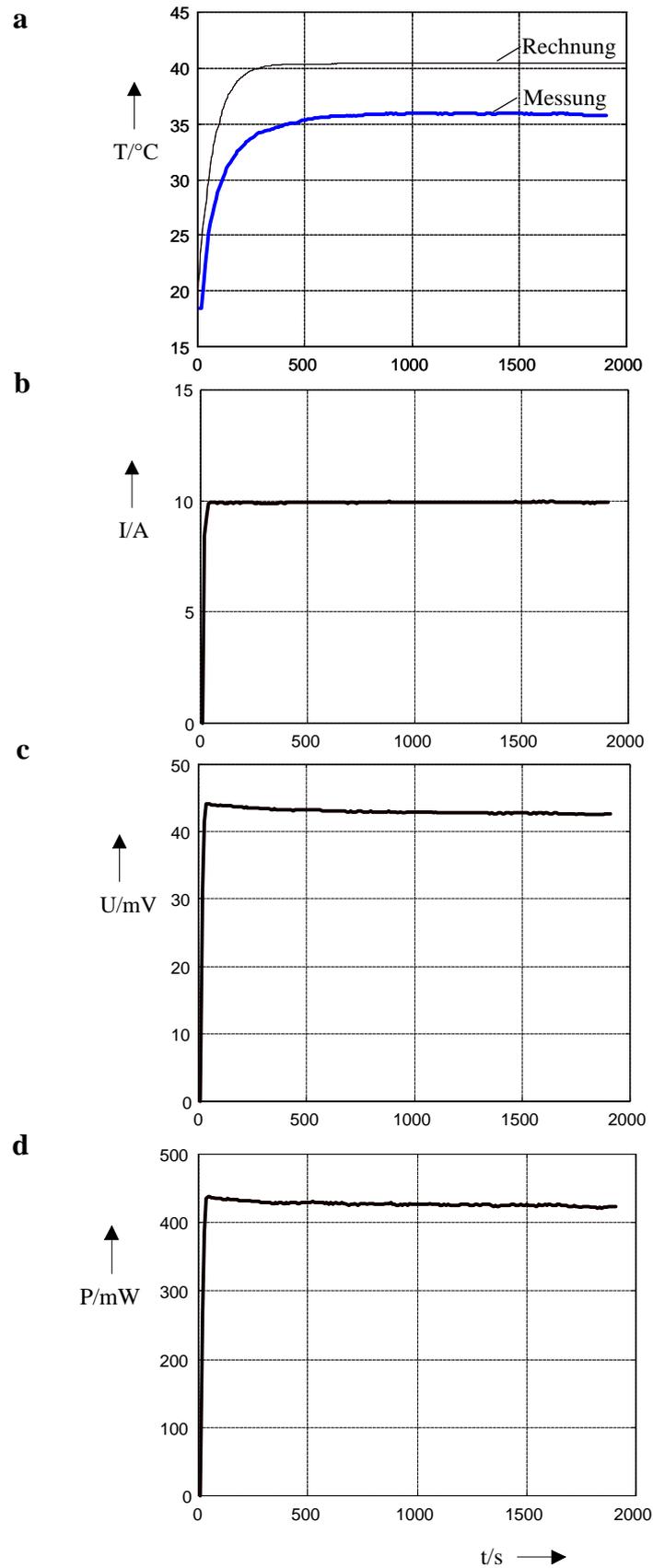


Bild 5.8.2: a Gemessener und berechneter Temperaturverlauf am Kontakt einer Reihenklemme nach Tabelle 5.1 , $I = 10 \text{ A}$, $M = 0,01 \text{ Nm}$, b, c Meßgrößen Strom und Spannung, d daraus berechnete Leistung im Kontakt

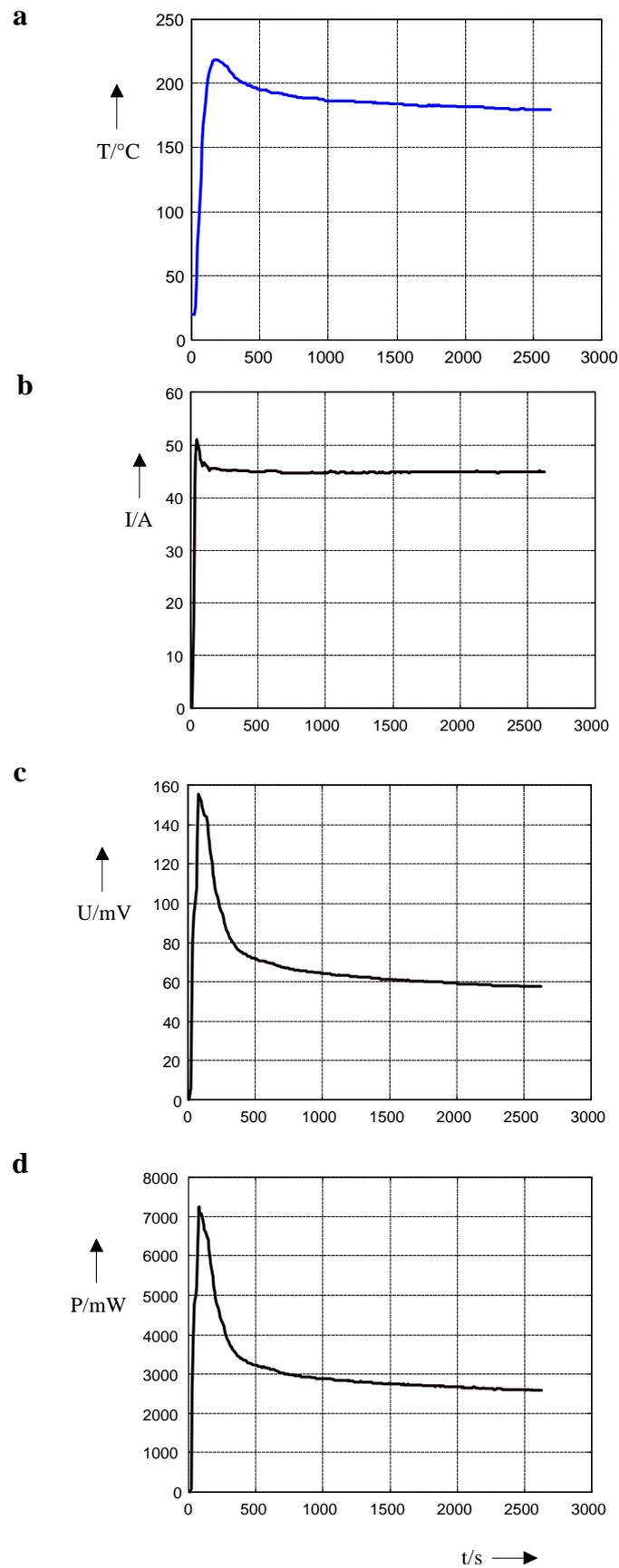


Bild 5.8.3: **a** Gemessener Temperaturverlauf am Kontakt einer Reihenklemme nach Tabelle 5.1, $I = 50 \text{ A}$, $M = 0,01\text{Nm}$, **b**, **c** Meßgrößen Strom und Spannung, **d** daraus berechnete Leistung im Kontakt

[5] zeigt, daß das Fließen hoher Lastströme durch symmetrische leicht oxidierte Kupferkontakte die Oxidschicht zerstören. Anhand der Höhe der Kontaktspannung kann u.a. das Vorhandensein eventueller dünner Fremdschichten nachgewiesen werden. Es ist festzustellen, daß eine Abnahme des Kontaktwiderstandes in der Schraubverbindung ohne äußeren Einfluß langsam abläuft. Dies wurde wie in Bild 5.8.3 nur bei Belastung mit höheren Strömen als dem Bemessungsstrom beobachtet. Der Vorteil der Messungen bei kleineren Strömen und kleinen Leiterquerschnitten liegt jedoch darin, daß der Kontakt nicht so schnell verschleißt. So stimmen die Meßergebnisse hinreichend mit den Berechnungen des Modells überein.

5.9 Belastung der Klemme im Normal- und Überlastfall

Bild 5.9.1 verdeutlicht, daß sich im Normalbetrieb bei $M = 0,4$ Nm weder am Leiter noch an der Klemme eine beträchtliche Übertemperatur einstellt. Ihr stationärer Wert beträgt bei einer Belastung $I = 10$ A im Rahmen der Meßgenauigkeit ca. 4 K. In diesem Fall ist der Temperaturgradient zwischen Kontakt und seiner direkten Umgebung Null. Es stellt sich entsprechend eine unkritische Übergangsspannung $U = 1,8$ mV ein. Diese steigt näherungsweise linear mit dem Strom an und bleibt, wie Bild 5.9.2 zeigt, auch bei einer Stromerhöhung bis 50 A unterhalb von 11 mV. Daraus folgt, daß Überlastströme in dem untersuchten Bereich nicht zu beträchtlichen Erhöhungen des Übergangswiderstandes und damit der Verlustleistung im Kontakt führen. Voraussetzung dafür ist, daß das vorgeschriebene Mindestdrehmoment an der Klemme eingehalten wird.

Die Verringerung des Anzugsdrehmomentes führt im Verlauf der Versuche zu einer ständigen Verkleinerung der Kontaktfläche zwischen Kabel und Schiene. Aufgrund der daraus folgenden Temperaturüberhöhung im Kontakt oxidiert das Kupfer. Es bilden sich zwangsläufig Fremdschichten. Durch das Fremdschichtwachstum werden die Leitwerte einiger Berührungspunkte immer niedriger. Sie führen keinen Strom mehr. Übrig bleiben nur wenige Berührungspunkte, deren Anzahl aufgrund der resultierenden Verlustleistung wieder ansteigt. Der Kontaktwiderstand steigt hier überwiegend aufgrund der Abnahme der Kontaktkraft an, wodurch die Verlustleistung in der Klemme zunimmt. Die durchgeführten Versuche zeigen, daß nennenswerte Änderungen der Temperatur in Kontaktnähe erst bei 10% des vorgeschriebenen Anzugsdrehmomentes (0,4 Nm) entstehen. Bild 5.9.3.a zeigt die gemessene stationäre Temperatur in Kontaktnähe in Abhängigkeit vom Drehmoment mit der Stromstärke als Parameter. Sieht man von der Widerstandserhöhung durch das Wachstum der Fremdschicht im Verlauf des Versuches ab, bleibt die kritische Übertemperatur im Normalbetrieb ($I \leq 17,5$ A) der Reihenklemme unterhalb von 60 K. Die Verlustleistungen liegen entsprechend unter 1,5 W (Bild 5.9.3.b). Die Zersetzungstemperatur vom Polyvinylchlorid des Kabels wird dabei nie erreicht. Erst bei höheren Strömen $I > 40$ A führt eine erhöhte Verlustleistung im Kontakt $P > 3$ W zum Schmelzen der Kabelisolierung.

Unter normalen Betriebsbedingungen ist es nicht möglich, die Zersetzung der Isolierung herbeizuführen. Die Erwärmung führt jedoch zur beschleunigten Oxidation der Klemme im Kontaktbereich und zusätzlich zur schnellen Alterung der Isolationsstoffe (hier PVC und Polyamid).

Darüberhinaus bewirken Überlastströme bei niedrigen Anzugsdrehmomenten ein rasches Erreichen der Zersetzungstemperatur des Polyvinylchlorids oder des Polyamids.

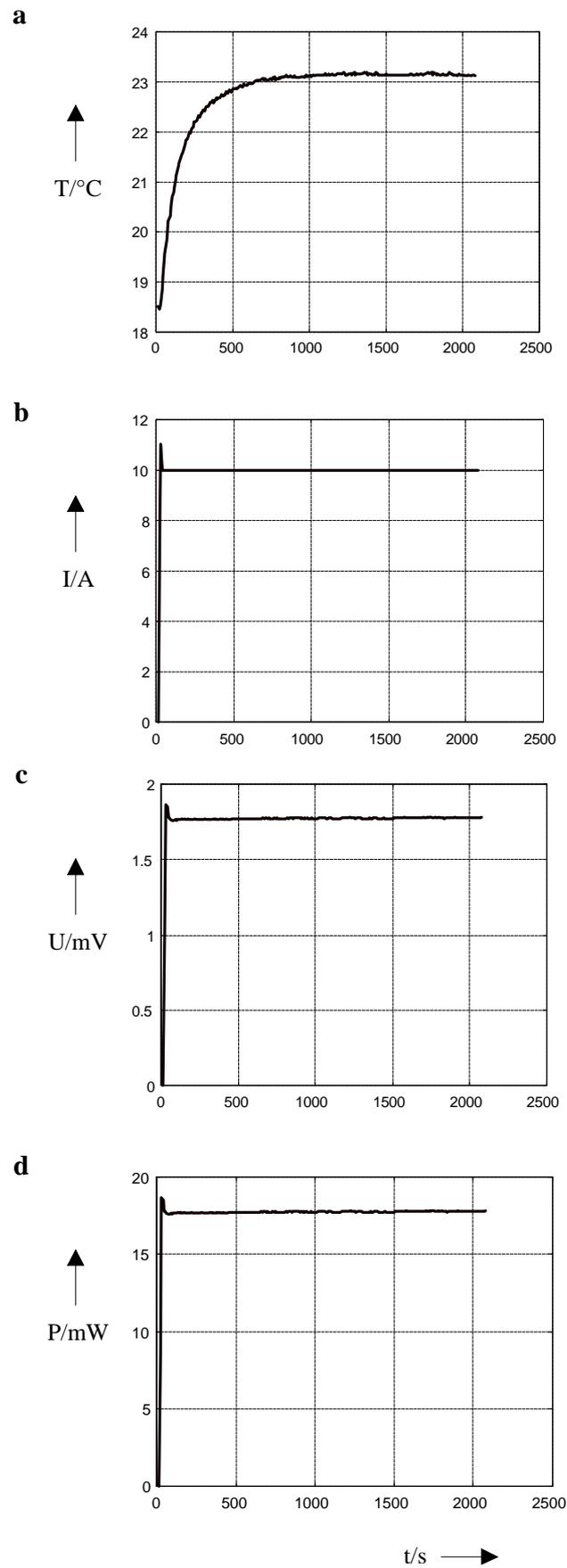


Bild 5.9.1: **a** Gemessener Temperaturverlauf am Kontakt einer Reihenklemme nach Tabelle 5.1, $I = 10 \text{ A}$, $M = 0,4 \text{ Nm}$, **b**, **c** Meßgrößen Strom und Spannung, **d** daraus berechnete Leistung im Kontakt

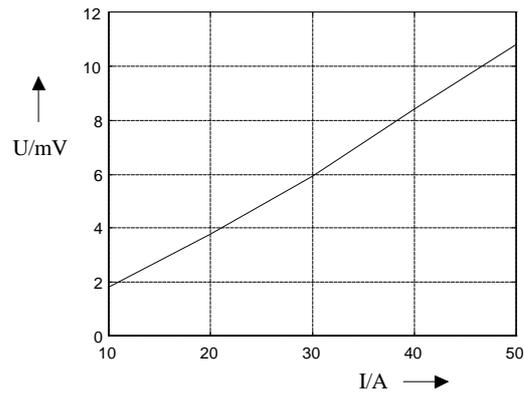
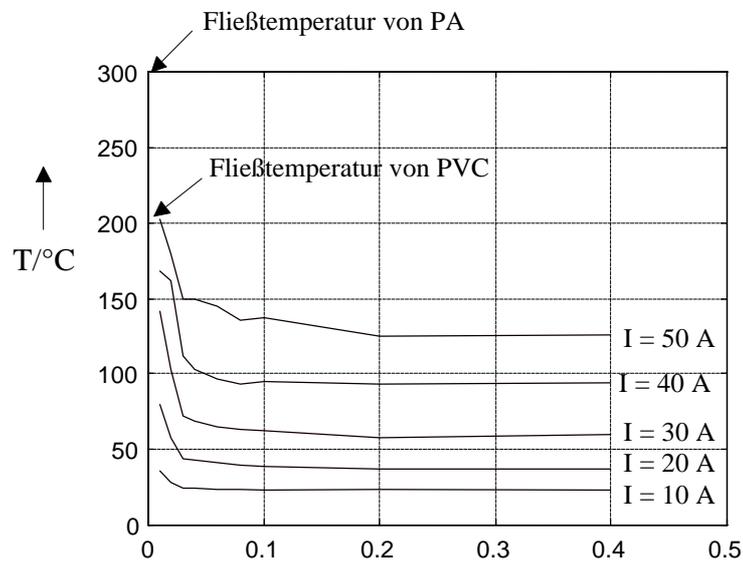


Bild 5.9.2: Gemessene Übergangsspannung am Kontakt einer Reihenklemme nach Tabelle 5.1 in Abhängigkeit von der Stromstärke, $M = 0,4 \text{ Nm}$

a



b

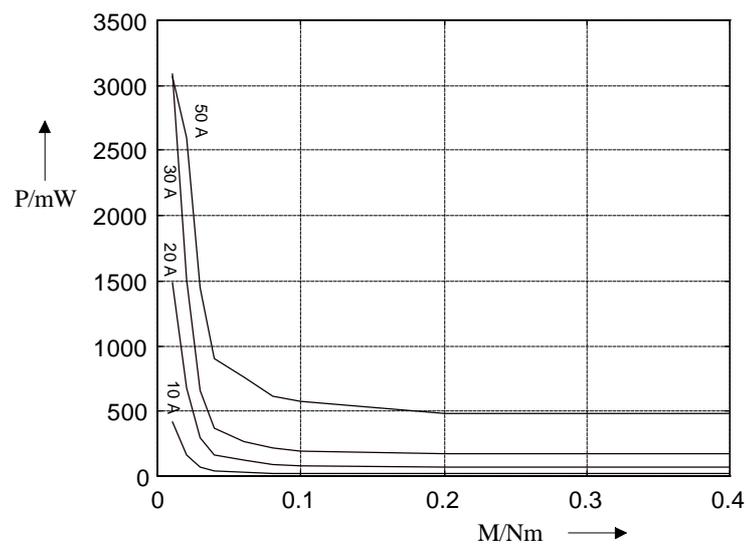


Bild 5.9.3: Überlastströme bewirken bei niedrigen Anzugsdrehmomenten der Reihenklemme nach Tabelle 5.1 ein rasches Erreichen der Schmelztemperatur des Polyvinylchlorids oder des Polyamids
a Stationäre Temperatur in Kontaktnähe **b** stationäre Verlustleistung im Kontakt (Mittelwerte)

5.10 Belastung kurzer Dauer

Bei weiteren Versuchen wird die Verbindung mit Stromimpulsen von $I > 50$ A für eine Zeitdauer von 30 s belastet. Dadurch soll der Fall einer länger anhaltenden Überlast (z.B. bei fehlerhafter Schutzeinrichtung) im Stromkreis simuliert werden. Bild 5.10.1 zeigt beispielhaft die gemessenen Kurven bei einem Anzugsdrehmoment $M = 0,05$ Nm und bei einer Stromstärke $I = 60$ A. Je nach Höhe des Stromimpulses ergibt sich eine maximale Temperatur in Kontaktnähe als Funktion des eingestellten Anzugsdrehmomentes, die im Zusammenwirken mit der Verlustleistung zur Entzündung der Isolierung führen kann. Aufgrund der nicht mehr vernachlässigbaren Stromwärme in der Umgebung des Kontaktbereiches erhält man mit Hilfe der Messung im Gegensatz zur numerischen Berechnung, eine höhere maximale Temperatur in Kontaktnähe.

Weitere Versuche zeigen, daß trotz Abnahme des Drehmomentes die Übergangsspannung nur leicht ansteigt und bei Strombelastungen bis 140 A im Bereich $U < 50$ mV bleibt. Dies ist auf thermische Vorgänge im Kontaktbereich zurückzuführen, die sich günstig auf die Ausdehnung der Kontaktfläche auswirken und damit den Übergangswiderstand begrenzen.

Wegen der hohen Ströme werden jedoch große Verlustleistungen im Kontakt gemessen. Die Verringerung des Drehmomentes läßt auch hier, wie Bild 5.10.2 zeigt, die Temperatur im Kontaktbereich ansteigen. So führen Ströme im Bereich $I > 100$ A nach 30 s zum Schmelzen des Polyvinylchlorids bzw. des Polyamids. Die Übertemperatur bleibt im Fall des vorgeschriebenen Drehmomentes (in Bezug auf die Anfangstemperatur 20°C) unter 130 K. Damit ist gezeigt, daß die Isolierung der Reihenklemme bei hohen Überlastströmen und gleichzeitig hohen Kontaktwiderständen durch zu geringes Anzugsmoment relativ schnell schmelzen kann.

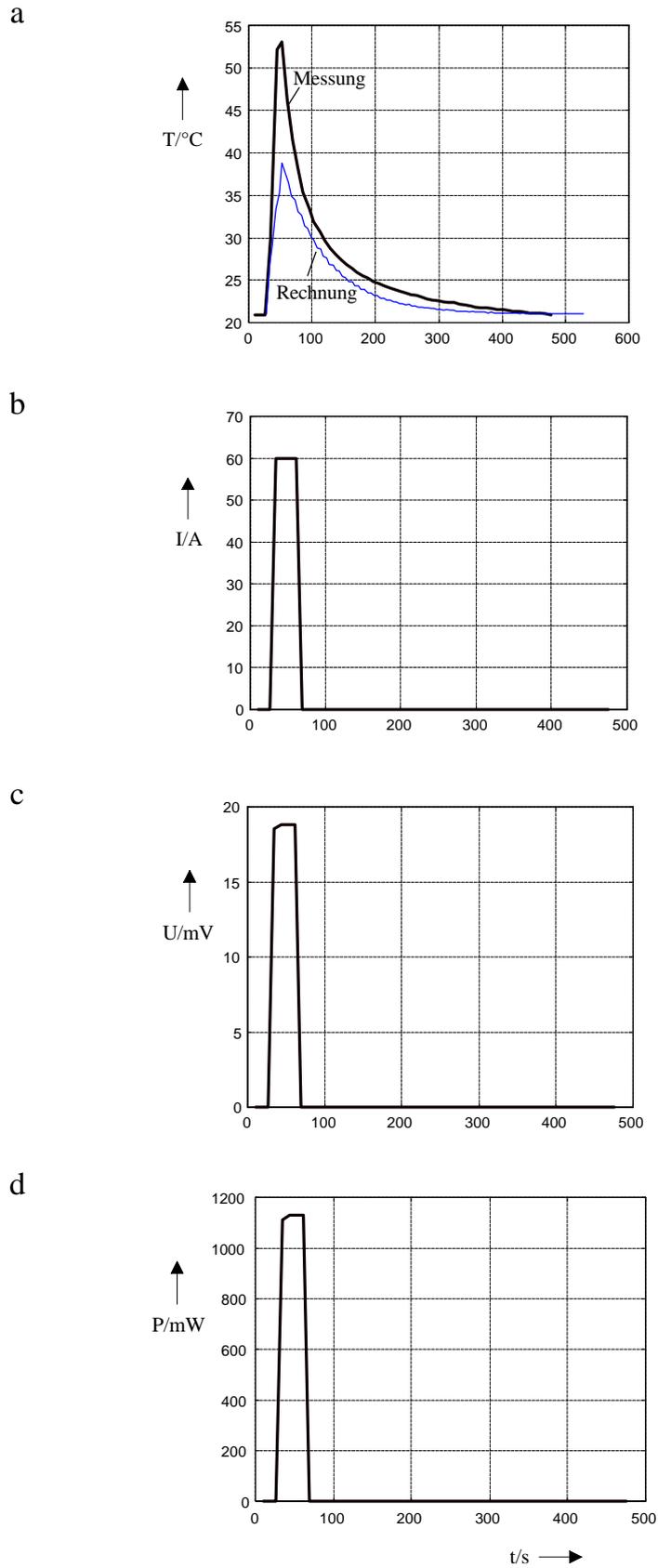


Bild 5.10.1: a Gemessener und berechneter Temperaturverlauf am Kontakt einer Reihenklemme nach Tabelle 5.1, $I = 60 \text{ A}$, $M = 0,05 \text{ Nm}$, b, c Meßgrößen Strom und Spannung, d daraus berechnete Leistung im Kontakt

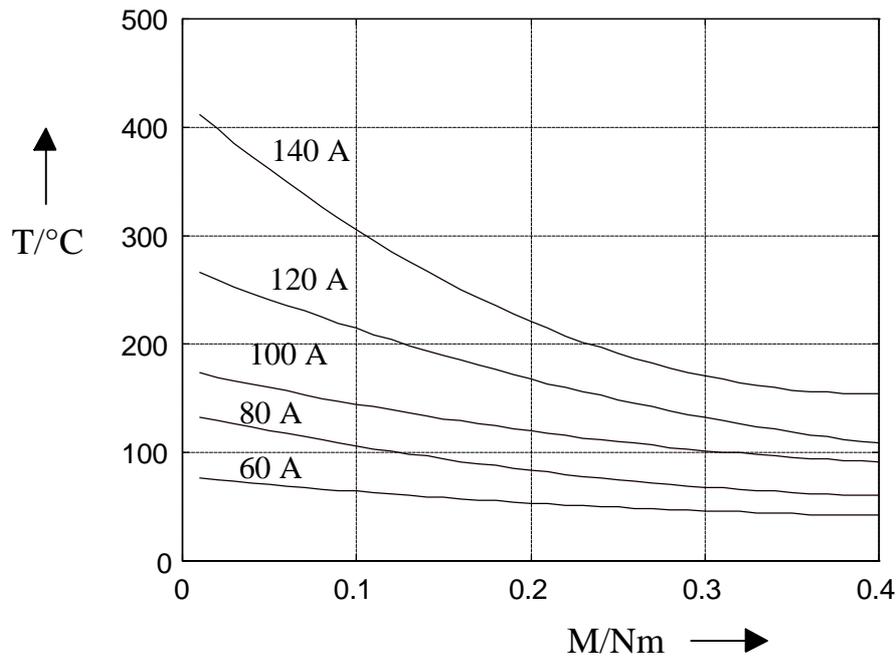


Bild 5.10.2: Maximale gemessene Temperatur in Kontakt­nähe der Reihen­klemme bei einer Belastungs­dauer von 30 s

5.11 Belastung einer losen Klemme

Im Folgenden werden zwei Fälle betrachtet, die das Klemmenverhalten im losen Zustand beschreiben. Der erste Fall bezieht sich auf den noch vorhandenen Kontakt zwischen Schiene und Leiter, während im zweiten Fall der Kontakt nur noch zwischen Leiter und Stahlbügel besteht.

5.11.1 Kontakt zwischen Schiene und Leiter

Am Ende jeder Meßreihe nach Bild 5.9.3, bei der das Anzugsdrehmoment schrittweise bis auf 0,01 Nm verkleinert wurde, wurde die Schraube um *eine volle* Umdrehung gelöst. Trotz der extremen Lockerung, entsprechen die Messungen mit variablem Strom überwiegend den in Abschnitt 5.8 aufgeführten Ergebnissen. In 10% der (insgesamt 50) Fälle konnte jedoch ein besonderes Klemmenverhalten nach Bild 5.11.1 beobachtet werden. Es zeigt beispielhaft den gemessenen Vorgang⁴ bei $I = 30\text{ A}$ und einer Spannungsbegrenzung von 1,2 V.

Strom und Übergangsspannung sind aufgrund *selbsttätiger* thermischer Kontaktunterbrechungen unstetig. In einem ersten Zyklus liegt eine mittlere Übergangsspannung $U = 200\text{ mV}$ am Kontakt an. Nach der Zeit $t = 150\text{ s}$ unterbricht der Kontakt. Die leitende Brücke an der Kontaktfläche zwischen Kupferkabel und Kupferschiene ist aufgrund thermischer Dehnung und Übererwärmung verdampft. Bis zur ersten Kontaktunterbrechung erreicht die Temperatur in Kontakt­nähe näherungsweise die Zersetzungstemperatur des Polyvinylchlorids $T = 193\text{ }^\circ\text{C}$. Reißt der Kontakt ab, nimmt die Übergangsspannung den Wert der Quellenspannung $U = 1180$

⁴ Ähnlich sieht der Verlauf bei Belastung durch den Bemessungsstrom 17,5 A aus.

mV an und die Temperatur nimmt wieder ab. Im Mittel dauert die Kontaktunterbrechung nicht länger als 90 s und die Kontaktdauer ca. 70 s. Bei jeder Kontaktherstellung ist ein deutliches Knistern zu hören. Es handelt sich um eine selbständige Bogenentladung zwischen den Kontaktstücken. Die Zündung der Strecke kann durch Thermo- und Feldemission (Kapitel 2) begründet werden. Dabei reichen offensichtlich eine Elektrodenspannung von ca. 1,2 V und eine mittlere Temperatur $T = 75 \text{ °C}$ in Kontaktnähe aus, um eine Entladung zwischen den Kupferelektroden zu verursachen. Ist die Zündung eingeleitet, steigt die Temperatur auf einen Höchstwert an.

Die oben beschriebenen sporadischen Schaltvorgänge dauerten 100 Minuten (endgültige Stromunterbrechung) und können unter günstigeren Bedingungen länger anhalten. Dabei erreicht die Temperatur in Kontaktnähe maximal und kurzzeitig $T = 243 \text{ °C}$ (nicht abgebildet). Dieser Wert überschreitet die Schmelztemperatur von PVC deutlich.

Die hier im Mittel erzeugte Verlustleistung $P = 6 \text{ W}$ würde bei stetiger Zuführung zum Schmelzen des Polyamids führen (Abschnitt 5.6.2). Hier ist die Dauer des Stromflusses jedoch so kurz, daß die Temperatur unter 300 °C bleibt. Die durch die Bogenentladung entstandene Wärme bestimmt die Anfangstemperatur im Kontakt.

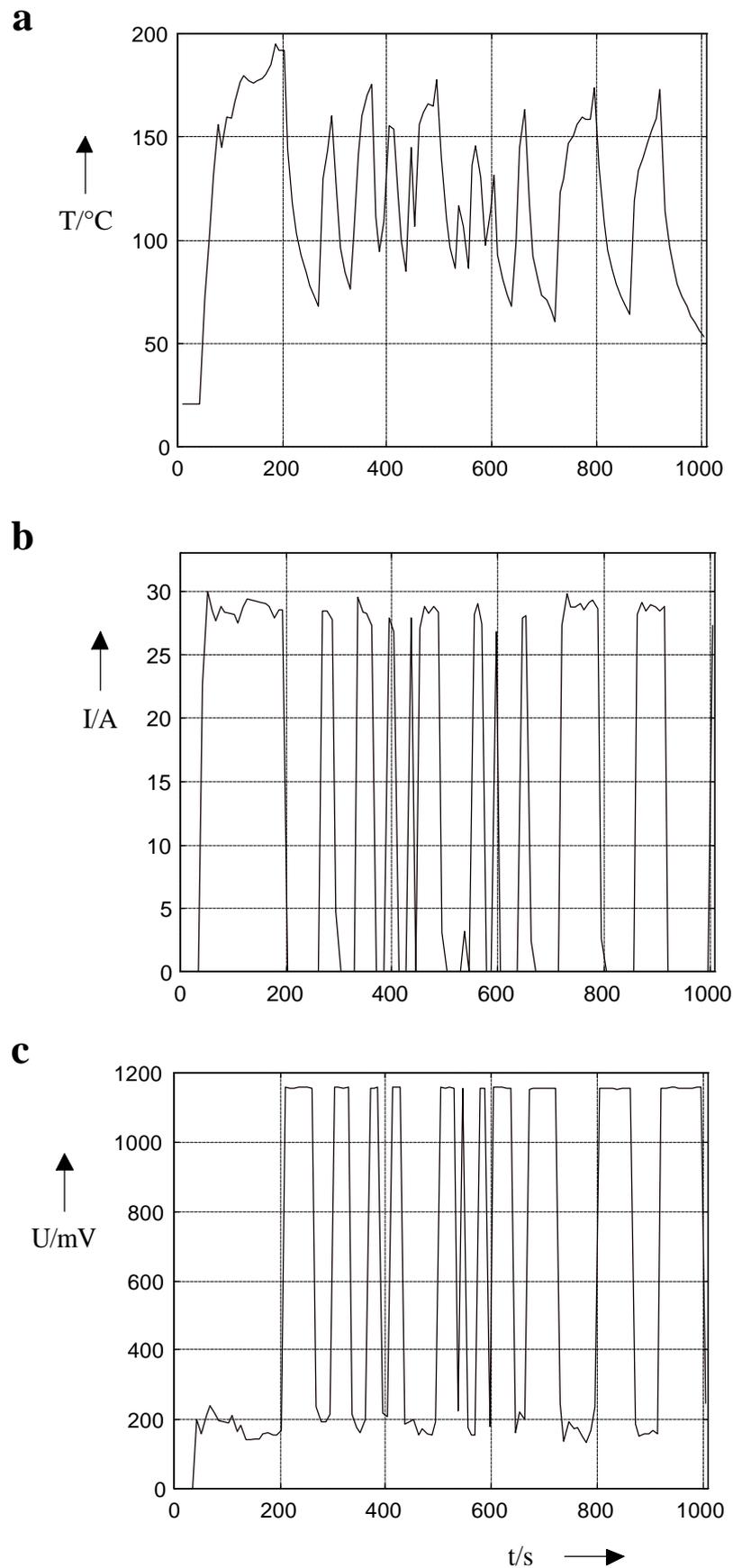


Bild 5.11.1: Strom, Übergangsspannung und Temperatur sind aufgrund thermischer Kontaktunterbrechungen unstetig **a** Temperatur der Verbindung, **b** Laststrom $I = 30\text{ A}$ und **c** Übergangsspannung im losen Zustand

5.11.2 Kontakt zwischen Stahlbügel und Leiter

Eine weitere mögliche Lage des Leiters innerhalb der Klemme wird in Bild 5.11.2.1 verdeutlicht. Hier besteht der Kontakt nur noch zwischen Leiter und Stahlbügel. Während der Versuche wird das im Bügel liegende Kabel durch unterschiedliche Kräfte $F = 0,05-0,5 \text{ N}$ belastet. In Abhängigkeit von der ausgeübten Kraft auf den Leiter stellt sich ein entsprechender Übergangswiderstand ein.

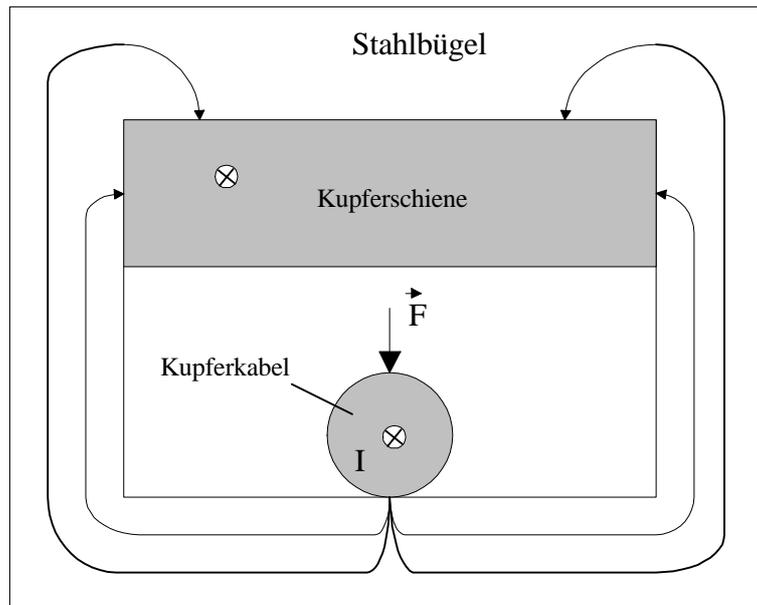


Bild 5.11.2.1: Lage des Klemmenkontaktes

Bild 5.11.2.2 zeigt die zeitlichen Verläufe von Spannung und Temperatur der Klemme bei $I=20 \text{ A}$ und $F=0,05 \text{ N}$. Direkt nach dem Einschalten steigt die Übergangsspannung zunächst sehr steil auf 380 mV an. Darauf folgt ein steiles Absinken auf Spannungswerte unter 150 mV . Im Vergleich zu den Kontaktelementen aus Kupfer, d.h. zwischen Leiter und Schiene, verbessert sich der Kontakt zwischen Leiter und Stahlbügel mit der Zeit schneller.

Die Erwärmung des Kontaktbereiches ruft eine schnellere Vergrößerung der Kontaktfläche hervor. Die kleinere Wärmeleitfähigkeit von Stahl bewirkt ein rasches Fließen der kontaktgebenden Mikrospitzen des Kupferkabels. Die gemessene Temperatur in Kontaktnähe bleibt unter 100 °C ($T_{\text{max}} = 77 \text{ °C}$) und ist in Hinsicht auf die Bildung von Fremdschichten kritisch.

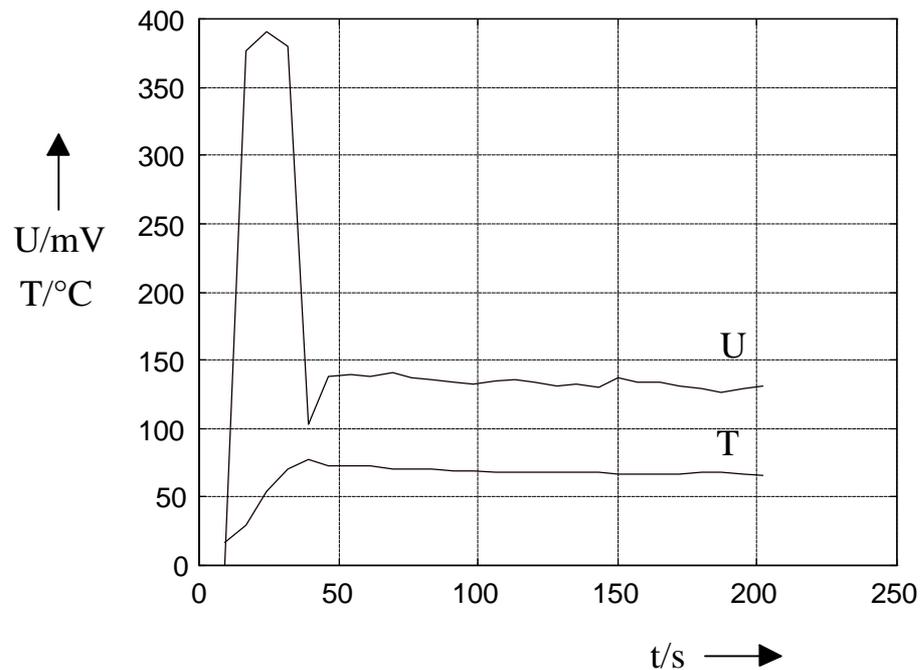


Bild 5.11.2.2: Typische Verläufe für Übergangsspannung und Temperatur der Klemme nach Tabelle 5.1 ($I = 20 \text{ A}$ und $F = 0,05 \text{ N}$)

5.11.3 Entzündungsversuche

Um die Bedingungen zu erfassen, unter denen sich die Isolierung einer *losen* Reihenklemme entzünden kann, wurden mehrere Versuche durchgeführt. Die Belastung der Klemme durch Lichtbögen im Kontaktbereich hat sowohl Auswirkungen auf die Isolierung als auch auf eine spätere Entwicklung der Kontakteigenschaften. Weiterhin wird hier gezeigt, daß eine Stromüberlast die Entzündung der Isolierung ohne Lichtbögen begünstigt.

Entzündungsversuche mit einem schwingenden Kabel. Mechanische Vibrationen können in großen Maschinenbetrieben, Flugzeugen, Autos, Bahnen u.s.w. auftreten und elektrische Kontakte beeinträchtigen. In diesem Abschnitt wird Ihr Einfluß auf die Schraubverbindung näher untersucht.

Mit Hilfe eines Schwingungserregers wird das Kabel im Kontaktbereich der losen Klemme ($M < 0,01 \text{ Nm}$) nach Bild 5.11.3.1 mit einer Frequenz von 1 Hz und einer Amplitude von 2-6mm axial bewegt. Die Reihenklemme wird durch eine Stromquelle mit einem konstanten Strom $I=10 \text{ A}$ bei einer Leerlaufspannung $U = 15 \text{ V}$ belastet.

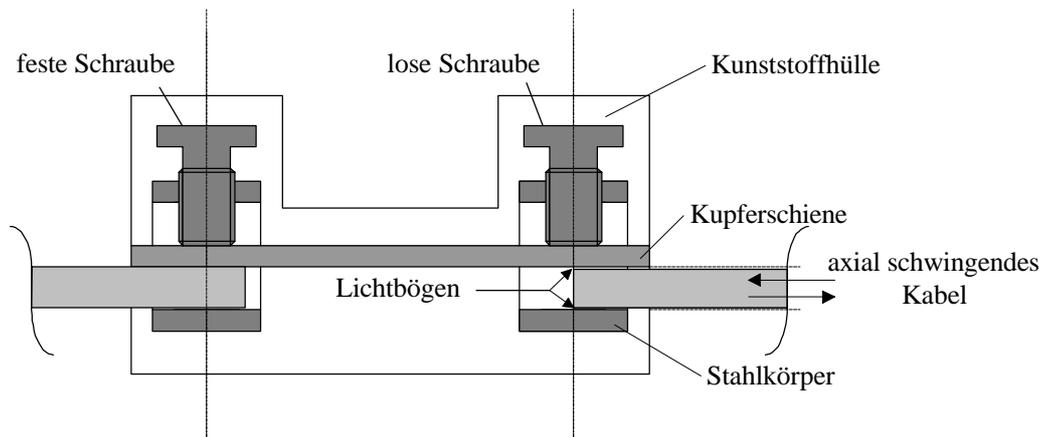


Bild 5.11.3.1: Zündversuch mit einem schwingenden Kabel an der losen Klemme

Es entstehen Lichtbögen, die die Isolierung beanspruchen. Außerdem bilden sich Gase stechenden Geruches, die eine über der Klemme aufgestellte Plexiglas-Abdeckung (Größe: 240x140x155 mm) ausfüllen. Die Verkohlungs des Kunststoffes in direkter Nähe des Kontaktbereiches setzt unmittelbar danach ein. Eine anschließende Entzündung der Isolierung wird üblicherweise beobachtet, wenn

- der Verkohlungsgrad des Polyamids niedrig ist und
- die Häufigkeit der Lichtbögen bei größerer Gasmenge ausreichend ist.

Der Kunststoff entflammt mit einer bläulich-gelben Flamme, die mindestens zehn Sekunden andauert. Setzt sich die Verkohlung ohne Flambildung fort, kommt es zur völligen elektrischen Isolierung des Kabels von der Kupferschiene. Der Kontakt wird unterbrochen. Die verkohlte Schicht wirkt sowohl flammhemmend (verhindert die Sauerstoffzufuhr) als auch elektrisch isolierend.

Auswirkungen von Entladungen. In einem weiteren Schritt wird die Möglichkeit der beschleunigten Bildung einer leitenden Metall-Oxidbrücke zwischen den Kontaktstücken durch Gleich- und Wechselstromlichtbögen geprüft. Bei den entsprechenden Versuchen wird auf die Kunststoffhülle der Verbindung, auf die PVC-Isolierung des Kabels sowie auf das Plexiglasgehäuse verzichtet (Bild 5.11.3.2). Die Schwingungsamplitude wird mit 0,5 mm so klein gehalten, daß keine Lichtbögen hoher Energie entstehen. Die konstante Leerlaufspannung der Stromquelle beträgt $U = 25 \text{ V}$ und die Schwingfrequenz 1 Hz.

Mit der Kontaktstückkombination Kupfer-Kupfer war es im Gegensatz zu den in [6] beschriebenen Versuchen nicht möglich, eine Oxidbrücke zwischen Kupferkabel und Kupferschiene herzustellen (Tabelle 5.11.3). Dies wird vermutlich durch die im Vergleich zu Stahl hohe Wärmeleitfähigkeit von Kupfer erschwert.

Tabelle 5.11.3 Zur beschleunigten Bildung einer Metall-Oxidschicht an den Kontaktstücken der Verbindung

Kontaktstelle	Bildung einer Oxidschicht	Übergangsspannung bei Wechsel- und Gleichstrom $I \leq 15 \text{ A}$
Kupferkabel-Kupferschiene	nein	-
Kupferkabel-Stahl	ja	$U \leq 1,5 \text{ V}$
Kupferschiene-Stahl	ja	$U \leq 0,5 \text{ V}$

Nach einer Schwingungsdauer von wenigen Minuten und nach dem Ausschalten des Schwingers bildet sich in der Regel ein schwach leuchtender Punkt zwischen Kabel und Stahl. Bei ruhendem Kabel sind Büschelentladungen zu beobachten. Das Leuchten wird intensiv und der Punkt beginnt anschließend zu glühen. Da gleichzeitig Übergangswiderstände zwischen Schiene und Stahl bestehen, kommt es auch hier gelegentlich zur Ausbildung glühender Punkte (Bild 5.11.3.2).

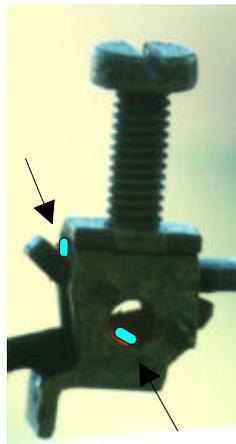


Bild 5.11.3.2: Glühende Oxidbrücken an der Verbindung

Bei Wechselstrom ist eine variable Leuchtintensität eines wandernden Punktes am Kontakt zu beobachten. So sind seine Zündung, Wanderung sowie Löschung viel häufiger als bei Gleichstrom.

Das daraus resultierende Glühen des Metalls ist sehr stabil und existiert mehrere Stunden. Seine Lebensdauer ist abhängig vom Strombetrag. Je geringer der Strom ist, desto höher ist die Lebensdauer. Das Glühen tritt am nächsten Versuchstag bei erneutem Einschalten wieder auf.

Die gemessene Übergangsspannung liegt bei maximal 2 V und die Verlustleistung bei 10W. Da diese Werte in keiner Weise durch die vorherigen Versuche bei loser Klemme erreicht werden, zeigen diese Ergebnisse, daß die Verbindungen mit glühendem Kontakt die

höchste Verlustleistung bei kleinen Strömen aufweisen. Die Temperatur des glühenden Kontaktes liegt mindestens beim Schmelzpunkt des Kupfers (1080 °C).

Die Struktur der Oxidbrücke wird mit Hilfe des Elektronenmikroskopes analysiert. Dazu wird ein Querschliff an der Kontaktstelle des Kupferkabels untersucht (Bild 5.11.3.3).

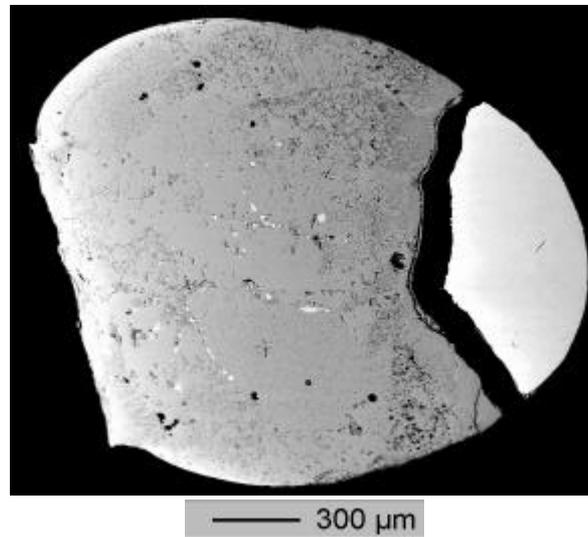


Bild 5.11.3.3: Vergrößerter Ausschnitt des Kupferkabels an der Kontaktstelle (links: Kupferoxid, rechts (hell): reines Kupfer)

Die Strukturanalyse zeigt, daß es sich um nahezu reines Kupferoxid handelt, in dem u.a. kleine Anteile an Zink und Eisen vorhanden sind. Kupferoxid gilt als Halbleiter und entsteht meist bei hoher Temperatur (Entladungen) und ständiger Sauerstoffzufuhr. Unter 400 °C bildet sich Kupfer-(I)-Oxid Cu_2O und über dieser Temperatur Kupfer-(II)-Oxid CuO . Außerdem scheint Stahl als metallisches Gegenkontaktstück gut geeignet zu sein, um Kupfer bei Lichtbogeneinwirkung in Kupferoxid umzuwandeln. Stahl wirkt aufgrund seines Aufbaus in der Verbindung und durch seine niedrige Wärmeleitfähigkeit ($I_s \approx \frac{I_{Cu}}{18}$) wärme-isolierend und fördert damit die Bildung einer relativ stabilen Kupferoxidschmelze.

Kupfer-I-Oxid wird bei niedrigem Sauerstoff-Partialdruck leicht elektrisch leitend [27]. Solange die wirksame Kontaktfläche keinen oder nur einen minimalen Sauerstoffzugang zuläßt, bleibt der Stromfluß erhalten.

Zündung ohne Lichtbögen. Mit einer losen Klemme (mit Kunststoffisolierung) wird nun versucht, die Entzündung der Isolierung ohne Lichtbogeneinfluß einzuleiten. Dazu wird der Versuchsaufbau nach Abschnitt 5.7 angewendet.

Der Laststrom wird mit Hilfe des Stelltransformators von 0 auf 30 A langsam erhöht. Der Meßvorgang wird an der gleichen Reihenklemme, die diesmal mit einer *Nachbarklemme* in Kontakt ist, 20 mal wiederholt. Es ergeben sich die in Abschnitt 5.9 aufgeführten Ergebnisse.

Gegen Ende einer Versuchsreihe wird jedoch die durch Bild 5.11.3.4 beschriebene Reaktion der Klemme festgestellt. Die Temperatur in Kontaktnähe nimmt aufgrund der rasch ansteigenden Verlustleistung (bis über 20 W) stark zu und erreicht nach ca. 100 s die Zersetzungstemperatur vom Polyamid. Es kommt zu einer kontinuierlichen Verkohlung des Kunststoffes bei starker Rauchentwicklung. Eine Entzündung wurde nicht beobachtet.

Da die Übergangsspannung ab einem bestimmten Zeitpunkt den kritischen Wert der Schmelzspannung 0,43 V (siehe Anhang A, Tabelle TA2) zwischen zwei Kupferkontaktstücken überschreitet, ist von der Existenz einer Fremdschicht auszugehen. Diese hat sich durch die vorherigen Versuche gebildet. Die Höhe der Stromstärke reicht nicht aus, um diese zu zerstören. Außerdem wird die Wärmeabführung durch die Nachbarklemme verhindert, was die in der nahen Umgebung des Kontaktes gemessene Temperatur T_u bestätigt.

Nach zehn Minuten reißt der Kontakt jedoch ab. Der Verkohlungsprozeß leitet die endgültige elektrische Isolierung am Kontakt ein. Nach dem Versuch ist der Kunststoff der Klemme an der losen Stelle zerstört. Der Kunststoffkörper einer Nachbarklemme weist, wie Bild 5.11.3.5 zeigt, eine starke Verkohlung sowie ein Brandloch auf.

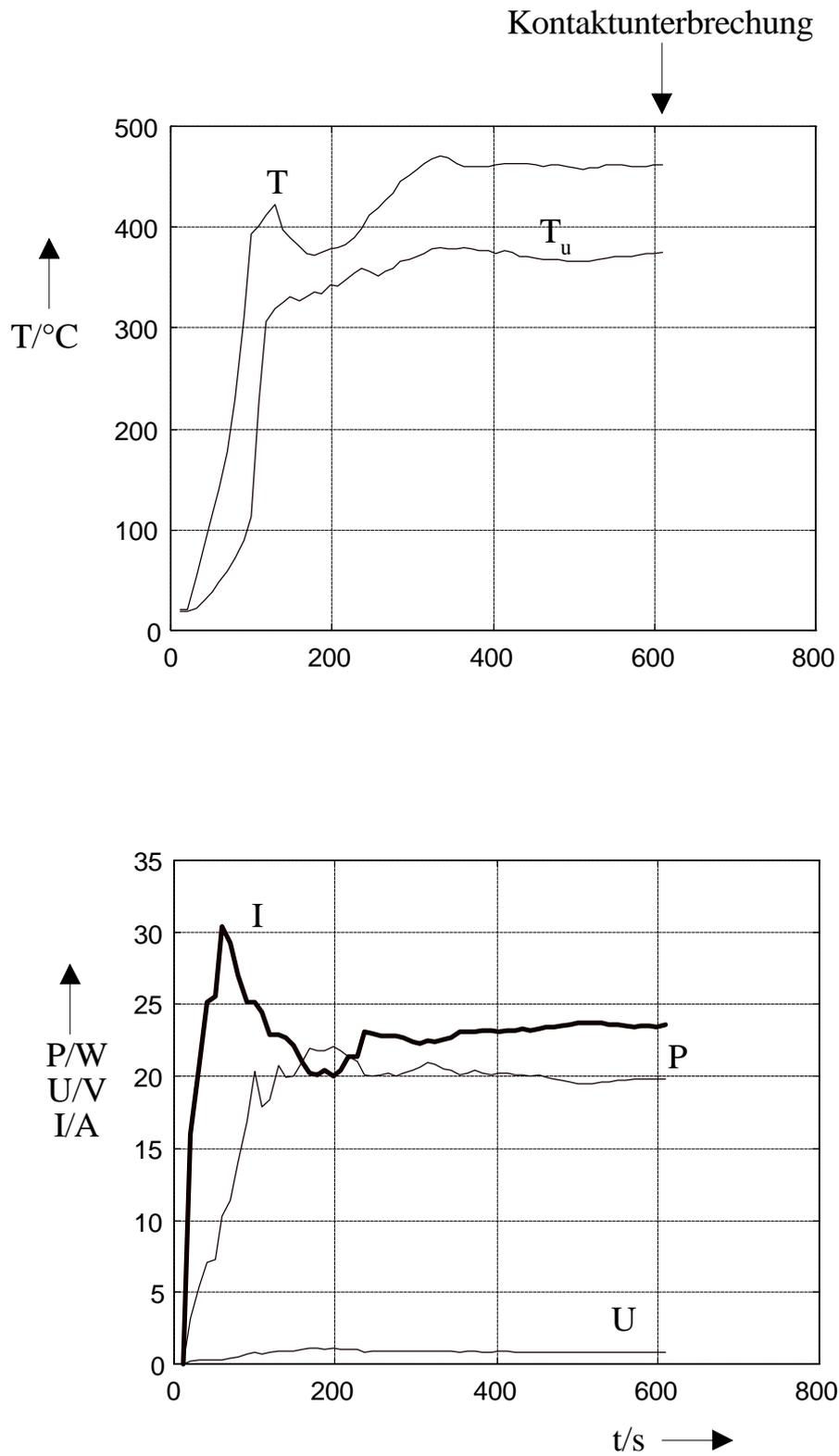


Bild 5.11.3.4: Zündversuch im Ruhezustand bei $I = 30$ A

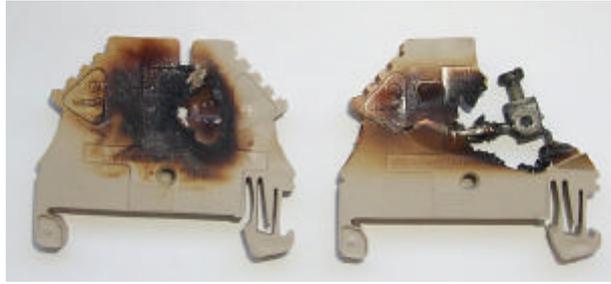


Bild 5.11.3.5: Reihenklemmen nach dem Zündversuch

Dieses Ergebnis zeigt, daß eine Aufrechterhaltung des Kontaktes zu anschließenden Lichtbögen zwischen zwei Klemmen führen kann.

Besonders auffällig ist hier die hohe Verlustleistung $P > 20 \text{ W}$ im Kontakt bei einer Übergangsspannung $U > 1 \text{ V}$, die sonst nur bei der Bildung einer Kupferoxidbrücke bei geringen Strömen zu beobachten war.

5.12 Einflußparameter auf das Erwärmungsverhalten einer Schraubverbindung und Ergebnisse der Untersuchung

Die Untersuchung einer Reihenklemme in Hinsicht auf eine mögliche Brandentstehung zeigt, daß Verbindungen mit verminderter oder oxidierteter Kontaktfläche eine potentielle Zündquelle darstellen. Folglich kann sich der umgebende Kunststoff unter bestimmten Bedingungen entzünden. Bild 5.12 zeigt die kritischen Ursachen (mit ⚠ versehen), durch die ein Brand sehr wahrscheinlich wird.

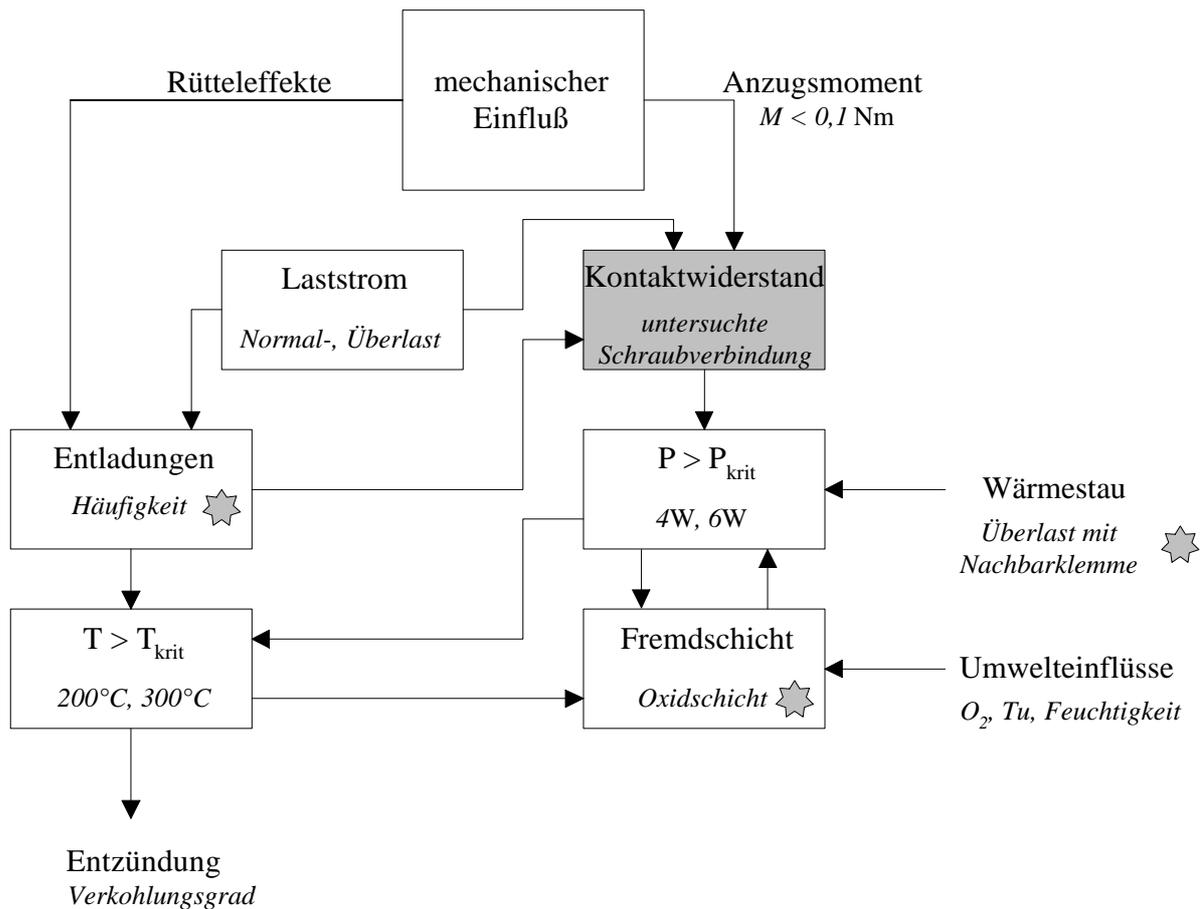


Bild 5.12: Einflußparameter auf das Erwärmungsverhalten einer Schraubverbindung nach Tabelle 5.1

Die Entzündung der Klemmen- oder Kabelisolierung setzt eine Mindestverlustleistung im Kontakt voraus. Das Fließen der beteiligten Kunststoffe bei der untersuchten Reihenklemme wird durch die kritischen Verlustleistungen 4 W bei PVC und 6 W bei Polyamid erreicht. Folgende Feststellungen wurden im Rahmen der Meßbedingungen erzielt:

- Eine Entzündung der Klemme konnte nur durch Einwirkung von Lichtbögen und bei niedrigem Verkohlungsgrad des Kunststoffes erreicht werden.
- Bei Belastung der Klemme mit Strömen unter ihrem Bemessungsstrom kann durch Verminderung des Anzugsdrehmomentes weder die Fließgrenze von PVC noch die von Polyamid erreicht werden, es sei denn, eine Fremd- oder Oxidschicht ist vorher vorhanden.
- Weitere Versuche im lockeren Zustand der Klemme zeigen, daß die gegen Entladungen empfindlichen feinen Drähte in der Kabel-Litze eine höhere Neigung zur Oxidation aufweisen als massive Leiter.

- Ist der Stromfluß nicht in der Lage, die vorhandene Fremdschicht (Oxidschicht) zu zerstören und wird die daraus resultierende Wärme nicht abgeführt, kann die Klemme zu einer potentiellen Zündquelle werden.
- Eine lose Klemme beschleunigt die Bildung von Fremdschichten an der Kontaktstelle.
- Der Stahlbügel begünstigt die Bildung von Kupferoxid.
- Dicke Oxidschichten führen auch bei niedrigen Lastströmen zu Temperaturen, die im Bereich des Schmelzpunktes von Kupfer liegen.
- Bei größerer Anzahl nebeneinander montierter Klemmen wird die kritische Verlustleistung früher erreicht.
- Der zwischen den Kontaktstücken geflossene Kunststoff wirkt elektrisch isolierend.

6 Brandentstehung durch Gasentladungen

Im letzten Kapitel wurde gezeigt, daß die Erwärmung von stromdurchflossenen Kontaktstellen zu Lichtbögen führen kann, die als Zündquellen wirken können. Lichtbögen stehen häufig in direktem Kontakt mit der umgebenden Isolierung und weisen sehr hohe Temperaturen auf.

In der Niederspannungsebene kommt es öfter zu Überschlägen als zu Durchschlägen. So ist die Entstehung von Gasentladungen (siehe Abschnitt 2.2) hauptsächlich auf vorausgehende Isolationsfehler zwischen spannungsführenden Teilen zurückzuführen. Trotz ihrer niedrigeren Energie, können bestimmte Gasentladungsformen langfristig den Isolierstoff beeinträchtigen und anschließend zu Lichtbögen führen.

Die Vielfalt der Möglichkeiten und Bedingungen, unter denen sich Kriechstrecken in Anlagen bilden können, erschwert ihre jeweilige Nachbildung und Untersuchung im Labor. Es soll daher mit Hilfe von einfachen Elektrodenanordnungen das Brandrisiko durch Simulation von Fremdschichten, wie Wasser, Salzlösungen oder organischen Ablagerungen auf dem Isolierstoff (siehe Abschnitt 2.1) beurteilt werden. Entscheidend sind hierbei die Bedingungen, unter denen eine Beanspruchung oder eine mögliche Zündung der eingesetzten Isolierstoffe eingeleitet wird.

6.1 Simulation der Temperaturverteilung innerhalb unterschiedlicher Fremdschichten

6.1.1 Festlegung einer Elektrodenanordnung

Kriechwege entstehen häufig zwischen geerdeten großflächigen Körpern (z.B. Motorgehäuse, Autokarosserie und Leiterbahnen) und spannungsführenden Leitern (Bild 6.1.1.1 zeigt einige Beispiele), selten zwischen zwei Kabeln. Jedes dieser Kabel müßte an der gleichen Stelle einen Isolationsfehler aufweisen.

Die Temperaturverteilung innerhalb einer Fremdschicht wird mit Hilfe einer zylindrischen Elektrodenanordnung nach Bild 6.1.1.2 bestimmt. Der Bereich zwischen Innen- und Außenelektrode ist mit einem bestimmten Fremdschichtmaterial gefüllt.

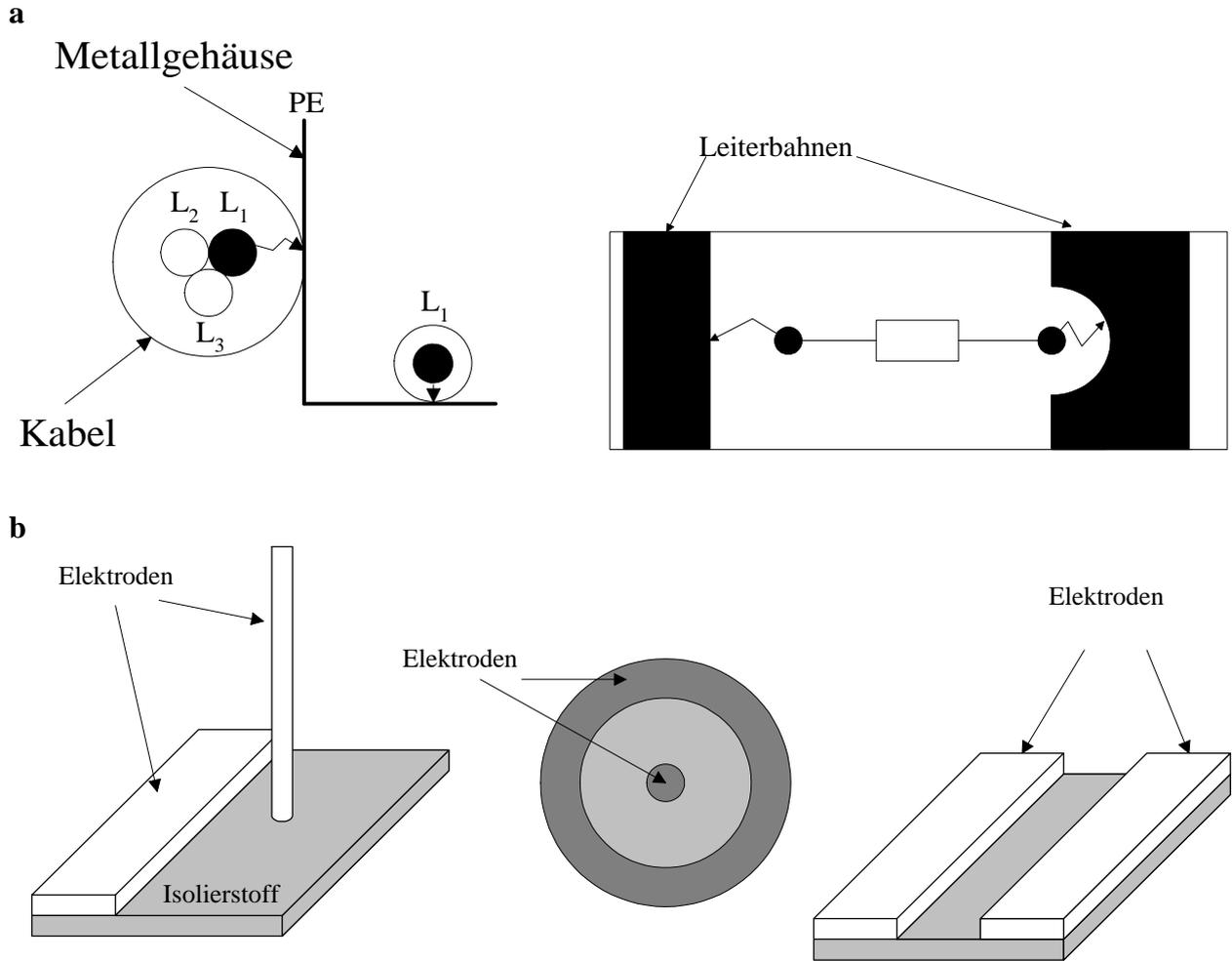


Bild 6.1.1.1: **a** Reale Elektrodenanordnungen: Isolationsfehler zwischen Kabel und Gehäuse und Ausschnitt aus einer gedruckten Schaltung **b** Vereinfachte Modellierung

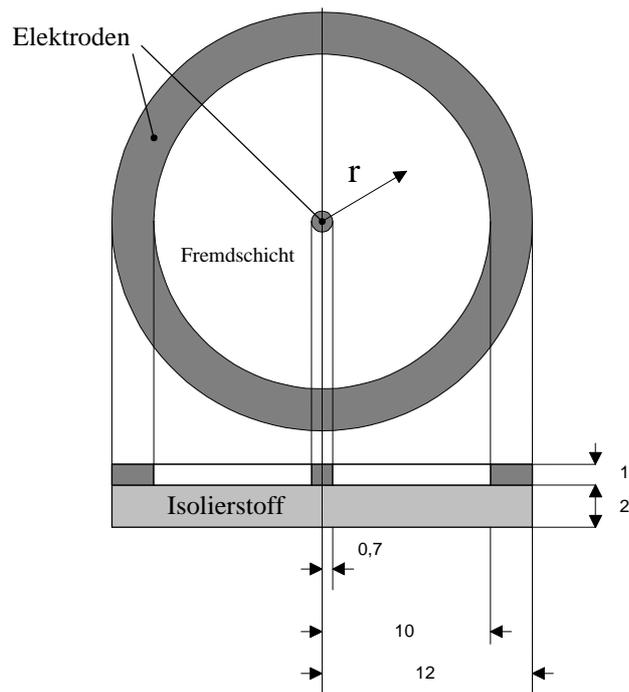


Bild 6.1.1.2: Gewählte Elektrodenanordnung (Maße in mm)

Vernachlässigt man bei flüssigen Fremdschichten exotherme Reaktionen, vor allem im Bereich der Elektroden aufgrund von Elektrolyse- und Oxidationsvorgängen, kann ein dreidimensionales Finite-Elemente-Modell für die numerische Simulation herangezogen werden (Bild 6.1.1.2).

Auf der Oberfläche des Kunststoffes führen Gasentladungen durch leitende flüssige Lösungen zu Kohlenstoffablagerungen. Untersuchungen von verkohlten Isolierstoffoberflächen [18] haben gezeigt, daß bei größeren Kohlenstoff-Ablagerungen Stoffe graphitartiger Struktur und Eigenschaften entstanden sind. Graphit gilt als „organisches Metall“, seine Leitfähigkeit ist 20 bis 100 fach schlechter als die von Kupfer [21]. Für die Simulation der Fremdschichten werden Graphit, eine Natriumchloridlösung (z.B. Anlagen in der Nähe von Salzseen) und destilliertes Wasser (z.B. Regenwasser) gewählt.

Die Stromdichte in der Fremdschicht ist ortsabhängig und beträgt in Abhängigkeit von einem eingepreßten konstanten Strom I und vom Radius r

$$S(r) = \frac{I}{2\pi h} \cdot \frac{1}{r},$$

wobei h die Länge der Anordnung darstellt (1 mm nach Bild 6.1.1.2). Zur Beurteilung der Erwärmung ist die elektrische Leistungsdichte

$$p(r) = \kappa E^2(r) = \frac{S^2(r)}{\kappa} = \frac{I^2}{4\kappa\pi^2 h^2} \cdot \frac{1}{r^2}$$

entscheidend. Sie hängt von der Feldstärke und von der elektrischen Leitfähigkeit κ der Fremdschicht ab. Aufgrund der Abnahme ihres Betrages in Richtung der äußeren Elektrode ist zu erwarten, daß die höchste Beanspruchung der Fremdschicht im Bereich der Innenelektrode stattfindet.

6.1.2 Simulationsergebnisse

Bild 6.1.2.1 zeigt die zeitliche Temperaturentwicklung am Rand der inneren Elektrode (Bild 6.1.1.2) in Abhängigkeit von der angelegten Gleichspannung. Es besteht freie Konvektion mit der Umgebung bei einer Anfangstemperatur von 20°C. Der Wärmeübergangskoeffizient beträgt

$$\alpha = 10 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}.$$

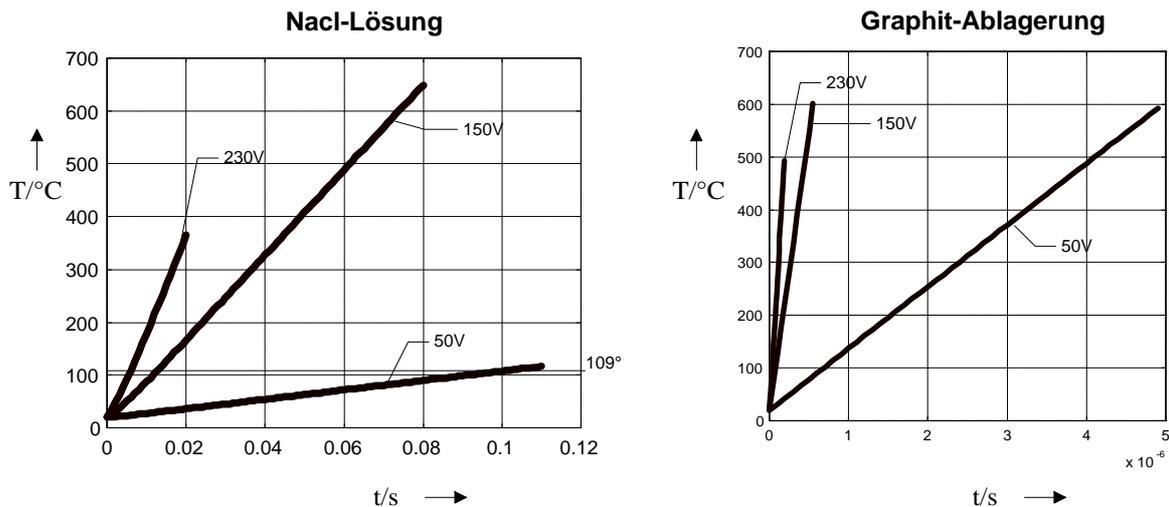


Bild 6.1.2.1: Temperaturentwicklung am Rand der Innenelektrode bei Gleichspannung mit **a** Natriumchloridlösung und **b** Graphit als Fremdschicht zwischen den Elektroden

Dabei sind die Stoffwerte der Fremdschichten temperaturunabhängig (Tabelle TB1 in Anhang B). Dies ist zulässig, weil nur die Temperaturentwicklung bis zum Zersetzungspunkt der Kunststoffe bzw. bis zum Siedepunkt von Elektrolyten bedeutsam ist.

Bleibt die zusätzlich verursachte Wärmemenge durch exotherme Reaktionen (Bildungsenthalpien) an den Elektroden unberücksichtigt, stellt man fest, daß der Siedepunkt der Salzlösung rasch erreicht ist (nach ca. 100 ms bei $U = 50$ V). Damit wird eine schnelle Verdampfung der Lösung erzielt. Die Unterbrechung des Stromflusses wirkt wie ein Schalter, der bei Öffnung eine Gasentladung des Stromkreises auf dem Isolierstoff verursacht.

Graphit hat eine hohe Wärmekapazität aber eine niedrige Wärmeleitfähigkeit. So wird der Zersetzungspunkt der meisten Kunststoffe (Tabelle TA1 in Anhang A) für $U \geq 50$ V nach weniger als $1 \mu\text{s}$ erreicht (Bild 6.1.2.2). Im realen Fall ist aber die kristalline Struktur des Kohlenstoffes, der sich bei Gasentladungen auf der Isolierstoffoberfläche absetzt, nicht identisch mit der des reinen Graphits (Idealfall: ein System kondensierter aromatischer Benzen-Sechsringsysteme). Bei bestimmten Übergangsformen des Kohlenstoffes muß von niedrigeren elektrischen Leitfähigkeiten ausgegangen werden. Ferner wird ein Großteil der erzeugten Kriechstromwärme von der Innenelektrode und vom Kunststoff aufgenommen (Bild 6.1.2.2). Ihre Struktur und Stoffeigenschaften sind für eine günstige Wärmeabfuhr entscheidend.



Bild 6.1.2.2: Temperaturverteilung in $^{\circ}\text{C}$ innerhalb einer Graphitfremdschicht bei $U = 230$ V

Je dünner die Fremdschicht desto kleiner wird der Kriech- oder hier Kurzschlußstrom (Bei 50V: z.B. 72 kA bei einer Dicke von 0,2 mm und 36 kA bei einer Dicke von 0,1mm). Das Brandrisiko wird dadurch jedoch nicht vermindert, da die Kunststoff erwärmung vergleichbar bleibt mit Bild 6.1.2.2.

6.2 Meßtechnische Ermittlung der thermischen Beanspruchung verschmutzter Isolatoroberflächen

In diesem Abschnitt wird gezeigt, daß die höchste Beanspruchung einer Isolatoroberfläche weniger durch Kriechstromwärme, als durch Gasentladungen stattfindet. Zur Beurteilung des Brandrisikos durch Fremdschichten auf Isolatoroberflächen, wurden zahlreiche Versuche durchgeführt. Eine leichte Befeuchtung der Isolatoroberfläche durch eine flüssige Fremdschicht (z.B. mit einem feuchten Tuch) reicht nicht aus, um energiereiche Entladungen zu erzeugen und damit eine Entzündung des Isolierstoffes einzuleiten. Vielmehr sind größere Mengen an wäßrigen Lösungen notwendig. Beim Einsatz von Graphit wird, wie die Simulationsergebnisse zeigen, eine hohe Zersetzung der eingesetzten Kunststoffe erreicht.

6.2.1 Beschreibung der Elektrodenanordnung

Um ein inhomogenes Strömungsfeld zu erzeugen, wurde die in Bild 6.2.1 dargestellte Elektrodenanordnung aus Kupfer gewählt.

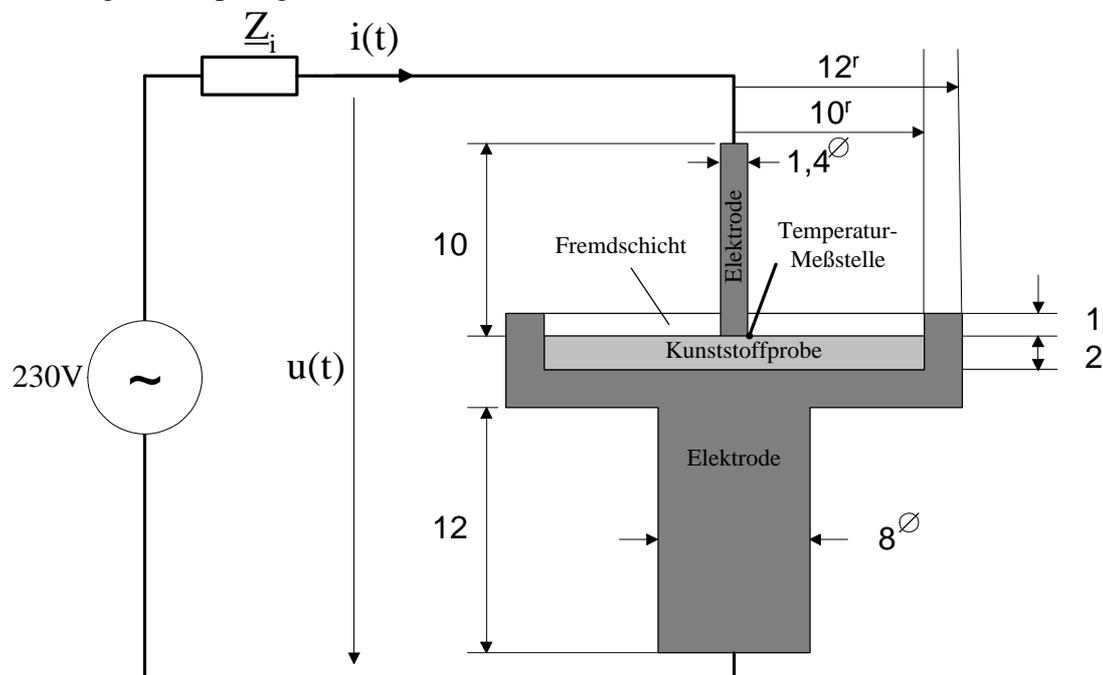


Bild 6.2.1: Schnitt durch die zylindrische Versuchsanordnung (Maße in mm) an einem 230V-Transformatorstrang mit $|\underline{Z}_i| \approx 0,2 \Omega$

Diese besteht aus einer 10 mm langen zylinderförmigen Innenelektrode, die mittig auf eine Isolierstoffprobe gestellt wird. Die scheibenförmige Kunststoffprobe wird von einer tellerförmigen Außenelektrode so umgeben, daß ihr Innenraum zu zwei Dritteln gefüllt ist. Das restliche Drittel ist für die entsprechende Fremdschicht vorgesehen. Deren Oberfläche liegt frei an der Luft. Somit sind beide Elektroden durch die Fremdschicht miteinander elektrisch verbunden.

Durch Anlegen einer variablen Wechselspannung (0-250 V) an die Elektroden soll das Zündpotential einiger Kriechstrecken in Abhängigkeit von der Isolatorart untersucht werden. Hierzu werden die Einflüsse von Kriechstromwärme und von auftretenden Entladungen auf die Isolierstoffe beschrieben. Dabei ist die thermische Beanspruchung der Isolatoroberfläche von Bedeutung. Die Kunststoffproben bestehen aus schwer brennbarem hartem Polyvinylchlorid (PVCh), Polyamid (PA) und aus Polyethylen (PE). Sie werden in der Elektroindustrie häufig eingesetzt.

6.2.2 Destilliertes Wasser als Fremdschicht

Der Raum zwischen Innen- und Außenelektrode wurde mit 0,3 ml destilliertem Wasser gefüllt. Aufgrund der niedrigen Leitfähigkeit der verwendeten Lösung fließt trotz ansteigender Spannung (50-250V) ein niedriger annähernd sinusförmiger Strom, dessen Effektivwert unterhalb von 100mA liegt. Bild 6.2.2.1 zeigt den gemessenen Stromverlauf beim Siedepunkt des Wassers. Eine thermische Beeinflussung der Isolierstoffprobe ist vernachlässigbar.

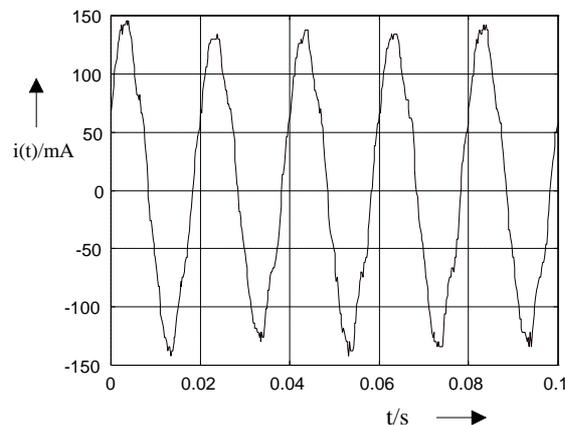


Bild 6.2.2.1: Gemessener Stromverlauf am Siedepunkt des Wassers ($U = 250 \text{ V}$)

Die mit Hilfe eines elektrisch isolierten Thermoelementes¹ gemessene Temperatur in der Nähe der Innenelektrode bestätigt, daß die Stromwärme, unabhängig vom eingelegten Kunststoff, zu keiner Zündung führen kann (Bild 6.2.2.2). Die hohe Stromdichte an der Innenelektrode läßt zunächst die Temperatur ansteigen. Nach einer gewissen Zeit stellt sich ein thermisches Gleichgewicht ein. Die Temperatur bleibt konstant bis das Wasser verdunstet ist. Die Verdunstungsge-

¹ Ni-Cr-Ni

schwindigkeit des Wassers steigt mit der Temperatur und dem Partialdruck direkt an der Fremdschichtoberfläche. Dieser ist beim Sieden mit dem der umgebenden Luft identisch. Auf diese Weise kommt es mit zunehmender Spannung zur schnelleren Austrocknung der Fremdschicht. Es bildet sich auf der Isolierstoffprobe ein grünbräunliches Pulver (Kupferoxid), das sich überwiegend in der Umgebung nahe der Innenelektrode absetzt. Beide Elektroden sind dann mit einer dunklen Schicht bedeckt (oxidiert). Bei destilliertem Wasser kommt es nicht zu Entladungen auf der Isolierstoffoberfläche.

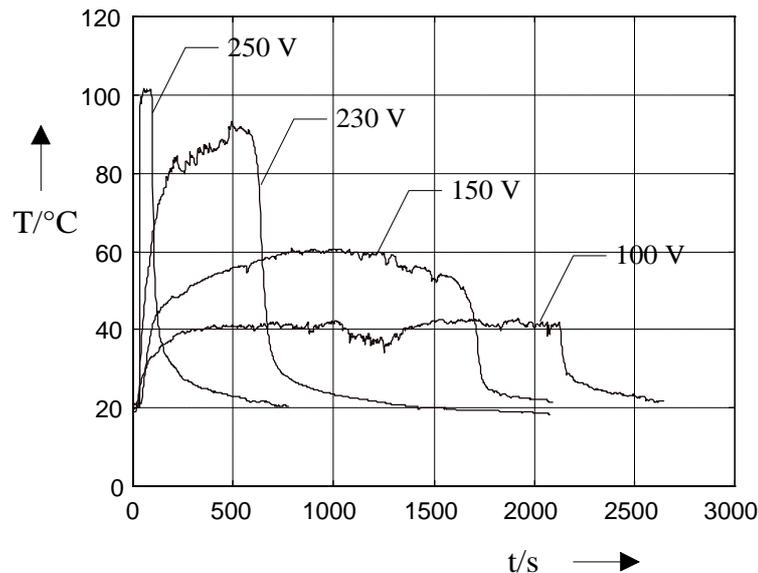


Bild 6.2.2.2: Gemessene Temperaturverläufe an der Innenelektrode bei destilliertem Wasser

6.2.3 Natriumchloridlösung als Fremdschicht

Wie beim destillierten Wasser wird eine 20%-Natriumchloridlösung (250g/1000g) gleichen Volumens (ca. 0,3 ml) als Fremdschicht gewählt. Ein solcher Elektrolyt kann z.B. in Anlagen vorhanden sein, die in der Nähe von Salzseen oder Meeren stehen. Seine Siedetemperatur ist 109°C . Bild 6.2.3.1 zeigt den Temperaturverlauf an der Innenelektrode beim Anlegen einer Spannung von $U = 50\text{ V}$. Die Temperatur steigt zunächst rasch an und überschreitet den Siedepunkt der Lösung. Aufgrund der in diesem Bereich hohen Stromdichte, nimmt die Lösung die Elektrodentemperatur an (siehe Bild 6.1.2.1).

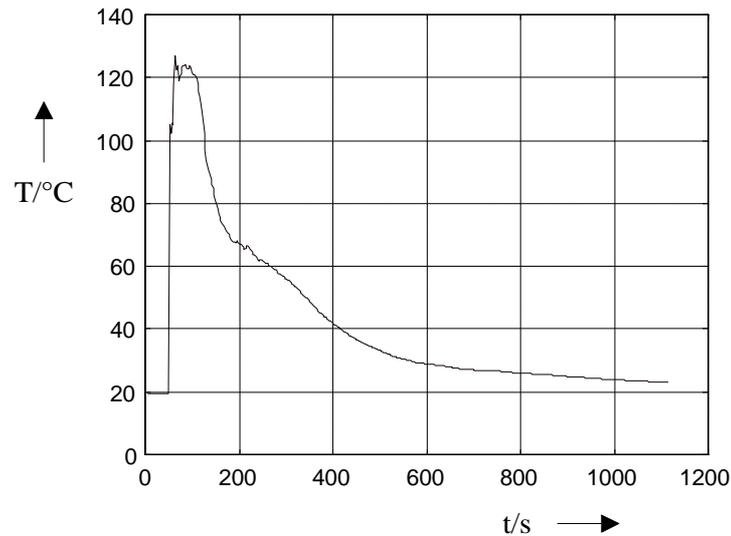


Bild 6.2.3.1: Gemessene Temperatur an der Innenelektrode bei einer 20%-NaCl-Wasserlösung bei $U = 50 \text{ V}$

Während des Verdampfungsprozesses kommt es, wie Bild 6.2.3.2 zeigt, sowohl in der negativen als auch in der positiven Halbwelle des Stromes zu kurzen Stromunterbrechungen: Die sich bildenden Dampfblasen an der Innenelektrode wirken isolierend. Die Stromamplitude steigt allmählich an. Dies ist durch die zunehmende Leitfähigkeit der Natrium-Chlorid-Lösung mit steigender Temperatur zu erklären.

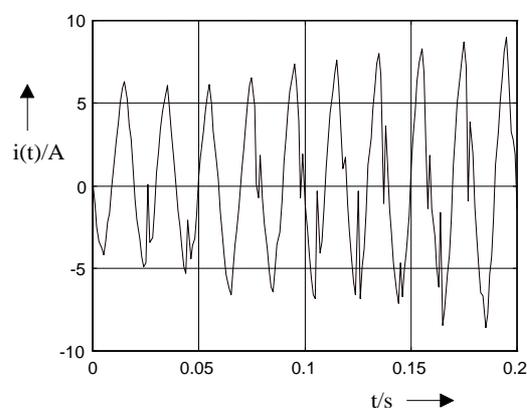


Bild 6.2.3.2: Gemessener Strom kurz nach dem Einschalten bei einer 20%-NaCl-Lösung bei $U=50\text{V}$

Durch die Verdampfung trocknet die Fremdschicht allmählich aus und ihr Widerstand wird größer. Somit nimmt die Stromamplitude, wie Bild 6.2.3.3 zeigt, bis zur völligen Isolation der Innen- von der Außenelektrode wieder ab. Es bildet sich eine dicke grünbraun gefärbte und kegelförmige Salzsicht (Kupferoxid) um die Innenelektrode.

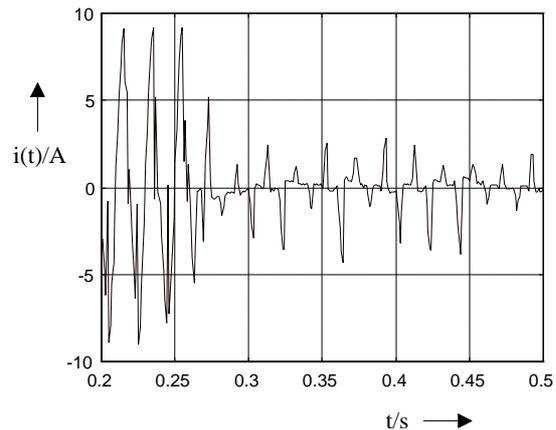


Bild 6.2.3.3: Fortsetzung des Stromverlaufes nach Bild 6.2.3.2

Nach dem Einschalten kommt es gelegentlich zu Entladungen unterschiedlicher Dauer im Bereich der Innenelektrode, die jedoch anschließend in die oben beschriebenen Vorgänge übergehen. Die Dauer sowie die Energie der Entladungen hängen von der Geschwindigkeit und von der Menge der ins Zentrum der Elektrodenanordnung fließenden Lösung ab. Allerdings kann die schnelle zeitliche Entwicklung des Siedevorganges bei höheren Spannungen nicht wie oben beschrieben deutlich verfolgt werden. Dies wird auch durch die Simulationsergebnisse bestätigt (siehe 6.1.2). Häufiger werden *Abreißentladungen* bei höheren Spannungen beobachtet. Dies sind Entladungen, die zwischen dem sich stets neu bildenden Lösungsrand und der Innenelektrode entstehen. In diesem Bereich herrscht ein zufälliges inhomogenes elektrisches Feld. Die Wasserverdampfung in Gebieten höherer Stromdichte löst eine Entladung aus, die flammenartig empor schlägt und eine Höhe bis 10 mm erreichen kann. Der Vorgang wiederholt sich so oft, bis ein Großteil der Fremdschicht verdampft oder weggespritzt ist. Dabei ist eine Rauchgasentwicklung der Isolierstoffprobe zu beobachten.

Die Beeinträchtigung der Isoliereigenschaften der gewählten Isolierstoffproben, die aus Polyamid, Polyvinylchlorid (hart) und Polyethylen bestehen, kann in Abhängigkeit von der angelegten Spannung durch Versuchswiederholung festgestellt werden.

Für jeden Isolierstoff werden fünf Versuche pro angelegte Spannung unter gleichen Bedingungen durchgeführt. Spannungen größer oder gleich 100 V führen oft zu einer sofortigen Stromunterbrechung. Lang andauernde Abreißentladungen in der Umgebung der Innenelektrode werden bei einer Spannung von 230 V nicht beobachtet. Hier entstehen häufig Lichtbögen, an deren Fußpunkten sich Anschmelzungen (einzelne Schmelzperlen) an den Elektroden bilden. Während des Trocknungsvorganges der Fremdschicht erscheinen leuchtende Kreise um die Innenelektrode. Diese werden überwiegend bei Spannungen von 100 und 150 V beobachtet (Tabelle TB2 in Anhang B).

Abreißentladungen durch Wasserdampf der NaCl-Lösung. Abreißentladungen entstehen, wenn das Wasser verdampft und damit den Stromkreis unterbricht. Bild 6.2.3.5 zeigt einen typischen Stromverlauf während einer solchen Phase. Ohne Entladungen verhält sich die

Fremdschicht ohmsch, d.h. der Strom erreicht seinen höchsten Wert bei maximaler Spannung. Der Innenwiderstand der Quelle kann gegenüber dem Fremdschichtwiderstand vernachlässigt werden. Hier erfolgt die Stromunterbrechung nach dem jeweiligen Strommaximum. Anschließend nimmt der Strom etwa exponentiell ab, bis die nächste leitende Phase entsteht.

Ersetzt man die Innenelektrode durch einen mit Polyvinylchlorid isolierten Leiter gleichen Querschnittes, dessen abisoliertes Ende der Höhe der Fremdschicht entspricht, kommt es zur Zersetzung und Verkohlung seiner Isolierung (Bild 6.2.3.4). Dabei wird eine starke Rauchgasentwicklung beobachtet. Eine Entzündung des Kunststoffes ist in diesem Fall möglich. Im Gegensatz hierzu wird die Kunststoffprobe nur mäßig beansprucht. Nach dem Auswaschen der Probe werden kleine runde Vertiefungen im Bereich der Innenelektrode festgestellt. Es handelt sich dabei um verkohlte Stellen, die alle ungefähr den gleichen Durchmesser (bis 0,5 mm) aufweisen.

Trocknet der Bereich um die Innenelektrode durch Lösungsverdampfung aus und fließt keine Lösung mehr ins Zentrum der Isolierstoffprobe, enden die Abreißentladungen. Der Stromkreis wird unterbrochen. Bleibt die Probe jedoch feucht, ist mit den im nächsten Abschnitt beschriebenen Vorgängen zu rechnen.

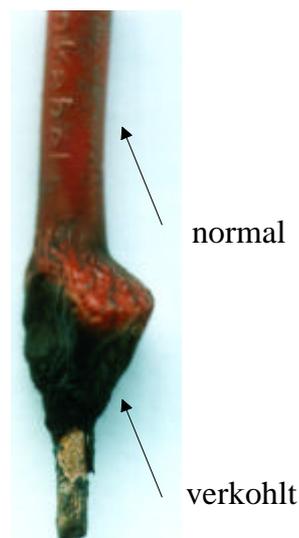


Bild 6.2.3.4: Einfluß der Entladungen auf die Isolierung der Innenelektrode: Verkohlung des Kunststoffes direkt über dem eingetauchten Ende der Innenelektrode

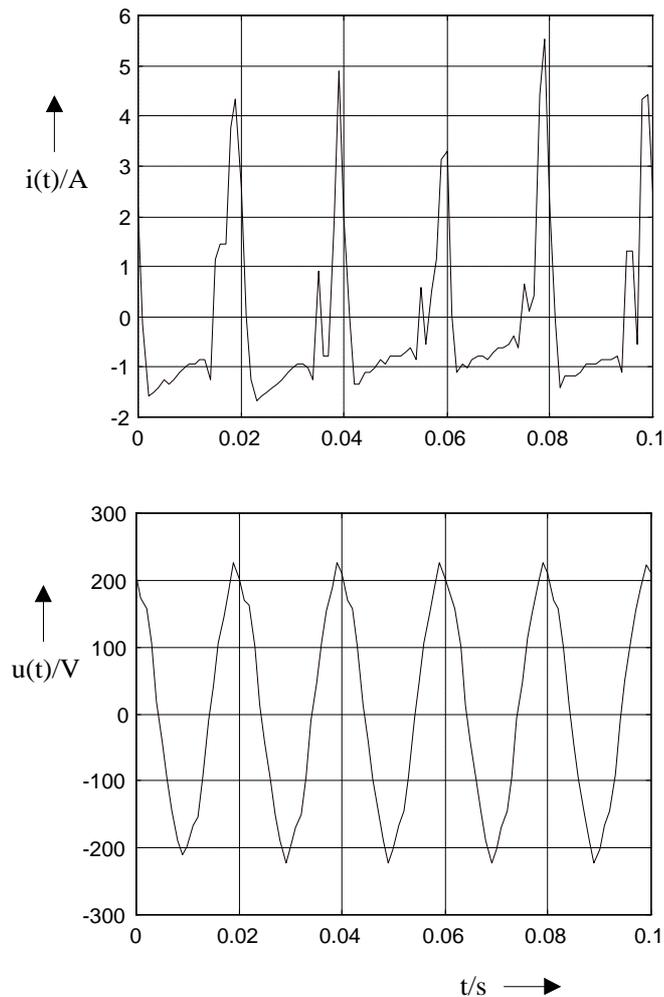


Bild 6.2.3.5: Strom- und Spannungsverlauf während der Abreißentladungen durch Wasserdampf bei $U = 150 \text{ V}$

Leuchterscheinungen auf der Oberfläche der Isolierstoffprobe. Bleibt die Fremdschicht im Bereich der Innenelektrode feucht, entstehen kreisförmige Leuchterscheinungen, die lange andauern können. Es handelt sich hierbei um Entladungen bei geringerem Stromfluß als bei Abreißentladungen durch Wasserdampf. Bild 6.2.3.6 zeigt einen typischen Verlauf von Spannung und Gesamtstrom während einer solchen Phase. Der Strom fließt kurzzeitig und unstetig, aber jeweils direkt nach dem Nulldurchgang der Spannung. Dies bestätigt das kurzzeitige ohmsche Verhalten der Fremdschicht.

Erreicht die Gesamtspannung ihren Nulldurchgang, werden die Entladungen unterbrochen. Ein Teil der Lösung fließt in Richtung Innenelektrode nach und bewirkt einen Stromfluß, der andauert, bis die gesamte leitende Wasserbahn verdunstet oder verdampft ist. Anschließend bilden sich wieder kreisförmig verteilte und leuchtende Entladungen. Der Gesamtstrom wird durch sehr kleine einzelne Entladungsströme gebildet. Die Stromwärme ist nicht brandgefährlich. Dafür ist die Beanspruchung der Kunststoffprobe aufgrund der lang andauernden Entladungen wesentlich höher. Die Rauchgasentwicklung deutet im Vergleich zu den Abreißentladungen (nur oberhalb der Fremdschicht brandgefährlich) auf eine höhere Beanspruchung der Probe hin. Es

bildet sich eine kraterförmige Zone, die unregelmäßig verkohlt ist und deren Größe von der Dauer der Entladungen und der Menge der nachfließenden Flüssigkeit abhängt. Die Zersetzung der Probe ist das Ergebnis und nicht die Ursache der Entladungen. (mögliche Reihenfolgen: Wasserverdampfung → Entladung **oder** Kunststoffwärmung → Zersetzung → Ionisierung → Entladung)

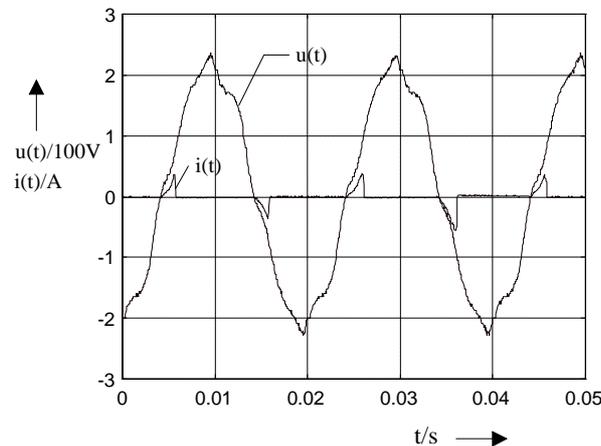


Bild 6.2.3.6: Strom- und Spannungsverlauf während der Leuchterscheinungen bei $U = 150 \text{ V}$:

Der Stromfluß dauert so lange an, bis die gesamte leitende Wasserbahn verdunstet oder verdampft ist

Lichtbögen durch die Salzlösung. Es wurde in den letzten Abschnitten gezeigt, daß die durch die Fremdschicht fließenden Ströme im Bereich 0-150 V nicht ausreichen, um eine Lichtbogenentladung zwischen Innen- und Außenelektrode zu erzeugen.

Durch Anlegen einer Wechselspannung $U = 230 \text{ V}$ an die Elektroden erhält man u.a. die in Bild 6.2.3.7 dargestellten Verläufe für Strom und Spannung. Die Lichtbogenentladungen werden meistens in der Nähe des Spannungsmaximums ausgelöst. Dabei verdampft das Wasser um die Innenelektrode, der Bogen reißt ab und der Strom sinkt auf Null. Die zusätzlich zufällige Verteilung des Lösungsrandes in der Umgebung der Innenelektrode sorgt für eine erhöhte Inhomogenität des elektrischen Feldes. Erreicht die angelegte Spannung jedoch ihr zweites Maximum und befindet sich noch Flüssigkeit in unmittelbarer Nähe der Elektrode, kann ein weiterer Lichtbogen eingeleitet werden. Die abgebildete Entladung dauert etwa eine halbe Netzperiode. Dabei erreicht der Strom ein Maximum von 246 A. Die Lösung wirkt abkühlend auf den Bogen und reduziert folglich seine Brenndauer.

Am Rand jeder Elektrode ist eine Anschmelzung entstanden. Dies zeigt, daß der Schmelzpunkt des Kupfers während der Entladung erreicht wird. Dabei beträgt die mittlere Bogenleistung während der Bogenphase der Dauer $t_B = 6,6 \text{ ms}$

$$P_m = \frac{1}{t_B} \int_0^{t_B} u(t) \cdot i(t) dt \approx 15,1 \text{ kW} .$$

Der thermische Auftrieb und die Kühlung durch die Lösung sowie durch die Luftkonvektion bewirken, daß der Bogen schnell erlischt. Die Probe bleibt trotz der relativ hohen Leistung des Bogens unbeschädigt.

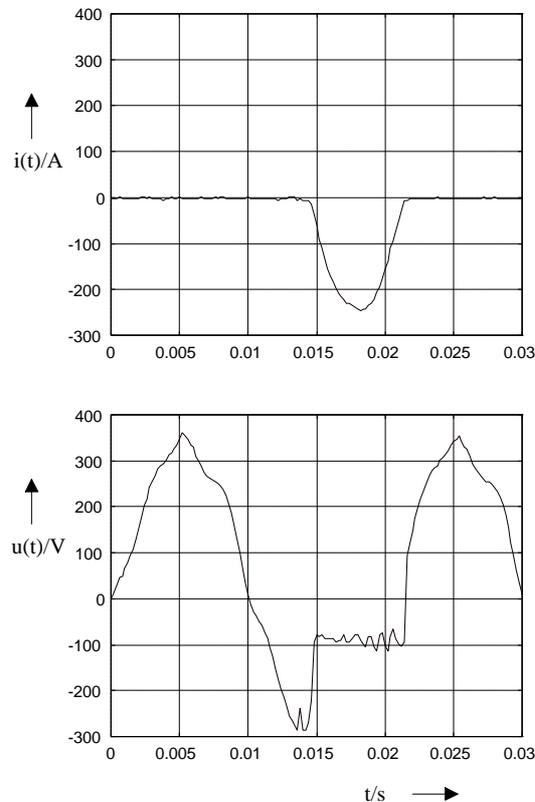
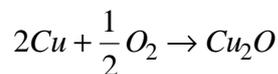


Bild 6.2.3.7: Strom- und Spannungsverlauf bei $U = 230 \text{ V}$: Lichtbogenkurzschluß durch Salzwasser

Bildung von Kupfer(I)-Oxid auf der Isolierstoffoberfläche. Nach den durchgeführten Versuchen wurde die Bildung eines gelbbraunlichen wasserunlöslichen Pulvers auf der Probenoberfläche nachgewiesen. Es nimmt nach einiger Zeit eine grünliche Farbe an. Laut [19] handelt es sich um Kupfer(I)-Oxid Cu_2O , das aus dem Kupfer der Elektrodenoberflächen mit dem elektrolytisch gelieferten Sauerstoff ($\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}^+ + \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2e^-$) nach der chemischen Reaktion



reagiert. Da die Reaktion exotherm abläuft, wird dabei die Reaktionsenthalpie 168,62 kJ/mol sowohl an die Elektrode als auch an die Fremdschicht abgeführt. Ferner bedecken sich die Elektroden sofort mit einer dunklen Kupfer(I)-Oxid-Schicht.

Vergleich zwischen den Isolierstoffproben. In allen Spannungsbereichen ist damit zu rechnen, daß bei geringer Salzlösung eine schnelle Verdampfung eingeleitet wird, die die Innenelektrode von der Fremdschicht elektrisch isoliert.

Kommt es zu einer Entladung zwischen den Elektroden, ist die Bogenleistung im Kurzschlußkreis hoch. Die Bogendauer (hier bei $U = 230 \text{ V}$) reicht jedoch nicht aus, um eine Entzündung der Kunststoffprobe herbeizuführen. Die Flüssigkeit, die umgebende Luft und der Kunststoff wirken kühlend auf den Bogen und vermindern damit seine Brenndauer. Die Wasserverdampfung ist in diesem Spannungsbereich hoch. Bei höheren Spannungen ist von einer schnellen Trocknung oder Verdampfung der flüssigen Fremdschicht auszugehen, was die Wahrscheinlichkeit der Bildung einer kohlenstoffartigen und daher leitenden Schmutzschicht d.h. eines Kunststoffbrandes vermindert.

Die höchste Beanspruchung der Kunststoffproben findet bei Spannungen zwischen 100 und 150V statt. Dabei kommt es zu:

- Abreißentladungen, die sich aufgrund des leitenden Wasserdampfes flammenartig ausbilden. Sie zersetzen die Isolierung der inneren Elektrode viel stärker als die Oberfläche der Probe selbst. Sie dauern länger an, wenn ein Teil der Lösungsmenge gleichmäßig in Richtung Innenelektrode nachfließt. Dort herrscht eine höhere Stromdichte,
- länger anhaltenden kreisförmig verteilten Entladungen, so daß die Oberfläche der Probe zersetzt wird. Dadurch wird die Kohlenstoffablagerung und somit das Brandrisiko erhöht. Außerdem kommt es in diesem Spannungsbereich nicht zu Lichtbögen zwischen Innen- und Außenelektrode. Die am längsten anhaltenden Leuchterscheinungen sind bei PE und PVCh zu beobachten (ca. 45 Min.). Bei PA sind diese nur von kurzer Dauer. Hier bildet sich eine feste ca. 3 mm dicke Salzsicht um die Innenelektrode herum, die wiederum elektrisch isolierend wirkt. PA adsorbiert einen Teil der Lösung. Durch die Stromwärme und die Entladungsenergie wird diese Adsorption beschleunigt. Im Vergleich dazu bleiben die kreisförmig verteilten Entladungen bei PE und PVCh sehr lange erhalten. Die auf der Oberfläche der Probe vorhandene Lösungsmenge ist größer als bei PA. Dadurch kommt es bei PE und PVCh zu einer stärkeren Beanspruchung der Isolierstoffoberfläche.

6.2.4 Graphit als Fremdschicht

Feuchtigkeit kann bei Stromfluß zur Zersetzung und Bildung organischer oder kohlenstoffartiger Schmutzschichten auf der Oberfläche von Isolierstoffen führen (siehe 6.2.3). Bei größeren Kohlenstoff-Ablagerungen entstehen Stoffe graphitartiger Struktur und Eigenschaften (siehe 6.1.1). Der Einfluß von Graphit auf das Erwärmungs- und damit u.a. auf das Zündverhalten eines schwer entflammaren Isolierstoffes wird deshalb näher untersucht. Hierzu wird der Bereich zwischen Innen- und Außenelektrode mit Graphitpulver ausgefüllt. Als Kunststoff wird neben Polyamid und Polyethylen eine Polyvinylchloridprobe nach DIN 16927-PVC-U gewählt. Sie gilt nach DIN 4102 als schwer entflammbar. Nach dem Anlegen der Spannung $U = 230 \text{ V}$ beobachtet man zunächst sehr hell leuchtende Punkte im Bereich der Innenelektrode. Bild 6.2.4.1 zeigt einen

typischen Spannungs- und Stromverlauf, der kurz nach dem Einschalten gemessen wurde. Die Pulverteilchen sind durch Luft getrennt, die die Wärmeabfuhr zwischen ihnen erschwert. Sie zünden sich gegenseitig (oxidieren). Die Anzahl der leuchtenden Punkte auf der Probe steigt Richtung Außenelektrode an. Dabei nimmt jedoch der maximale Strombetrag aufgrund der isolierenden Wirkung der zunehmenden Graphit-Oxidation um die Innenelektrode ab.

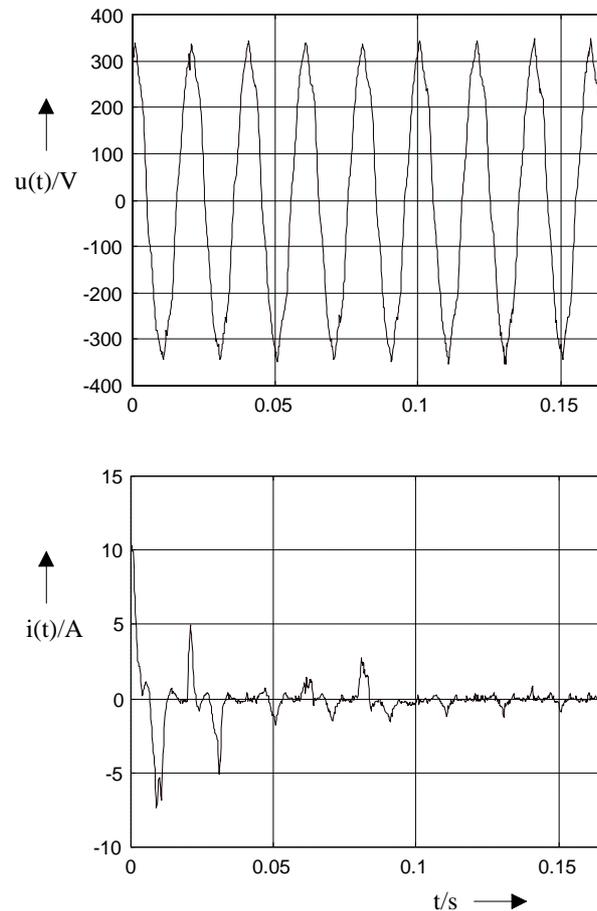


Bild 6.2.4.1: Typischer Strom- und Spannungsverlauf nach dem Einschalten mit Graphit als Fremdschicht bei $U=230\text{ V}$

Er sinkt in den meisten Versuchen (5 Versuche je Kunststoff) auf Werte unter 1 A. Die Leitfähigkeit von Graphit vermindert sich, weil sich die planaren Ebenen seiner atomaren Struktur wellen und aufspalten [21]. Bricht man den Versuch zu diesem Zeitpunkt ab, wird die Innenelektrode mit einer kegelförmigen dicken Rußhülle umgeben. Dies deutet auf eine starke Oxidation des Graphits hin.

Die schwer entflammbare PVCh-Probe entzündet sich bei jedem Versuch. Dabei steht die ganze Oberfläche der Probe in Flammen. Aufgrund des entstandenen Feuers wird die Luft zwischen den Elektroden so weit ionisiert, daß es anschließend zu einer Bogenentladung zwischen dem Tellerboden und der Innenelektrode kommt. Energie und Dauer sind vergleichbar mit den gemessenen Größen in Bild 6.2.3.7. Die Bogenenergie ist ausreichend, um die dünne

Innenelektrode abbrechen und den Kontakt zu unterbrechen. An ihrem Rand bilden sich Anschmelzungen (Schmelzperlen).

Nach dem Auswaschen der Probe zeigt sich, daß die höchste Beanspruchung des Kunststoffes direkt um die Innenelektrode herum stattfindet. Es bildet sich in der Mitte der Probe ein Krater, der auf eine hohe Zersetzung des Kunststoffes hindeutet (Bild 6.2.4.2). Sein Durchmesser beträgt im Mittel ca. 5mm.



Bild 6.2.4.2: PVCh-Probe nach dem Versuch

Auch bei niedrigeren Spannungen (50-150V) ist die Kunststoffbeanspruchung erheblich. Dies bestätigen die in Abschnitt 6.1.2 erhaltenen Simulationsergebnisse. Im Kraterbereich herrschen sehr hohe Temperaturen, die den Kunststoff lokal zersetzen. Der Vorgang verläuft so schnell, daß er keine Temperaturmessung ermöglicht. Bei niedrigeren Spannungen wird jedoch keine Bogenentladung zwischen Innen- und Außenelektrode beobachtet. Nach relativ kurzen Leuchterscheinungen kommt es oft zu einer Stromunterbrechung.

Die durchgeführten Versuche zeigen einerseits, daß ein Kunststoffbrand durch Kohlenstoffablagerungen mit Graphitstruktur eingeleitet werden kann. Auf der anderen Seite ist zu bemerken, daß der anschließende Lichtbogen (bei PVCh) erst durch die Flamme eingeleitet wird und nicht umgekehrt. Der Vorgang bewirkt außerdem die Metallisierung der Probe. Die Wahrscheinlichkeit, daß dabei die stromführenden Leiter (1,5mm²) abbrechen und den Kontakt unterbrechen, ist sehr groß, wie die durchgeführten Versuche gezeigt haben.

Abgesehen vom Einfluß der Feldkräfte, durch die ein Teil der leichten Graphitteilchen aufgewirbelt wird, beobachtet man bei PE nach kurzen Leuchterscheinungen oft eine vollkommene Isolierung der Innenelektrode von der Fremdschicht. Im Gegensatz dazu begünstigt PA und insbesondere PVCh anhaltende Oxidationsvorgänge des Graphitpulvers um die Innenelektrode herum. Obwohl PVCh als schwer brennbar gilt, entflammt es bei jedem Versuch. Bei der PA-Probe wird eine starke Zersetzung mit Rauchgasbildung beobachtet. Gelegentlich

sind Flammen sichtbar, deren Bildung auf die Zündung der Gase in der Zone der Pyrolyse zurückzuführen sind. Der Zersetzungsprozeß endet jedoch im Gegensatz zu PVCh schneller.

6.3 Brandrisiko durch Entladungen zwischen isolierten Kabeln

In den Schadensakten werden Lichtbögen oft als Ursache für Brände angegeben. Sowohl Bogen-dauer als auch -energie bestimmen die Entzündungswahrscheinlichkeit der umgebenden Isolierung. Somit muß die Fehlerstelle sorgfältig auf die Existenz einer ausreichenden Leistung geprüft werden, bevor eine Aussage zur Brandursache getroffen werden kann.

In diesem Abschnitt wird gezeigt, wie sich ein über eine Metallbrücke eingeleiteter Lichtbogen innerhalb verschiedener Kunststoffproben bei einer sinusförmigen Wechselspannung mit dem Effektivwert $U = 230 \text{ V}$ verhält. Damit soll der Fall einer *Bogenentladung zwischen zwei isolierten Kabeln* untersucht werden.

6.3.1 Meßanordnung

Zur Messung der Bogenleistung wird eine Elektrodenanordnung nach Bild 6.3.1.1 gewählt. Sie besteht aus zwei zylindrischen Kupferelektroden mit dem Durchmesser $d = 10 \text{ mm}$. Zwischen ihnen werden Kunststoffproben gleichen Durchmessers und unterschiedlicher Dicke s befestigt. Durch ihre Mitte wird zur Einleitung des Lichtbogens ein dünner Kupferdraht mit dem Durchmesser $0,25 \text{ mm}$ geführt.

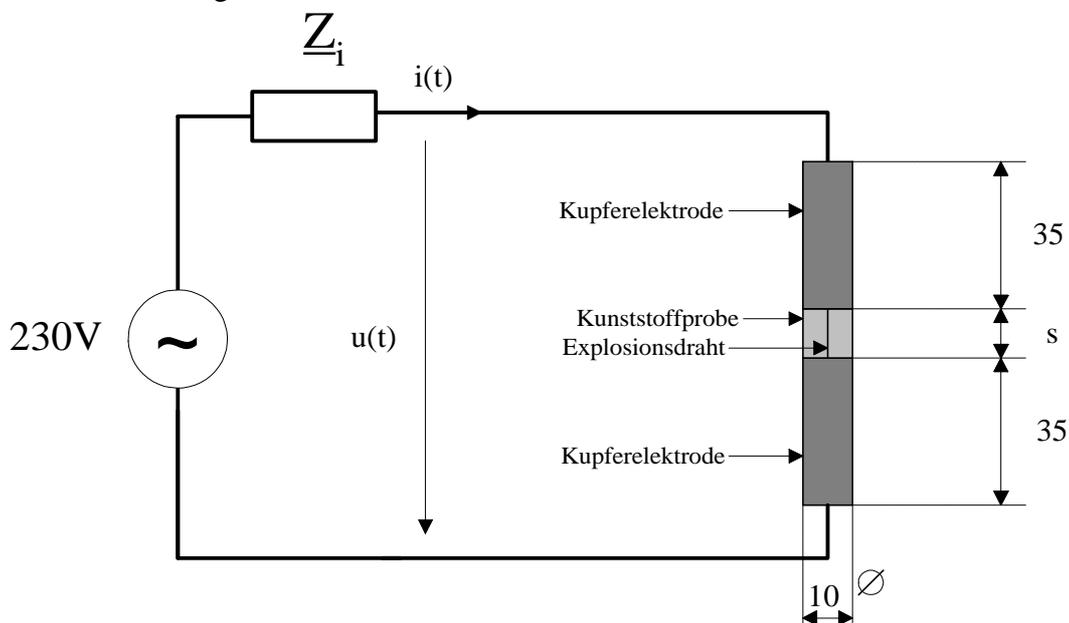


Bild 6.3.1.1: Elektrodenanordnung zur Bogeneinleitung innerhalb von Kunststoffproben (Maße in mm) an einem Transformatorstrang mit $|Z_i| \approx 0,2 \Omega$

Der Stromkreis wird bei jedem Versuch mit Hilfe eines mechanischen Schalters manuell geschlossen. Die Quellenspannung $u(t)$ ist sinusförmig und entspricht der Spannung von einphasi-

gen Hausinstallationen. Ihr Effektivwert beträgt 230 V. Es fließt bei geschlossenem Schalter der Kurzschlußstrom, der nach dem Schmelzen des Drahtes ausschließlich durch die Bogenstrecke und durch den Innenwiderstand der Quelle begrenzt wird.

Zusammensetzung der Proben. Die verwendeten Proben werden in Plattenform von einem Kabelhersteller zur Verfügung gestellt. Die entsprechenden Kunststoffe Polyethylen und Polyvinylchlorid werden bei der Fabrikation von Kabelisolationen für den Spannungsbereich bis 1kV eingesetzt. Die Polyethylenprobe setzt sich aus ca. 2,5% Ruß, 0,3 % Stabilisatoren (zur Hemmung von Oxidationsreaktionen der Kunststoffe in Luft und damit ihrer Alterung z.B. mit Hilfe von Blei- oder Sulfatzusätzen oder Peroxiden) und 97,2% Polyethylen zusammen. Die Polyvinylchloridprobe enthält ca. 41% reines Polyvinylchlorid, 33% Kreide, 21% Weichmacher und 5% Stabilisatoren.

Beschreibung der Bogeneinleitung. Bild 6.3.1.2 zeigt einen Einschaltvorgang bei einer 0,3mm-dicken Polyvinylchloridprobe. Der dünne Kupferdraht schmilzt erst nach ca. 4 ms und verdampft anschließend. Die Bogen Spannung ist bestrebt, sich auf die Quellenspannung einzuschwingen (Bild 6.3.1.2). Dies gelingt erst, nachdem die ausreichend ionisierte Strecke einen Lichtbogen einleitet, der ca. 8ms andauert.

Der Strom erreicht einen Maximalwert von 336 A. Der Versuch wird je Probendicke fünf mal wiederholt.

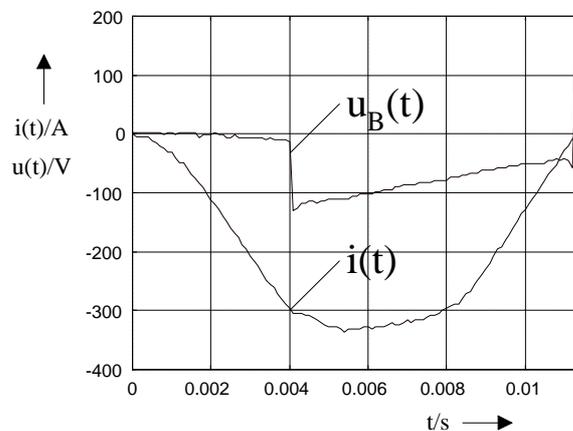


Bild 6.3.1.2: Strom- und Spannungsverlauf während eines Einschaltvorganges bei einer 0,3 mm-dicken PVC-Probe

6.3.2 Versuchsergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Versuche beschrieben.

Beschreibung der Proben nach dem Versuch. Die Entladung zwischen den Elektroden verläuft explosionsartig, wobei die Intensität der Explosion mit zunehmender Probendicke größer

wird. Die schlagartige Temperaturänderung innerhalb der Probe ist die Ursache für die entstehende Druckwelle. Zusätzlich wird diese durch chemische Zersetzung der Kunststoffe in Pyrolysegase verstärkt.

Bild 6.3.2.1 zeigt eine PVC-Probe nach Durchführung des Versuches. Dabei ist festzustellen, daß der Verkohlungsgrad (Kohlenstoff oder Rußablagerung) der Probenoberfläche mit zunehmender Dicke steigt. Dies ist hauptsächlich bei den PVC-Proben zu beobachten und mit der wachsenden Bogenleistung zu begründen. Ferner sind die Oberflächen der Proben nach jedem Versuch metallisiert. Nach den Versuchen mit dünneren Proben stellt man Lichtbogenspuren auf den Elektrodenoberflächen fest, die darauf hindeuten, daß der Bogen z.T. aus der Elektrodenmitte zum Rand gewandert ist. Die Elektroden entziehen dem Bogen im Bereich $s < 2$ mm jedoch eine beträchtliche Leistung. Das geschmolzene Elektrodenmaterial (hier Kupfer) wird durch die Druckwelle z.T. auf die Probe übertragen und bleibt auf ihr haften. Auf diese Art können sich bei ausreichender Kupferablagerung leitende Kriechwege auf dem Kunststoff bilden.

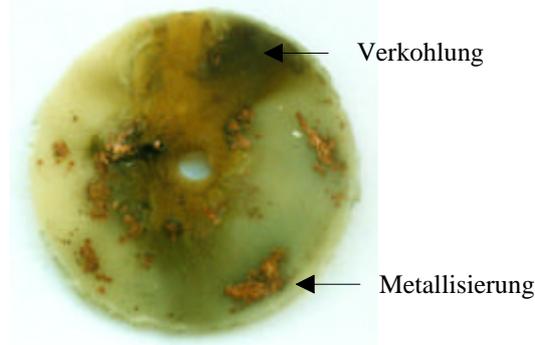


Bild 6.3.2.1: PVC-Probe nach dem Entladungsversuch

Bei allen durchgeführten Versuchen hat sich weder eine Polyethylen- noch eine Polyvinylchlorid-Probe entzündet. Die Bogendauer ist zu kurz und die Energie in dem Spannungsbereich unzureichend, um trotz der merklichen Zersetzung im Bereich der Drahtführung eine Entzündung des Kunststoffes einzuleiten.

Einfluß der Probendicke auf Bogenbrenndauer und Bogenleistung. Die der Kunststoffprobe zugeführte Bogenenergie und ihre Einwirkungsdauer beeinflussen das Zündverhalten des Kunststoffes wesentlich. Bild 6.3.2.2-a zeigt die aus den Messungen ermittelte Bogenleistung in Abhängigkeit von der Probendicke. Jeder Punkt der Kurve entspricht dem Mittelwert aller Leistungen der fünf durchgeführten Versuche, wobei die Leistung nach dem Integral

$$P_B = \frac{1}{t_B} \int_0^{t_B} u(t) \cdot i(t) dt \quad \text{mit } t_B \text{ (ca. 10 ms) als Bogenbrenndauer berechnet wurde.}$$

Anhand von Bild 6.3.2.2 stellt man fest, daß die von der Bogenstrecke an ihre Umgebung abgegebene Leistung mit wachsender Probendicke zunimmt. So ist diese beim Übergang von der Probendicke 0,3 mm zu 4 mm auf das zweifache angestiegen (von 22,16 auf 46,26 kW). Dem Bild 6.3.2.3 ist zu entnehmen, daß dies durch die Vergrößerung der Bogenleistung begründet

ist. Nimmt man an, daß die elektrische Feldstärke E_B innerhalb der Bogenstrecke der Länge l_B stromunabhängig ist, so gilt für die Bogenspannung die Beziehung $u_B \approx E_B l_B$. Sie ist proportional zur Bogenlänge.

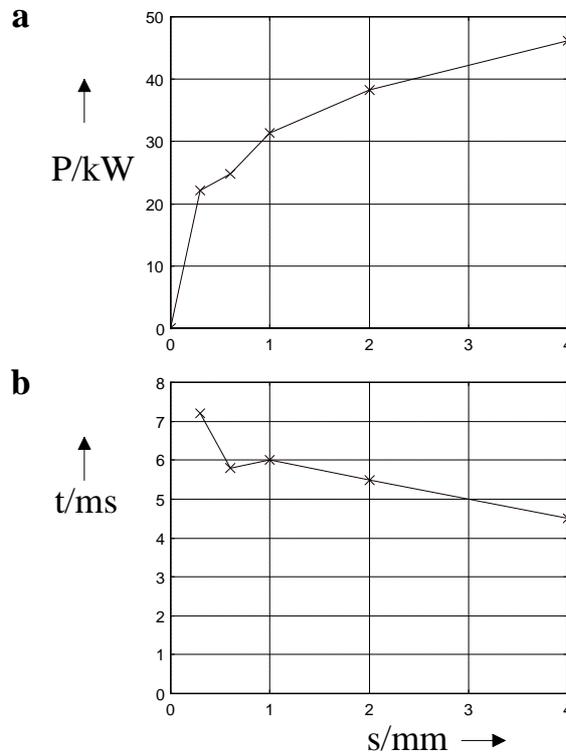


Bild 6.3.2.2: a Bogenleistung und b Bogendauer in Abhängigkeit von der Probendicke s

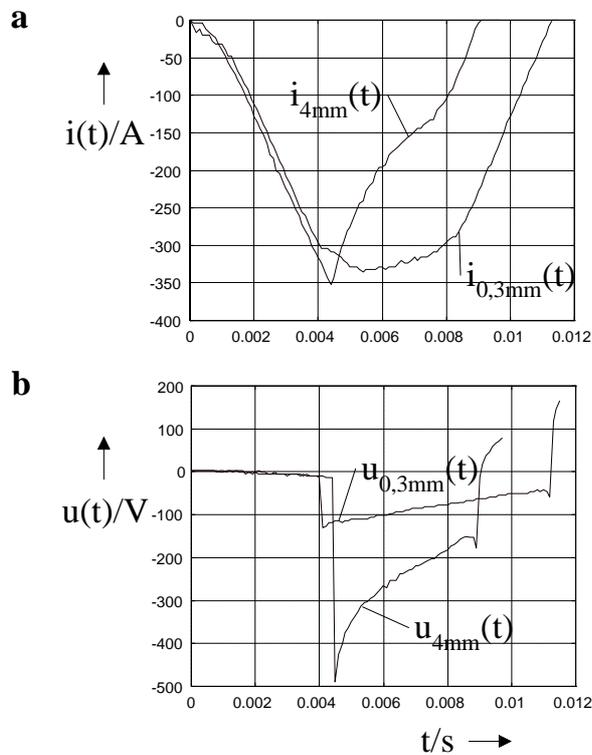


Bild 6.3.2.3: Zeitverläufe der a Bogenströme und b -spannungen bei den Proben $s = 0,3$ mm und $s = 4$ mm

Aufgrund der größeren Bogenlänge erhöht sich die Bogenspannung im Falle der dickeren Proben. Sie überschreitet sogar die Quellenspannung bei $s = 4\text{ mm}$. Dadurch erreicht der Strom den Nulldurchgang früher (Bild 6.3.2.3-a) als bei der Verwendung dünnerer Proben (siehe Abschnitt 2.2). Die Bogenbrenndauer nimmt entsprechend ab (Bild 6.3.2.2-b).

Ersetzt man die 4mm-dicke Probe durch einen 16 A-Leitungsschutzschalter² mit B-Charakteristik (DIN VDE 0641 A4), mißt man an seinen Kontakten ähnliche Zeitverläufe für Strom und Spannung. Der Magnetauslöser des Leitungsschutzschalters reagiert erst, nachdem der Bogen eingeleitet ist. Öffnet der Schalter seine Kontaktstücke, entsteht ein Lichtbogen, der innerhalb von Löschblechen verlängert wird. Die resultierende Bogenspannung am Schalter überschreitet die Quellenspannung und erzwingt damit den schnellen Nulldurchgang des Stromes. Ähnlich wie beim Leitungsschutzschalter wird die Lichtbogenlöschung im Isolierstoff schneller erzielt je länger die Lichtbogenstrecke ist.

Im Gegensatz dazu bleibt der Lichtbogen für eine 16 A-Schmelzsicherung³ der Betriebsklasse gL (DIN VDE 0636 Teil 41) undetektierbar. Diese benötigt laut Kennlinie ca. eine Netzperiode, um den Stromkreis bei einem Fehlerstrom von 200 A von der Spannungsquelle zu trennen.

Entzündung der Proben. Es hat sich keine Polyvinylchlorid- oder Polyethylen-Probe entzündet. Nimmt die Bogenstrecke in der Länge zu, erhöht sich die im Bogen umgesetzte Leistung. Gleichzeitig verkürzt sich jedoch die Bogenbrenndauer. Die im Kunststoff und zwischen den Elektroden umgesetzte Leistung ist sehr hoch. Ihre Einwirkungsdauer ist aufgrund der schnellen Verfestigung der Bogenstrecke aber nicht ausreichend. Außerdem wird die Energie des Bogens sowohl von den Elektroden, die die Bogenwanderung in radialer Richtung begünstigen, als auch von den Proben aufgenommen. Somit wird ein Großteil der erzeugten Wärme zusätzlich durch das Metall abgeführt.

Weitere Versuche mit kleineren Proben zeigen, daß trotz Erhöhung der Bogenleistung gegenüber der Brandlast keine Entzündung des Kunststoffes stattfindet. Man stellt lediglich eine stärkere Verkohlung der Probenoberflächen fest.

Es war im Rahmen der durchgeführten Versuche nicht möglich, eine einzige Probe zu entzünden. Dies bestätigt die Tatsache, daß es sehr schwer ist, längere Kabel in dem untersuchten Spannungsbereich allein durch den Lichtbogen zu entzünden. Somit darf der Lichtbogen nicht immer als primärer Auslöser von Bränden betrachtet werden. Häufig entsteht zuerst eine durch Kriechströme verursachte Flamme, die das Gebiet zwischen den Elektroden soweit ionisiert, daß eine anschließende Entladung stattfindet (Abschnitt 6.2.3). Dazu muß die Fremdschicht eine ausreichende Oxidationswärme liefern.

Es ist anzunehmen, daß es eine bestimmte Kombination aus Bogendauer und Bogenleistung gibt, die die Entzündung der benutzten Proben bewirken kann. Fest steht, daß dies bei kurzen Bogenbrenndauern nur in einem höheren Spannungsbereich möglich sein kann.

² begrenztes Ausschaltvermögen: können Ströme bis 6 kA ausschalten

³ unabhängig vom Nennstrom fast unbegrenztes Ausschaltvermögen: bis $I = 50\text{ kA}$.

Vergleicht man dieses Ergebnis mit den Untersuchungen der Schraubverbindung bei vibrierendem Kabel, zeigt sich, daß der Lichtbogen viel länger anstehen muß, damit eine Entzündung des Kunststoffes wahrscheinlicher wird. In [20] wird berichtet, daß Leistungen im MW-Bereich notwendig sind, um größere Schaltanlagen durch Lichtbogenkurzschlüsse zu entzünden.

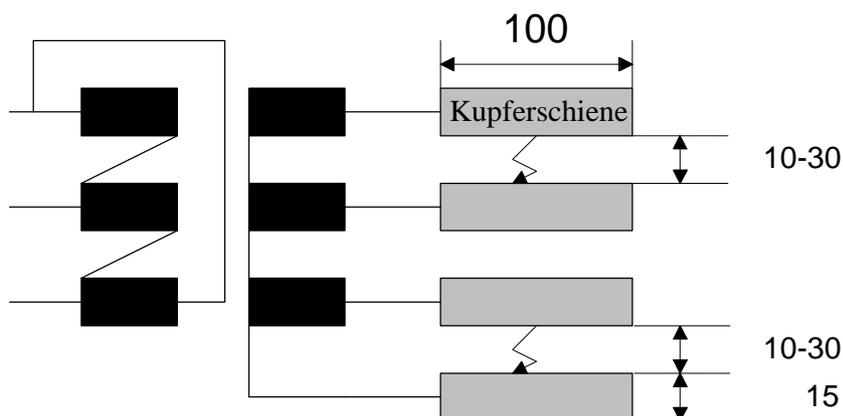
7 Realisierung einer digitalen Lichtbogenerkennung

Da Isolationsfehler in einem Drehstromnetz zwischen einer Phase und geerdeter Masse (z.B. Motorgehäuse) wahrscheinlicher sind als zwischen zwei Phasen, wurden entsprechende Messungen zur Erfassung der Eigenschaften eines künstlich eingeleiteten Lichtbogens durchgeführt. Die *transienten* Gasentladungsversuche in den letzten Abschnitten sowie solche, die an einem unsymmetrisch belasteten Drehstromtransformator 10kV/0,4kV durchgeführt wurden, zeigen, daß die Lichtbogenspannung einen rechteckigen netzfrequenten Spannungsverlauf aufweist. Zu ihrer Erkennung wurde im Rahmen dieser Arbeit eine neuartige, auf einem 16-Bit-Prozessor basierende Abschalteneinrichtung entwickelt.

7.1 Erzeugung des Lichtbogens

Der Lichtbogen wurde auf zwei Arten erzeugt (Bild 7.1):

a



b

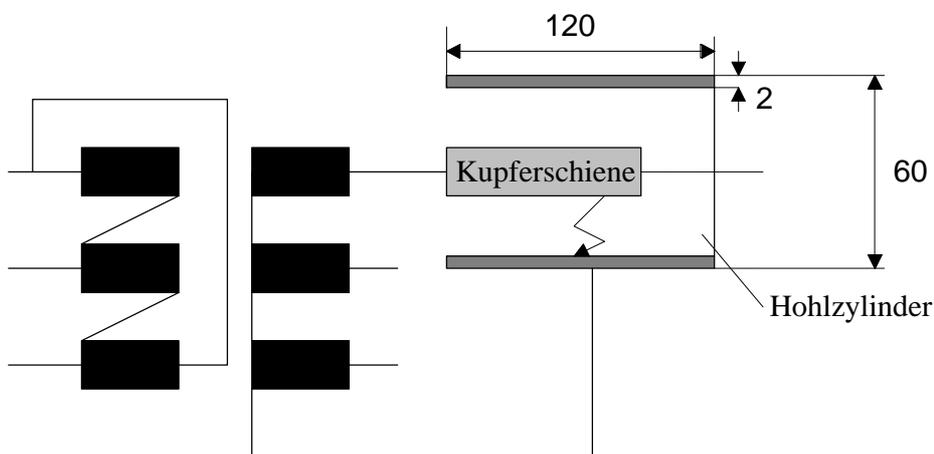


Bild 7.1: Versuchsanordnungen zur Erzeugung des Lichtbogens **a** in Freiluft zwischen den Schienen **b** in einem abgeschlossenen Raum (Maße in mm)

- zwischen zwei Kupferschienen (Sammelschienen) in horizontaler Lage in Freiluft, entsprechend der Anordnung in Verteilungs- und Schaltschränken. Dabei wurde die Spannung zwischen zwei einzelnen Phasen und zwischen Phase und Neutralleiter bei unterschiedlichen Elektrodenabständen (10-30 mm) gemessen.
- zwischen einer Kupferschiene und der Innenwand eines Hohlzylinders aus Kupfer.

In beiden Fällen wurde zur Bogeneinleitung ein Kupferdraht benutzt.

7.1.1 Lichtbögen zwischen Sammelschienen

Aufgrund der höheren Spannung dauert der Lichtbogen zwischen zwei Phasen in Luft länger an (mehrere Netzperioden) als zwischen Phase und Neutralleiter (höchstens 1,5 Netzperioden). Dabei wandert er aufgrund des Eigenmagnetfeldes entlang der Schienen und leitet gelegentlich einen zweiten Lichtbogen mit der dritten Schiene ein. Es entsteht ein zweipoliger Lichtbogen. Trifft der Lichtbogen auf ein Hindernis (z.B. PVC), erlöscht er relativ schnell. Man beobachtet während des Lichtbogens oft glühende Partikel, die sich auf den umgebenden Kunststoffklemmen absetzen und diese lokal zum Verkohlen bringen. Ein Brand wurde nicht festgestellt. Bei Elektrodenabständen von 10 bis 30 mm brannte der Lichtbogen zwischen den Phasen mit einer mittleren Lichtbogenspannung von 150 V.

7.1.2 Lichtbögen zwischen Schiene und Metallzylinder

Aufgrund der Feldinhomogenität und der besseren Erhaltung der durch den Metaldampf ionisierten Luft innerhalb des Hohlzylinders besteht der Lichtbogen zwischen Schiene und Hohlzylinder (Bild 7.1b) länger als zwischen Schiene und Neutralleiter in Freiluft. Es wurden Bogendauern von mehr als 10 Netzperioden festgestellt, was den Übergang zu einem dreipoligen Kurzschluß bewirken kann. Die benutzte Schmelzsicherung des Types gL (NEOZED) mit dem Nennstrom 63 A löst dabei nicht aus¹.

Der Lichtbogen brennt mit einer mittleren Spannung von 100 V bei Elektrodenabständen von 10 bis 30 mm. Da die meisten Fehler zwischen einer Phasenleitung und einem umgebenden Gehäuse entstehen, wurden die Versuche zwischen Schiene und Metallzylinder fortgesetzt.

7.2 Auslösekriterium

Die Messungen nach Bild 7.2.1 zeigen, daß die *direkt* an der Fehlerstelle gemessene Lichtbogenspannung einen nahezu rechteckigen Verlauf aufweist (Bild 7.2.2). Ein ideales Recht-

¹ Diese löst bei einem Strom $I = 300$ A erst nach 5 s aus [32].

eck mit der Amplitude U_B liefert das Betragsspektrum $\frac{4U_B}{\pi k}$ für $k = 1,3,5\dots$, wobei $k = 1$ der Grundwelle entspricht. Der Betrag der dritten Harmonischen kann als Auslösekriterium für eine Abschaltung eines Lichtbogenfehlers herangezogen werden. Streng gesehen muß das Betragsverhältnis der dritten Harmonischen und der Grundwelle $\frac{U_{3\omega}}{U_\omega} = \frac{1}{3}$ betragen. Diese

Aussage reicht jedoch nicht aus, um eine Rechteckfunktion $u(t)$ mit z.B. N Meßwerten sicher zu identifizieren. Es existieren unterschiedliche Zeitverläufe, die ein ähnliches Spektrum aufweisen [40].

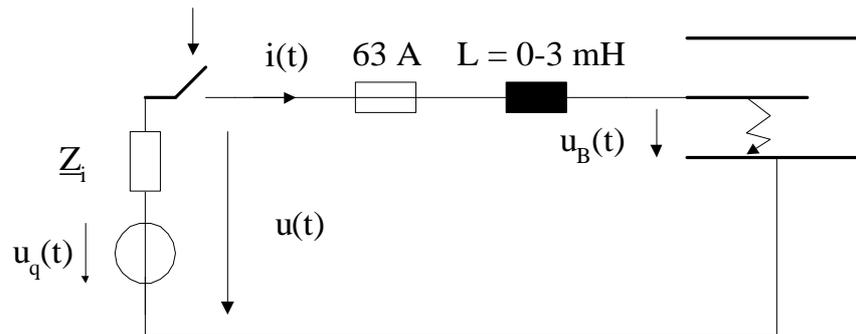


Bild 7.2.1: Ersatzschaltbild mit zugeschalteter Stördrossel

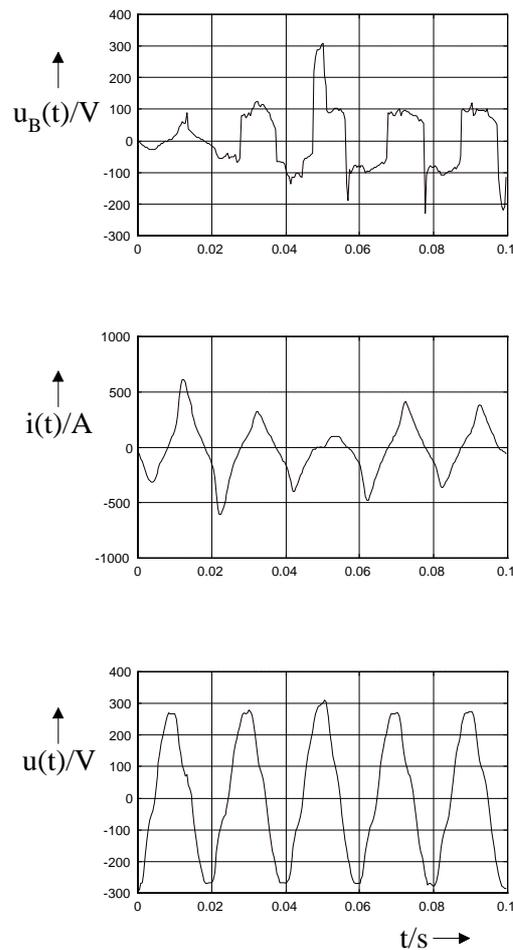


Bild 7.2.2: Gemessene Bogenspannung $u_B(t)$, Strom $i(t)$ und Netzspannung $u(t)$ bei $L = 3\text{mH}$

Die Analyse einer solchen Funktion im Zeitbereich erlaubt daher eine zuverlässigere Erkennung des Fehlers. Es reicht für diesen Zweck aus, wenn der Wert $u_M = u(\frac{N}{4})$ in der Mitte einer halben

Periode als Bezug gewählt wird. Mit den $(\frac{N}{4} - 1)$ abgetasteten Werten vor und nach diesem Wert

kann eine mittlere Betragsabweichung

$$s_M = \frac{\sum_{i=1}^{\frac{N}{2}-1} \left| u\left(\frac{N}{4} + i\right) - u_M \right|}{2 \left(\frac{N}{4} - 1\right)}$$

bestimmt werden, die dann *einen* Grenzwert nicht überschreiten darf, um die charakteristische Schwelle des Rechteckes zu identifizieren (Tabelle 7.2).

Wendet man das Kriterium auf den Spannungsverlauf $u(t) = \hat{u}_\omega \sin\left(\frac{100\pi}{s}t\right) + \hat{u}_{3\omega} \sin\left(\frac{300\pi}{s}t\right)$

an (Worst case), indem einem netzfrequenten Signal eine dritte gleichphasige Harmonische überlagert wird, erhält man die Ergebnisse nach Tabelle 7.2.2. Sie zeigt, daß eine zuverlässige Erkennung eines rechteckförmigen Verlaufes nur in dem grau hervorgehobenen Bereich gegeben ist. Dort ist die relative mittlere Abweichung kleiner oder gleich 23%.

Tabelle 7.2: Mittlere Abweichung und Zeitverlauf von $u(t)$ bei unterschiedlichen Amplitudenverhältnissen der dritten Harmonischen und der Grundwelle

($\hat{u}_\omega = 100 \text{ V}$; beim idealen Rechteck gilt $\frac{\hat{u}_{3\omega}}{\hat{u}_\omega} = \frac{1}{3}$)

$\frac{\hat{u}_{3\omega}}{\hat{u}_\omega}$ in %	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
U_M /V	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
s_M /V	111	97	82	68	54	40	26	14	10	21	34
$\frac{s_M}{U_M}$ in %	-	970	410	227	135	80	43	20	12	23	34
$u(t)$											

Als Abschaltkriterium wurde daher die Bedingung:

- $\frac{s_M}{u_M} < 20\%$

formuliert. Ein weiterer Vorteil gegenüber einer Abschaltung nach einem Frequenzbereichskriterium ist die Auswertung von nur einer Halbwelle, welche die Abschaltung beschleunigt.

7.3 Technische Realisierung

In diesem Abschnitt wird die technische Realisierung der Lichtbogenabschalteinrichtung beschrieben. Im Prinzip läßt sich diese sowohl analog als auch digital-elektronisch aufbauen. Eine digitale Realisierung weist den Nachteil einer notwendigen Zeit- und Wertediskretisierung auf, bringt jedoch viele Vorteile wie

- hohe Flexibilität der Algorithmen durch Austausch von Software- oder Hardwarekomponenten,
- einfacher Einbau in Bussysteme zur Fernsteuerung und -überwachung und
- nachträgliche Fehlerdiagnose durch Speicherung der erfaßten Werte, die für eine Brandursachenforschung unerlässlich sind.

Aufgrund dieser Vorteile wird eine digitale Realisierung des bereits vorgestellten Algorithmus implementiert.

7.3.1 Beschreibung des Lichtbogenschutzes

Bild 7.3.1 zeigt ein Blockschaltbild der modular aufgebauten Lichtbogenabschaltvorrichtung [26]. Die Vorrichtung ist in der Lage, für jede Netzform eines Drehstromsystems nach VDE 0100, alle zu erwartenden Lichtbogenfehler zwischen zwei beliebigen Phasen oder zwischen Phase und Neutral- bzw. Schutzleiter zu detektieren.

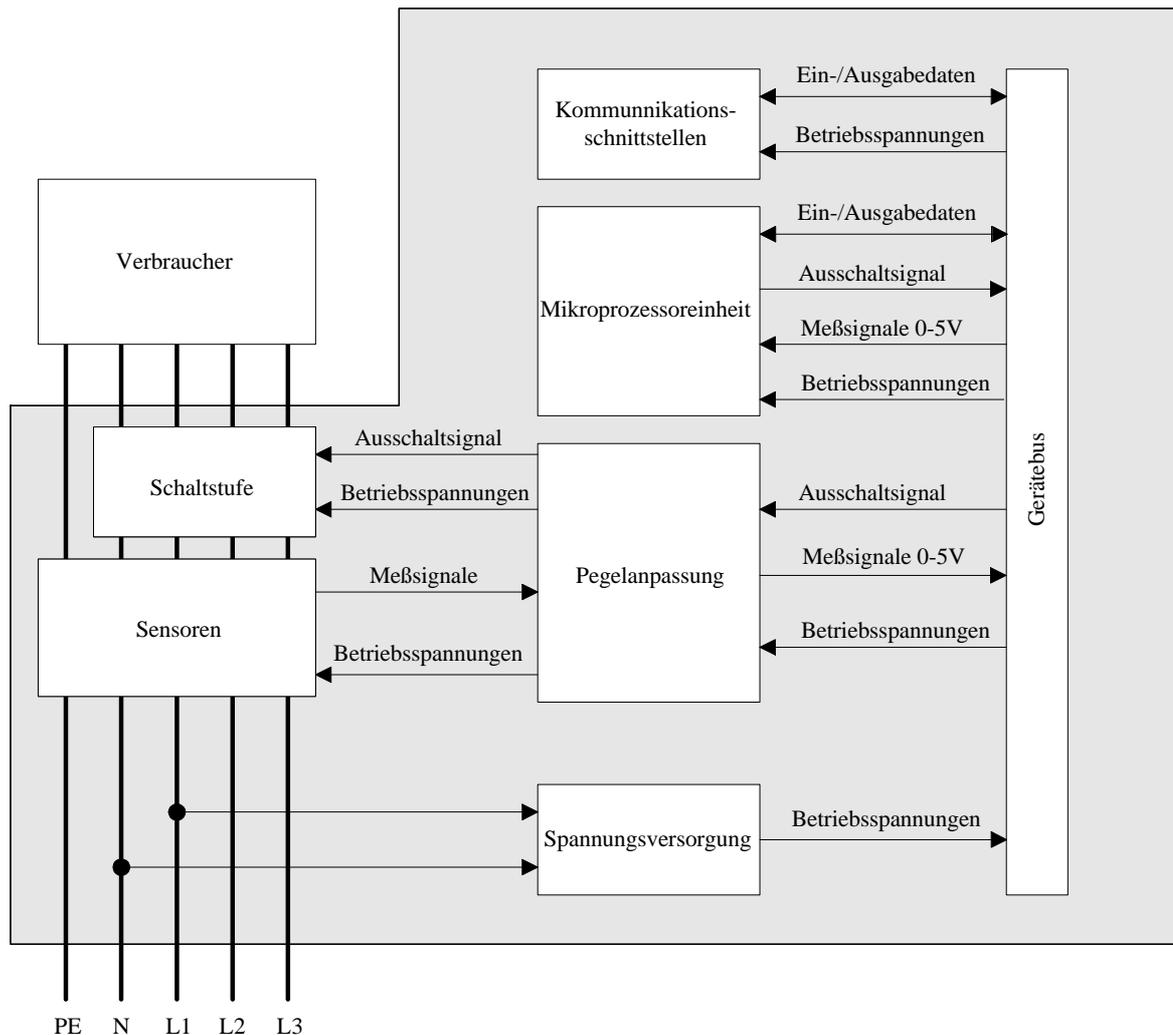


Bild 7.3.1: Blockschaltbild des Lichtbogenschutzes

Die einzelnen Module haben folgende Funktionen:

- Die Spannungsversorgung für alle Komponenten der Schaltung wird über eine Phase bezogen. Im Fehlerfall werden die Daten mit Hilfe einer Batterie aufrechterhalten.
- Der Gerätebus verbindet die einzelnen Module über Steckplätze miteinander.
- Eine Pegelanpassung der gemessenen Signale an die Analog-Digitalwandlung (mit 10 Bit-Auflösung) der Mikroprozessoreinheit ist vorgesehen.
- Ein 16 Bit-Prozessor C167CR-LM der Firma Siemens wurde eingesetzt. Bei einer Taktrate von 20 MHz dauert die Bearbeitung eines Befehls ca. 100 ns.
- Die Kommunikationsschnittstellen zur Datenein- und -ausgabe bestehen aus Tastatur, Display, serieller und CAN-Schnittstelle.

7.3.2 Schaltversuche und Grenzen des Lichtbogenschutzes

Das Ansprechen des realisierten Lichtbogenschutzes setzt voraus, daß der Isolationsfehler eine vom Schutz erfassbare Lichtbogen Spannung verursacht, die eine netzfrequente Rechteckform hat. Die Impedanz von Leitungen und Transformatoren bis zum Fehlerort beeinflusst die Detektierungsfähigkeit der Abschalt einrichtung wesentlich. Durch die Überlagerung sinusförmiger Spannungsanteile der Zuleitungen zwischen Schutzorgan und Fehlerort kommt es zur Verfälschung der tatsächlichen Lichtbogen Spannung. Zu diesem Zweck wurden ihre Ansprechgrenzen mit Hilfe einer Lastimpedanz, die als Störimpedanz zwischen Netz und Verbraucher geschaltet wird (Bild 7.3.2.1), untersucht.

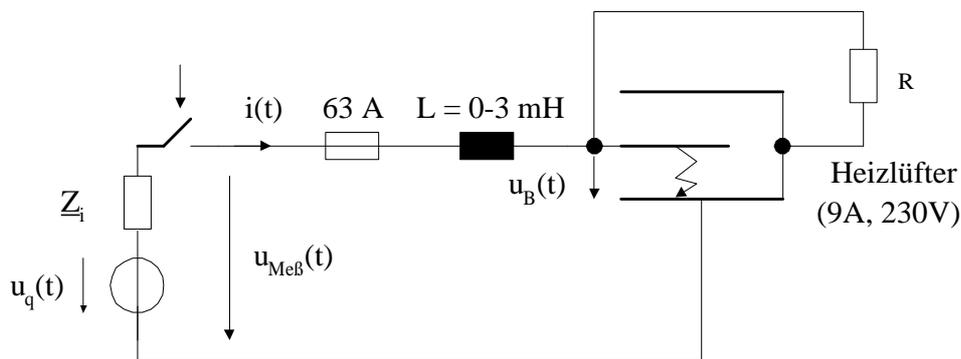


Bild 7.3.2.1: Kurzschluß eines Stranges mit ohmschem Verbraucher

Die Auswertung einer halben Periode bei einer Abtastfrequenz von 6,4 kHz dauert ca. 1 ms. Damit werden alle möglichen Spannungen des Drehstromnetzes in weniger als einer halben Netzperiode auf Fehler überprüft.

Die gemessene mittlere Abweichung der Netzspannung im Fall $L = 3\text{ mH}$ zeigt, daß eine Detektierung des Fehlers hier nicht mehr möglich ist (Tabelle 7.3.2). Dagegen bleibt die Erkennungsfähigkeit der Einrichtung unbeeinträchtigt, wenn dieser keine größere Störinduktivität als $L = 1\text{ mH}$ im Stromkreis nachgeschaltet wird.

Gebräuchliche Leitungen und Kabel in der Netzversorgung haben Induktivitätswerte von ca. $1\text{ }\mu\text{H/m}$, so daß eine zuverlässige Erkennung eines Lichtbogenfehlers bis zu 1 km Leitungslänge (bei reiner Leitungsstörung) gegeben ist. Da die Netzimpedanz (oder hier Induktivität) ab dem Verknüpfungspunkt mehrerer Stromabnehmer bis zur Steckdose (Bild 7.3.2.2) meist unter diesen Werten liegt, ist auch beim Betrieb der Abschalt einrichtung direkt vor Gleichrichtern keine Fehl auslösung zu erwarten.

Setzt man außerdem voraus, daß die Kurvenform der Netzwechselfspannung die Mindestanforderungen nach VDE 0160, Teil 2 erfüllt (Begrenzung der Spannungsüberschwingungen und der Kurzzeiteinbrüche aufgrund z.B. der Kommutierung an einem Stromrichter), sind Fehl abschaltungen des Lichtbogenschutzes ausgeschlossen.

Tabelle 7.3.2: Zur Anwendung des Abschaltkriteriums

Meßschaltung (Kurzschluß einer Transformatorphase) nach Bild 7.3.2	Netzspannung Normalbetrieb (Strangspannung)	Spannung direkt am Lichtbogen $L = 0 \text{ mH}$	Netzspannung bei Bogenfehler für $L = 1 \text{ mH}$	Netzspannung bei Bogenfehler für $L = 3 \text{ mH}$
$\frac{\hat{U}_{3\omega}}{\hat{U}_{\omega}}$ in %	2	37	18	8
U_M / V	342	62	178	266
s_M / V	111	7	28	91
$\frac{s_M}{U_M}$ in %	32	11	16	34
$u_{\text{Meß}}(t) / \text{V}$				
Betragspektrum von $u_{\text{Meß}}(t) / \text{V}$				

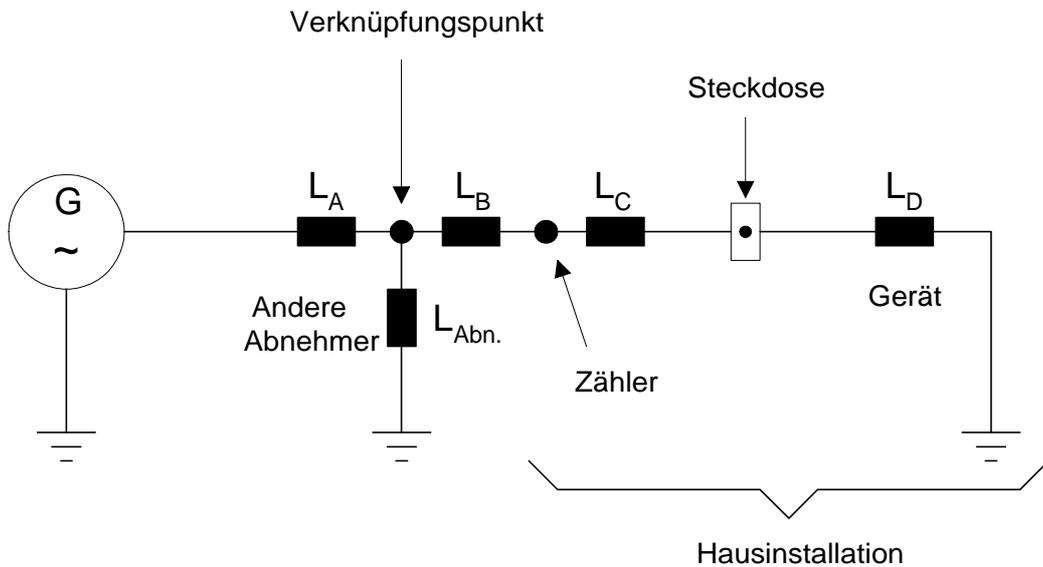


Bild 7.3.2.2: Zum Betrieb der Lichtbogenschutzeinrichtung vor einem Gerät an einer Steckdose

8 Zusammenfassung

Diese Arbeit leistet einen Beitrag zur systematischen Analyse von elektrisch verursachten Bränden, die durch fehlerhafte Kontakte oder Isolationsfehler in der Niederspannungstechnik entstehen können. Es wird gezeigt, daß solche Brände durch die genannten Ursachen begründet werden können.

Die erhaltenen Ergebnisse erlauben einen Einblick in die Vorgänge, die eine Entzündung ermöglichen können.

Basierend auf Daten einer Versicherung von 1993-1998 werden die häufigsten Brandursachen festgestellt und untersucht.

Es wird eine theoretische und meßtechnische Analyse der Brandgefahr in einer häufig angewendeten Schraubverbindung und durch Isolationsfehler durchgeführt.

In der Literatur ist die elektrotechnische Brandforschung bisher nur wenig behandelt worden. Dies liegt z.T. daran, daß die Branddatenqualität in technischer Hinsicht nicht zufriedenstellend ist. Es wird daher eine Software entwickelt und vorgestellt, die eine bessere und automatische Auswertung erlaubt.

Der Grund für die detaillierte Untersuchung einer Schraubverbindung liegt in ihrer häufigen Anwendung. Nach abnehmendem Brandrisiko gelten folgende Vorgänge für den untersuchten Schraubkontakt als brandgefährlich:

- Anhaltende Vibrationen bei großer Schwingamplitude
- Kurzzeitige Vibrationen bei kleiner Schwingamplitude
- Stromüberlast bei kleiner Kontaktfläche und Wärmestau
- Stromüberlast bei kleiner Kontaktfläche ohne Wärmestau

Das Brandrisiko von Kriechströmen und Gasentladungen oberhalb von Isolierstoffoberflächen wird mit Hilfe von geeigneten Elektrodenanordnungen untersucht. Klassifiziert man die Vorgänge nach absteigender Brandgefahr, erhält man:

- Kriechstromwärme in Kohlenstoff-Ablagerungen
- Lichtbögen zwischen Phase und Gehäuse
- Lichtbögen zwischen Kabeln
- Kriechstromwärme in flüssigen Fremdschichten

Messungen an Sammelschienen-Modellen am Drehstromnetz ergaben, daß Lichtbögen zwischen Schiene (Phase) und nachgebildetem Gehäuse aus Kupfer (Masse), aufgrund der besser erhaltenen Ionisation, *länger andauern* als zwischen Schienen, wodurch die Brandwahrscheinlichkeit wesentlich erhöht wird. Dabei weist die gemessene Spannung am Lichtbogen einen rechteckigen Verlauf auf. Letzterer wurde als Kriterium für die Abschaltung mit Hilfe einer realisierten digitalen Lichtbogen-Abschalteinrichtung verwendet.

Literaturverzeichnis

- [1] Ragnar, Holm: Electric contacts, Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1967
- [2] Walczuk, E.: Über die Kontaktspannung von geschlossenen Kontakten; elektrische Kontakte, S. 353-358; Berlin: Akademie-Verlag 1980
- [3] Decker, Karl-Heinz : Maschinenelemente, Gestaltung und Berechnung, Carl Hanser Verlag München, Wien, 1985
- [4] Paland, Ernst-Günter: Technisches Taschenbuch, INA Wälzlager Schaeffler KG, März 1994 (Hannover)
- [5] Dietrich, B.: Zum Verhalten geschlossener Kontaktstücke mit Fremdschichten bei Stromfluß, technische Universität Braunschweig, 1973
- [6] Sletbak, J.; Kristensen, R.; Sundklakk, H.: Glowing contact areas in loose copper wire connections, Norwegian Institute of Technology, N-7034 Trondheim, Norway, 1991
- [7] Kloeppe, W.; Fiedler, H.: Kurzschluß in elektrischen Anlagen und Netzen, VEB-Verlag Technik Berlin, 1965
- [8] Burkhard, G.: Schaltgeräte der Elektroenergie-technik, VDE-Verlag GmbH Berlin, Offenbach, 1985
- [9] Rieder, W.: Plasma und Lichtbogen, Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1967
- [10] Koch, B.: Grundlagen des Wärmeaustausches, Verlag Beucke, Dissen 1950
- [11] Flosdorff, R.; Hilgarth, G.: Elektrische Energieversorgung, B. G. Teubner Stuttgart, 1986
- [12] Pal, G.; Macskasy, H.: Plastics, their behaviour in fires, Studies in Polymer Science 6, Elsevier, 1991
- [13] Hilado, C. J.: Physical aspects of the flammability evaluation of polymers, Journal of Plastics, 7, 181 (1971)
- [14] Schmidt, Friedemann: Brandschutz in der Elektroinstallation, Verlag Technik Berlin, 1996

- [15] Keil, A.; Merl, W. A.; Vinaricky, E.: Elektrische Kontakte und ihre Werkstoffe, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo 1984
- [16] Lohr, J.: Brandentstehung durch die Elektroinstallation, Studienarbeit am Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Meßtechnik der Universität Hannover 1994, unveröffentlicht
- [17] Holzmann, W.: Lehr- und Studienbriefe Kriminalistik, Brandermittlung, Verlag Deutsche Polizeiliteratur (und persönliches Interview), 1992
- [18] Campbell, F. J.: Naval research laboratory Washington, D.C. 1984: Flashover failures from wet-wire arcing and tracking
- [19] Stimper, K.; Sachsenweger, C.: Beeinflussung der Kriechwegbildung bei Niederspannung durch Kupferelektroden, Archiv für Elektrotechnik 71 (1988) 179-186
- [20] Kaltenborn, U.; König, D.: Brandentstehung durch Störlichtbögen in elektrischen Anlagen, Technische Überwachung TÜ 10/96, 30-33, VDI-Verlag
- [21] Bindl, M.: Graphit und „leitende Polymere“, eine elektrochemische Untersuchung ihrer ionischen und kovalenten Oxidationsprodukte, Technische Universität München, Dissertation, 1986
- [22] VDI-Wärmeatlas: Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, VDI-Verlag, 7. erweiterte Auflage, 1994
- [23] Ullrich, H. J., Nitzsche K.: Funktionswerkstoffe der Elektrotechnik und Elektronik, Auflage, 1993
- [24] Hamann, K., Vielstich, W.: Elektrochemie, 3. Auflage, 1998
- [25] Schneider, B.: Erstellung eines Software-Programmes zur Erfassung von Bränden mit elektrischer Ursache, Diplomarbeit am Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Meßtechnik 1999, unveröffentlicht
- [26] Beinke, P.: Aufbau und Test der Meß- und Schaltelektronik einer Lichtbogenabschalteinrichtung für Niederspannungsnetze, Diplomarbeit am Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Meßtechnik 1999, unveröffentlicht

- [27] Bloem, J.: Discussion of some optical and electrical properties of Cu_2O , Philips Res. Repts 13, 167-193, 1957
- [28] Stütz, D.: Polymer Combustion: J. Polym. Sci. Polym. Chem. Ed., 13, 585 (1975)
- [29] Johnson, P.: A general correlation of the flammability of natural and synthetic polymers: J. Appl. Polym. Sci., 18, 491 (1974)
- [30] Troitzsch, J.: Brandverhalten von Kunststoffen, Grundlagen, Vorschriften, Prüfverfahren, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1981
- [31] Stimper, K.: Grundlagen für eine beanspruchungsgerechte Koordination der Isolierungen bei Niederspannung, Habilitation, Technische Fakultät Erlangen-Nürnberg, 1990
- [32] Seip, G.: Elektrische Installationstechnik, Siemens, 3. Auflage 1993
- [33] Luikov, A., V.: Analytical heat diffusion theory, academic press New York and London, 1968
- [34] Ann, Gölz, Gross, Haase, Hetzer, Müller, Neidhöfer, Prenner, Schweizer, Zeise: Elektrische Energietechnik, Verlag TÜV Rheinland, 1987
- [35] Haase H., Garbe H.: Elektrotechnik, Theorie und Grundlagen, Springer Verlag 1998
- [36] Schwarz, H. R.: Methode der finiten Elemente. Stuttgart: Teubner, 1984
- [37] Stoffel, A.: Finite Elemente und Wärmeleitung, Weinheim VCH Verlag, 1992
- [38] Luikov, A. V.: Analytical Heat Diffusion Theory, Academic Press, New York and London, 1968
- [39] Wright, A.: Electric Fuses, Institution of electrical engineers, London, 1982
- [40] Hesselmann, N: Digitale Signalverarbeitung, Vogel-Buchverlag, Würzburg, 1983

Anhang A Kennlinien und Materialwerte

GA1

Saha-Gleichung [8]:
$$\frac{x_i^2}{1-x_i^2} = \frac{1}{p} \cdot \text{const} \cdot T^{\frac{5}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{W_i}{kT}\right)$$

Es sind dabei:

x_i : Quotient aus der Anzahl der Ionen und der Gesamtzahl der Atome je Volumeneinheit

T : Plasmatemperatur

p : Druck

W_i : Ionisierungsenergie

k : Boltzmann-Konstante.

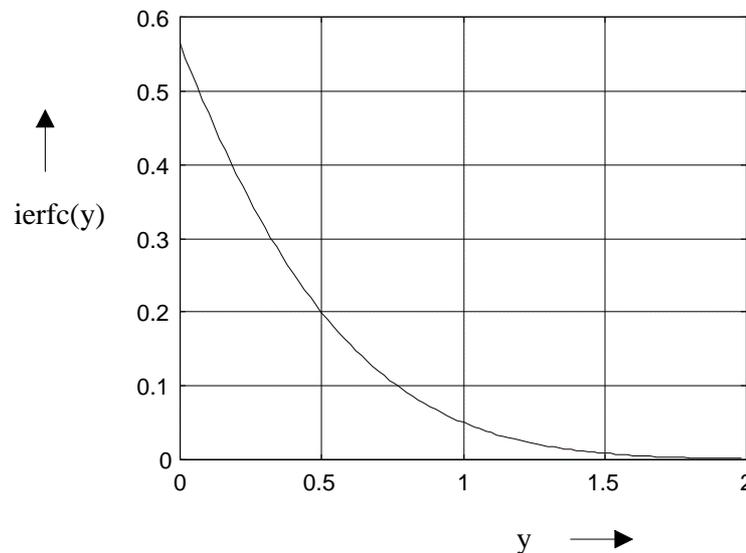


Bild A1:
$$\text{ierfc}(x) = \int_x^{\infty} (1 - \text{erf}(u)) du = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-x^2} - x(1 - \text{erf}(x)) \quad \text{mit} \quad \text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-u^2} du$$

Tabelle TA1: Zersetzungspunkte einiger Kunststoffe [30]

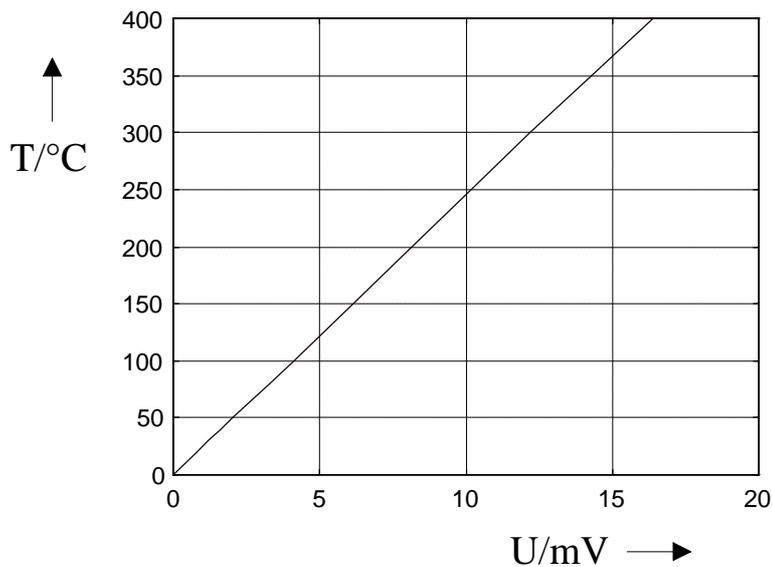
Kunststoff	Zersetzungsbereich / °C	Entflammungs- temperatur FIT / °C	Entzündungs- temperatur SIT / °C
PVC	200-300	390	455
Polyethylen	340-440	340	350
Polyamid 6	300-350	420	450
Polystyrol	300-400	345-360	490
Polypropylen	330-410	350-370	390-410
Polytetrafluorethylen	510-540	560	580

Tabelle TA2: Charakteristische Entfestigungs- und Schmelzgrößen eines symmetrischen Kupferkontaktes [8]

Entfestigungstemperatur / °C	Schmelztemperatur / °C	Entfestigungsspannung / V	Schmelzspannung / V
190	1080	0,12	0,43

Tabelle TA3: Thermische Materialwerte der Schraubverbindung

isotropes Material bei 20 °C	Wärmeleitfähigkeit $\lambda / \frac{\text{W}}{\text{mK}}$	Dichte $\rho / \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	spezifische Wärmekapazität $c / \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$
Stahl (V2A 18% Cr, 8% Ni)	21	7880	500
Kupfer (rein)	393	8900	390
Polyamid	0,27	1130	1900

**Bild BA1:** Kennlinie des Ni-Cr-Ni-Thermoelementes**Tabelle TA4:** Materialwerte und Maße zur Bestimmung der Kontaktfläche in der Schraubverbindung

P / mm	m_G	d_2 / mm	μ_K	ℓ / mm	d / mm	$E / \text{N/mm}^2$
0,7	0,12	2	0,12	5	1,4	$1,2 \cdot 10^{-5}$

Anhang B Materialwerte und Ergebnisse der Gasentladungen

Tabelle TB1: Thermische und elektrische Materialwerte von Fremdschichtstoffen bei 1bar und 20°C nach [22], [23] und [24]

Stoffkonstante	destilliertes Wasser	Salzlösung	Graphit
Wärmeleitfähigkeit / $\frac{W}{mK}$	0,561	0,579	26,8
Dichte / $\frac{kg}{m^3}$	988,3	1158	6920
Wärmekapazität / $\frac{J}{kgK}$	4182	3395	461
Elektrische spezifische Leitfähigkeit / $\frac{S}{m}$	10^{-4}	21,4	$3 \cdot 10^6$
Elektrischer spezifischer Widerstand / Ωm	10^4 [24]	0,0467 [24]	$33,3 \cdot 10^{-6}$ [23]

Tabelle TB2: Beschreibung der möglichen Vorgänge durch eine Natriumchloridlösung als Fremdschicht (n.b.: nicht beobachtet)

	50 V	100 V	150 V	230 V
wiederholte Abreiß-Entladungen und Rauchgas-entwicklung	gelegentlich	häufig	häufig	n.b.
sichtbar leuchtender Kreis und Rauchgas-entwicklung	n.b.	häufig	häufig	n.b.
Kontaktunterbrechung direkt nach dem Einschalten	gelegentlich	häufig		
Lichtbögen	n.b.			häufig
Beanspruchung der Kunststoffoberfläche	mittel	hoch	hoch	mittel
Elektrodenbeanspruchung	Oxidation			Oxidation und Anschmelzungen
Reaktionsprodukte	Ablagerung von Kupfer-I-Oxid			

Lebenslauf

Persönliche Daten:

Vor- und Zuname	Youssef Dahmouni
Geburtsdatum	30.01.68
Geburtsort	Moknine/Tunesien

Ausbildung:

Aug. 1973-Juni 1979	Grundschule: Französische Klosterschule
Sept. 1979-Juni 1986	Gymnasium Ezzahra Sousse, Abitur, Stipendium
Sept. 1986-Juli 1987	Studienkolleg (Hannover), Abschluß: Zulassung für das Studium an deutschen Universitäten
Okt. 1987-Sept. 1994	Studium der Elektrotechnik an der Universität Hannover, Schwerpunkt: Allgemeine Elektrotechnik, Abschluß: Dipl.-Ing.

Berufstätigkeit:

Okt. 1994-Juni 1999	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Meßtechnik der Universität Hannover
---------------------	--