

# Elektrothermische Modellierung von Kfz-Schmelzsicherungen für dynamische Belastungen

Selcuk Önal, TU Dortmund, Dortmund, selcuk.oenal@tu-dortmund.de

Prof. Dr. Stephan Frei, TU Dortmund, Dortmund, stephan.frei@tu-dortmund.de

## Kurzfassung

Die Auswahl einer Schmelzsicherung, die eine angeschlossene Leitung vor Überstrom oder Kurzschluss schützen muss, erfolgt in der Praxis überwiegend auf Basis einer statischen Auslösekennlinie aus einem Datenblatt und der Zerstörungskennlinie der Leitung. Eine Sicherung mit optimalem Nennstrom für die angeschlossene Leitung zu finden, ist allerdings aufgrund von großen Toleranzen in Normauslösezeiten ein Problem und führt oft zu einer unterdimensionierten Sicherung bzw. zu einer überdimensionierten Leitung. In dieser Veröffentlichung wird ein Ersatzschaltungsmodell für die Bestimmung der Sicherungstemperatur vorgestellt, das sowohl für stationäre als auch für transiente Belastungsströme präzise das Auslöseverhalten beschreibt. Das Modell wird durch geeignete Messmethoden anhand von Thermografieaufnahmen für exemplarische Kfz-Flachstecksicherungen parametrisiert und durch thermische und elektrische Messungen verifiziert.

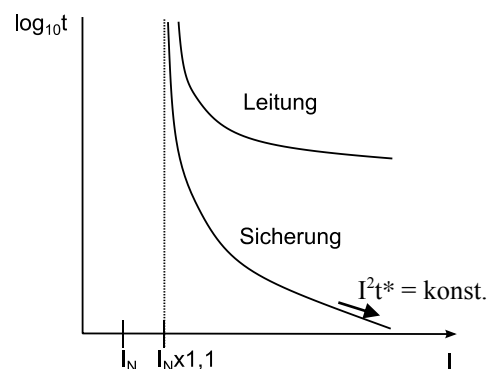
## Abstract

The selection of a melting fuse, which protects a cable from an overcurrent or a short circuit, is done in practice only on the basis of the static time-current characteristic in standards. Finding a melting fuse with an optimum current rating is a difficult task due to large safety-margins in standards, which often leads to an oversized cable harness. In this Paper an electrical-thermal behavior model to determine the temperature and melting time of automotive fuses is given, which is verified with the help of thermography measurements for both stationary and transient load currents.

## 1 Einleitung

Der einzusetzende Mindestquerschnitt einer Leitung wird physikalisch durch die Degradationstemperatur der verwendeten Isolierung und durch den zulässigen, temperaturabhängigen, Spannungsabfall begrenzt. Wird die Leitung durch eine Schmelzsicherung geschützt, was in der Regel der Fall ist, muss diese ebenfalls berücksichtigt werden. Eine Auswahl der Sicherung durch Abgleich des maximalen Leitungsstroms mit dem Nennstroms der Sicherung ist dabei nicht ausreichend, da Schmelzsicherungen aufgrund ihrer Baugrößen ein anderes thermisches Verhalten besitzen als die Leitungen. Abbildung 1 macht dies deutlich, wo die Auslösekennlinie einer Sicherung und die Zerstörungs- bzw. Degradationskennlinie einer Leitung abhängig vom Strom (konstant) und der Zeit dargestellt sind. Während die Sicherung bei niedrigen Überströmen gegenüber der Leitung ein ähnliches Zeitverhalten aufweist, verhält sie sich bei hohen Überströmen zu flink, was bei höheren Stromtransienten zu einer ungewollten Auslösung der Sicherung führen kann [1]. Eine Sicherung mit höherem Nennstrom würde zwar das Problem lösen, allerdings üblicherweise einen größeren Leitungsquerschnitt bedeuten, da die neue Sicherung die verwendete Leitung bei geringen Überströmen nicht mehr schützen könnte.

Die Zerstörungs- bzw. Degradationskennlinien von Kfz-Leitungen werden üblicherweise vom Leitungshersteller nicht angegeben. D.h., diese müssen durch Simulationen oder analytische Methoden bestimmt werden. Minimal und maximal mögliche Auslösezeiten von Kfz-Schmelzsicherung sind hingegen in Normen ISO-8820-3 festgelegt, allerdings mit einem sehr großen Streubereich und für nur wenige Stromwerte. Besonders schwierig wird die Auswahl eines Sicherungs-/Leitungspaares aufgrund von puls-förmigen Belastungsströmen. Während für sehr schnelle Einzeltransienten der  $I^2t$ -Wert\* benutzt werden kann, sind elektrothermischen Simulationsmodelle bei komplexen Stromprofilen die einzige Möglichkeit.



**Abbildung 1:** Auslöse- bzw. Zerstörungskennlinie eines Sicherungs-/Leitungspaares ( $I_N$ : Nennstrom der Sicherung)

\* Im adiabatischen Bereich (unter ca. 100 ms oder im Kurzschlussfall), wo nahezu kein Wärmeaustausch stattfindet, können die Schmelzzeiten der Sicherungen durch den  $I^2t$ -Wert (auch Schmelzintegral oder Meyersche Konstante) berechnet werden. Dieser Wert ist sicherungsspezifisch und ist im Datenblatt der Sicherung angegeben

## 2 Messmethodik

### 2.1 Messaufbau

Zur Bestimmung der Auslösezeit und -temperatur von Sicherungen wird ein Messaufbau bestehend aus einem Oszilloskop, einer programmierbaren Leistungsstromquelle, einer Stromzange, einer Infrarot-Wärmebildkamera und einem Sicherungsprobenhalter mit Sicherung verwendet (Abbildung 2).

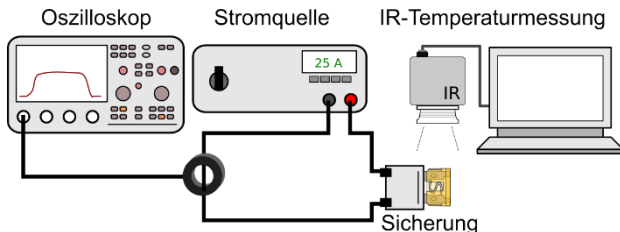


Abbildung 2: Messaufbau

Um die präzise Infrarot-Temperaturmessung am Schmelzdraht zu ermöglichen, wird eine Öffnung im Sicherungsgehäuse angebracht. Zusätzlich wird der Sicherungsdraht mit einer dünnen Graphitschicht lackiert, um eine genaue Infrarot-Messung mit besser definierter Emissionszahl durchzuführen. In Abbildung 3 ist eine Sicherung vor und nach der Vorbereitung für die Messung zu sehen. Der Einfluss der Öffnung und Graphitschicht auf das Temperaturverhalten der Sicherung wird als gering angenommen und vernachlässigt.

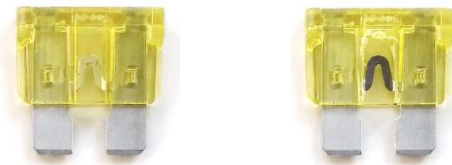


Abbildung 3: Modifizierte Sicherung für IR-Messungen

### 2.2 Auswertung der Messungen

Durch mehrere Versuchsreihen in wurde festgestellt, dass abhängig von der Dicke der Graphitbeschichtung die Emissionszahl variieren kann. Deshalb wurden sämtliche Messungen mit einer Emissionszahl von 1 durchgeführt und nachher durch die Software der IR-Kamera erneut ausgewertet, indem die eigentliche Emissionszahl für die jeweilige Sicherung über ihre Schmelztemperatur ermittelt wird. Da die untersuchten Sicherungen aus Littelfuse ATOF 32V Baureihe nach Datenblatt aus einer Zinklegierung bestehen, wurde eine Schmelztemperatur von 388 °C angenommen. Diese Temperatur wurde über den Temperaturkoeffizienten  $\alpha_T$  der Sicherungen bestätigt, der anhand eines Klimaprüfschrankes ca. 0,0035 1/K gemessen wurde. Nach [2] und [3] weist der gemessene Koeffizient  $\alpha_T$  auf die Zinklegierung Zamak-5 hin, deren Parameter in Tabelle 1 aufgeführt sind.

Materialparameter	Reines Zink	Zamak-5	
$\alpha_T$	[1/K]	0,0042	0,003527
$T_{melt}$	[°C]	419,5	388

Tabelle 1: Materialparameter von Zink [4] und Zinklegierung Zamak-5 [2][3]

In Abbildung 4 ist das Messergebnis einer 20 A-Flachstecksicherung (ATO20) im Schmelzvorgang dargestellt.

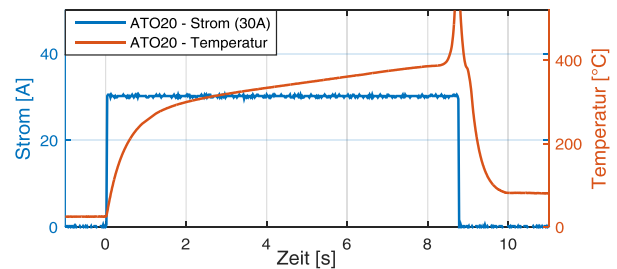


Abbildung 4: Messergebnis einer Schmelzsicherung

Wie in Abbildung 4 zu erkennen, erreicht das Sicherungselement eine Schmelztemperatur von ca. 388 °C zu dem Zeitpunkt ca. 8 s und bleibt dann bei dieser Temperatur bis zum Durchschmelzen für kurze Zeit konstant. Die konstant bleibende Temperatur ist damit zu begründen, dass ein Phasenübergang des Materials stattfindet und die zugeführte Energie für den Schmelzvorgang verbraucht wird [4]. Der dargestellte Temperaturpeak ist auf eine Flammenbildung zurückzuführen. Die gesamte Schmelzzeit einer Sicherung setzt sich also aus einer Aufheizzeit und einer Zeit konstanter Temperatur zusammen, wobei die letztere nach mehreren Versuchen in dieser Arbeit und auch nach [4] ca. 1/10 der gesamten Schmelzzeit beträgt und bei der Modellierung in Bezug auf Toleranzen in der Schmelzzeit vernachlässigt werden kann.

## 3 Modellierung

Modellierung der Sicherung erfolgt durch eine RC-Kettenbruchschialtung (Abbildung 5), welche in der Literatur auch als Cauer-Modell [5] bezeichnet wird.

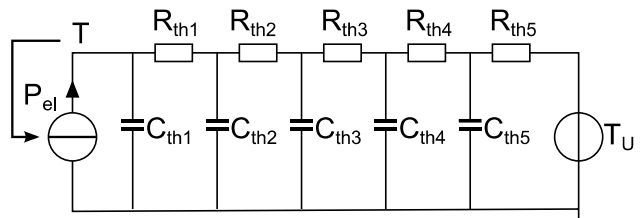


Abbildung 5: Sicherungsmodell

Die Wärmestromquelle  $P_{el}$  repräsentiert dabei die elektrische Verlustleistung an dem Sicherungselement und berechnet sich wie folgt:

$$P_{el} = I^2 \cdot R_{fuse}(T) \quad (1)$$

$$R_{fuse}(T) = R_{cold} \cdot (1 + \alpha_T(T - T_{ref})) \quad (2)$$

wobei;

$T$	Sicherungstemperatur (max.)	$K$
$I$	Elektrischer Strom	$A$
$R_{cold}$	Widerstand der Sicherung bei $T_{ref}$ (ca. 296 K)	$\Omega$
$\alpha_T$	Temperaturkoeffizient des Schmelzelements (0,003527 1/K)	$1/K$

Die Umgebungstemperatur  $T_u$  [K] wird durch eine äquivalente Spannungsquelle realisiert, wobei die Kapazitäten im RC-Netzwerk ebenfalls auf die Umgebungstemperatur  $T_u$  vorgeladen sind. Als vereinfachende Annahme wird der elektrische Widerstand zwischen den Sicherungskontakten durch nur einen temperaturabhängigen elektrischen Widerstand  $R_{fuse}$  berücksichtigt.

Das Cauer-Modell repräsentiert im Allgemeinen den Aufbau einer physikalischen Struktur, in der ein eindimensionaler Wärmefluss ohne innere Stromquellen stattfindet [5]. Durch geeignete Optimierung der Modellparameter kann das thermische Verhalten einer komplexeren Struktur näherungsweise beschrieben werden. Die abgegebene Wärme durch Konvektion und Strahlung kann nur indirekt über das Netzwerk berücksichtigt werden.

### 3.1 Modellparametrierung

#### 3.1.1 Bestimmung der Kaltwiderstände

Um die Wechselwirkung von elektrischem Widerstand und Temperatur an dem Schmelzelement zu berücksichtigen, müssen neben dem linearen Temperaturkoeffizient  $\alpha_T$  auch der Kaltwiderstand  $R_{cold}$  bekannt sein. Die Kaltwiderstände für die untersuchten drei Sicherungen bei einer Referenztemperatur von 23 °C wurden durch 4-Leiter-Messungen mit alternierendem Teststrom (ca. 100 mA) ermittelt. Dabei wurden die Messungen direkt über die Sicherungskontaktstellen (ohne Sockel) durchgeführt. In Tabelle 2 sind diese Werte im Vergleich mit Datenblattwerten verglichen, wobei in der Simulation die gemessenen Werte verwendet werden.

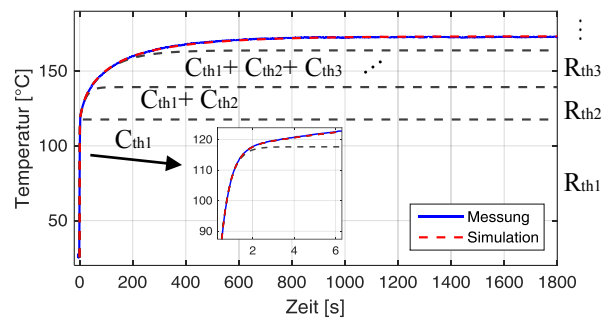
$R_{cold}$ - Sicherung		ATO10	ATO20
gemessen	[mΩ]	7,75	3,42
Datenblatt		7,70	3,38

**Tabelle 2:** Gemessene Kaltwiderstände der Sicherungen im Vergleich mit Datenblattangaben

Da das Modell zum Schluss durch Messdaten optimiert wird, sind die Kaltwiderstände in der rein-thermischen Simulation aufgrund des linearen Temperaturkoeffizienten von geringer Bedeutung. Sie werden jedoch benötigt, um das elektrische Verhalten der Sicherung präzise nachzubilden (siehe Abschnitt 4.3).

#### 3.1.2 Bestimmung der Parameter des RC-Netzwerks

Die fünfgliedrige RC-Schaltung ist verantwortlich für die Charakteristik des zeitlichen Temperaturverlaufs und muss genau ausgelegt werden. Die Anpassung der Parameter erfolgt in Matlab über den gemessenen zeitlichen Temperaturverlauf der Sicherung bei dem Nennstrom der jeweiligen Sicherung. Da die RC-Glieder im Netzwerk jeweils für einen Teilbereich im Temperaturverlauf zuständig sind, werden diese in Schritten optimiert, wobei in jedem Schritt ein neues RC-Glied in das Netzwerk hinzugefügt wird. Wird ein neues RC-Glied zugeschaltet, wird der thermische Widerstand beginnend von Null an solange erhöht, bis mit der Variation der thermischen Kapazität ein Teilbereich in der Kurve präzise genug nachgebildet wird. Dabei soll die verbleibende Abweichung so gewählt werden, dass maximal vier RC-Glieder bis zu einem quasi-stationären Endwert (ca. 1800s angenommen) benötigt werden, was für die untersuchten Sicherungen möglich war. In Abbildung 6 ist der Anpassungsvorgang für eine ATO10-Sicherung dargestellt.



**Abbildung 6:** Optimierung des RC-Netzwerks

Wie in Abbildung 6 zu erkennen ist, bestimmt das erste RC-Glied ( $R_{th1}$ ,  $C_{th1}$ ) den sehr steilen Anstieg am Anfang der Kurve und repräsentiert damit das Schmelzelement. Ab diesem Punkt erhöht sich die Temperatur vergleichsweise relativ langsam, was auf die Wärmeleitung aus dem Schmelzelement in die Sicherungsanschlüsse hindeutet. In Tabelle 3 sind die optimierten RC-Netzwerk-Parameter für zwei untersuchte Sicherungen aufgeführt.

RC- Parameter		ATO10	ATO20
$R_{th1}$	[K/W]	90,5	44,5
$R_{th2}$		14,85	9,6
$R_{th3}$		15	19,2
$R_{th4}$		5,1	12,9
$R_{th5}^\dagger$		90	18
$C_{th1}$	[J/K]	0,0038	0,0053
$C_{th2}$		1,29	0,6
$C_{th3}$		4,7	1,6
$C_{th4}$		30	9,85
$C_{th5}^\dagger$		5000	25000

**Tabelle 3:** Netzwerkparameter untersuchter Sicherungen

<sup>†</sup> $R_{th5}$  und  $C_{th5}$  bestimmen den Temperaturverlauf im Stundenbereich und wurden zur Vollständigkeit des Modelles unter Berücksichtigung der Normwerte manuell ergänzt

## 4 Verifikation

Das erstellte elektro-thermische Modell wurde in Matlab/Simscape implementiert und durch Vergleich mit Messungen bei konstanten bzw. pulsformigen Strömen verifiziert. Abbildung 7 vergleicht die gemessenen Temperaturverläufe von einer ATO10-Sicherung mit Simulationen bei konstanten Strömen von 5, 7,5 und 10 A. Wie dabei zu erkennen, ist eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation auch bei niedrigen Strömen gegeben, obwohl das Modell nur auf Basis der 10 A-Verlauf optimiert wurde. Die Abweichungen dabei ab ca. 100 s sind auf die bereits genannten vereinfachenden Annahmen im Modellkonzept zurückzuführen.

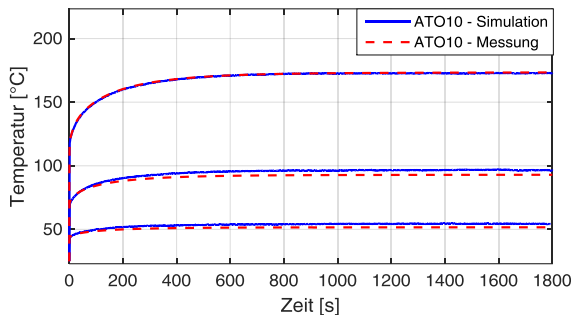


Abbildung 7: ATO10 - Gemessene und simulierte Temperaturverläufe im Betriebsbereich

### 4.1 Simulation des Schmelzvorgangs

Die Verifikation des Modells für den Schmelzvorgang erfolgte zunächst durch den 1,5- und 2-fachen Nennstrom der Sicherung. Um die mögliche Streuung der Schmelzzeit bei höheren Strömen zu beobachten, wurden dabei jeweils drei Sicherungen zum Durchschmelzen gebracht. In Abbildung 8 sind für die ATO10-Sicherung die gemessenen Temperaturverläufe mit der Simulation verglichen.

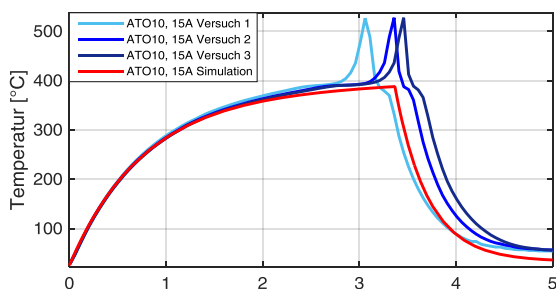


Abbildung 8: ATO10 - Gemessene und simulierte Temperaturverläufe im Schmelzvorgang

Wie in Abbildung 8 zu erkennen ist, liefert die Simulation eine gute Nachbildung des Temperaturverlaufs bis zu dem Schmelzbereich. Der Schmelzbereich wird durch das Modell nicht mehr nachgebildet, da die Sicherung dort schon als zerstört angesehen werden muss und dieser somit praktisch nicht relevant ist. Dabei ist als Schmelzzeit bei Messungen die Zeit vom Einschalten des Stroms bis zu den Peak-Spitzen zu interpretieren (siehe Abbildung 4).

### 4.2 Simulation der Auslösekurven

Die Modellgenauigkeit wurde ebenfalls über Auslösekennlinien bei ausgewählten Strömen überprüft. Die Abbildung 9 stellt die gemessenen Schmelzzeiten (schwarze Sternchen) der simulierten Auslösekurve gegenüber, wobei hier ebenfalls die Datenblattkurve (grüne Linie) und die minimal und maximal zulässigen Grenzwerte nach der ISO-Norm (rote Sternchen) dargestellt sind.

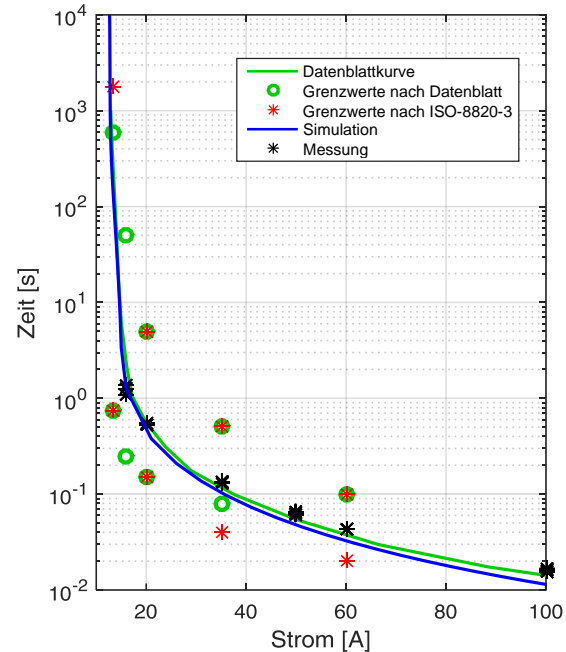


Abbildung 9: ATO10 - Verifikation Auslösekennlinie

$\times I_N$	ATO10 Schmelzzeiten			
	V1	V2	V3	Simulation
1,1	min. $360 \cdot 10^3$ s (ISO-8820-3)			$364 \cdot 10^3$ s
1,35	190s (Datenblattkurve)			115,12s
1,5	3,45s	3,3s	3,05s	3,43s
1,6	1,37s	1,09s	1,27s	1,26s
2	0,530s	0,540s	0,532s	0,45s
3,5	128,9ms	136,3ms	134,6ms	104,9ms
5	63,9ms	64,3ms	61,1ms	48,5ms
6	43,1ms	42,4ms	42,3ms	33,1ms
10	15,7ms	15,9ms	16,4ms	11,6ms
$\times I_N$	ATO20 Schmelzzeiten			
	V1	V2	V3	Simulation
1,1	min. $360 \cdot 10^3$ s (ISO-8820-3)			$401,7 \cdot 10^3$ s
1,35	14,3s (Datenblattkurve)			49,52s
1,5	8,4s	8,01s	7,6s	8,85s
1,6	1,86s	1,72s	1,71s	1,97s
2	0,437s	0,442s	0,444s	0,395s
3,5	104,6ms	102,4ms	102,5ms	84,6ms
5	46,8ms	45,8ms	46,2ms	38,5ms
6	30,2ms	31,4ms	31,1ms	26,21ms
10	11,01ms	11,09ms	11,13ms	9,15ms
15	5,04ms	4,96ms	4,89ms	4,04ms

Tabelle 4: Schmelzzeiten Messung & Simulation

Das Modell liefert generell eine sehr gute Genauigkeit. Kleinere Abweichungen von der Messung treten im Hochstrombereich auf. Diese könnten durch Variation der ersten RC-Parameter ( $R_{th1}$ ,  $C_{th1}$ ) kompensiert werden, wobei in diesem Fall mit kleineren Abweichungen im Zeitverlauf (siehe Abbildung 6) zu rechnen ist.

In Tabelle 4 sind die gemessenen und simulierten Schmelzzeiten für ATO10 bzw. ATO20 aufgeführt. Die gemessenen Schmelzzeiten mit jeweils drei Versuchen zeigen, wie ebenfalls in [6] festgestellt ist, dass die in Normen festgelegten Werte herstellerspezifisch deutlich eingeschränkt werden können.

### 4.3 Elektrischer Widerstand

Es wurde festgestellt, dass das Modell eine für viele Anwendungen ausreichende genaue Aussage über den temperaturabhängigen elektrischen Widerstand liefert. Wie in Abbildung 10 zu erkennen, konvergiert der simulierte elektrische Widerstandswert mit erhöhter Temperatur gegen den gemessenen Widerstand. Die Abweichung am Anfang ist darin zu begründen, dass weder der Temperaturgradient am Schmelzelement noch die Erwärmung an den Kontakten der Sicherung explizit im Modell berücksichtigt sind.

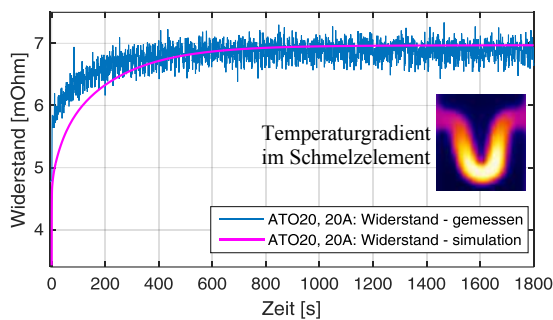


Abbildung 10: ATO20 - Widerstand Messung & Simulation

## 5 Belastung mit Pulsströmen

### 5.1 Verifikation

Während für die Auswahl einer geeigneten Sicherung die Datenblattangaben von Herstellern oder die Normwerte als Worst-Case benutzt werden können, sind die Bestimmungen der Schmelzzeiten bei variablen Strömen direkt nicht möglich. Das in dieser Arbeit erstellte elektrothermische Modell kann ebenfalls für variable Ströme angewendet werden. Die Verifikation des Modells hierfür wurde, wie in Abbildung 11 für ATO20-Sicherung dargestellt, mit Hilfe von Rechteckstrompulsen durchgeführt. Es ist dabei zu erkennen, dass nicht nur die Erwärmung sondern auch die Abkühlung der Sicherung gut nachgebildet werden kann.

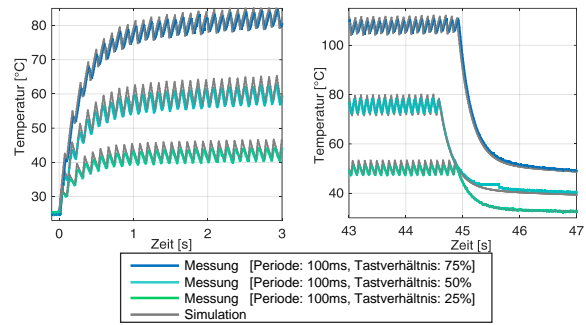


Abbildung 11: ATO20 – Belastung mit Rechteckpulsen (Messung vs. Simulation)

### 5.2 Rerating bei Rechteckstrompulsen

Durch das elektrothermische Modell kann die Verschiebung der Auslösekennlinien bei rechteckförmigen Stromprofilen, wie in Abbildung 12 gezeigt, ermittelt werden.

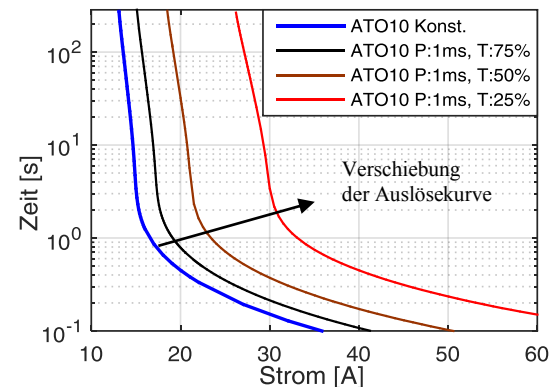


Abbildung 12: ATO10 – Rerating durch Pulsbelastung

In Tabelle 5 sind die berechneten Rerating-Faktoren für ATO10 abhängig von der Strompulsform aufgeführt.

P (ms)	1 ms			100 ms		
T (%)	75	50	25	75	50	25
Faktor	1,15	1,41	1,99	1,14	1,39	1,95

Tabelle 5: ATO10 Rerating-Faktoren für Rechteckströme (P: Periodendauer, T: Tastverhältnis)

## 6 Zusammenfassung

Es wurde in dieser Arbeit gezeigt, dass das thermische Verhalten einer Kfz-Schmelzsicherung in Abhängigkeit von einem beliebigen Belastungsstrom durch ein fünfgliedriges RC-Verhaltensmodell gut modelliert werden kann. Die Bestimmung der Modellparameter wurde über durch Thermografie gemessene zeitliche Temperaturverläufe durchgeführt. Durch das Modell wurde exemplarisch für eine Sicherung das Rerating der Auslösekennlinie für Rechteckstrompulse ermittelt, wobei das Modell in der Lage ist, auch komplexe Stromprofile zu simulieren. Geringfügig verbesserungsbedürftig ist das Modell bezüglich der Nachbildung des elektrischen Widerstands, welcher nicht abhängig vom Temperaturgradienten betrachtet wurde.

## 7 Literatur

- [1] Schulz, T.: Grundsatzuntersuchung zum Temperaturverhalten elektrischer Leitungen und deren Schutzelemente auf Schmelzleiterbasis in Kfz-Bordnetzen, Düsseldorf, VDI Verlag, 2003
- [2] Turner, L. W.: Electronics Engineer's Reference Book, Boston USA, Newnes-Butterworths, 1976
- [3] Hesse, W.: Werkstoff-Datenblätter - Nichteisenmetalle, Berlin, Beuth Verlag, 2014
- [4] Batchelor, A. R.; Smith, J. R.: Time-current characteristic of miniature zinc-element electric fuses for automotive applications, IEE Proc.-Sci. Mens Technol., Vol. 146, No. 4. July, 1999
- [5] Bechtold, T.; Rudnyi, E. B.; Korvink, J.G.: Fast Simulation of Electro-Thermal MEMS, Berlin, Springer-Verlag, 2007
- [6] Schulz, T.; Jörg, J.: Mehr Sicherheit für Fahrzeugleitungen, München, Automotive (5-6.2006), S. 40-43, Carl Hanser Verlag, 2006