

1A.x Modellbasierte intelligente Sicherungen mit umgebungsadaptiver Anpassung der Auslöseparameter

Selcuk Önal, Michael Kiffmeier, Stephan Frei

Abstract

For smart fuses for cable protection, realized with semiconductors, different operating strategies are possible. A frequently discussed approach is to estimate the cable temperature through appropriate models depending on the load current and to interrupt the circuit via the semiconductor switch when a critical value is exceeded. Since such a model will use the cable heating as tripping criterion a cross-section reduction compared to conventional fuses is possible. Here, due to the generally unknown environmental conditions, some worst case assumptions are made, such as a single wire in air with a maximum possible local ambient temperature. However, with the help of additional sensor information, which can be provided through the implementation of smart fuses as power distributors with a conceivable communication interface, smart fuses can offer more potential than only a cross-section reduction, which can be exploited by a more accurate estimation of the wire temperature, if necessary. In this contribution, a new concept for model-based smart fuses will be presented which, by evaluating the measured voltage drop, can take into account the influence of neighboring cables and the local ambient temperatures so that a higher current rating may be possible.

Kurzfassung

Für intelligente Sicherungen zum Leitungsschutz, die auf Halbleiterebene arbeiten, sind verschiedene Betriebsstrategien denkbar. Ein häufig diskutierter Ansatz ist es, abhängig von dem Belastungsstrom durch geeignete Modelle die Erwärmung der zu schützenden Leitung abzuschätzen und beim Überschreiten eines kritischen Wertes den Stromkreis über den Halbleiterschalter zu unterbrechen. Dadurch dass ein solches Modell als Auslösekriterium die Erwärmung der Leitung verwendet, können im Vergleich zu konventionellen Sicherungen Querschnitte reduziert werden. Aufgrund der in der Regel unbekanntenen Umgebungsbedingungen wird bei der Modellierung meist von Worstcase-Annahmen bzw. einer Einzelleitung in Luft mit maximal möglicher Umgebungstemperatur an dem Einbauort ausgegangen. Bei Verfügbarkeit von zusätzlichen Informationen, wie sie bei einer Implementierung in Form von Stromverteilern aufgrund der hier denkbaren Vernetzung möglich sind, haben intelligente Sicherungen jedoch mehr Potential neben der Querschnittreduzierung, das gegebenenfalls durch eine genauere Abschätzung der Leitungstemperatur gehoben werden kann. In diesem Beitrag soll ein neues Konzept für modellasierte intelligente Sicherungen vorgestellt werden, das durch die Auswertung des gemessenen Spannungsabfalls den Einfluss von benachbarten Leitungen bzw. lokalen Umgebungstemperaturen indirekt berücksichtigen kann, so dass bei Bedarf eine höhere Belastung der Leitung möglich ist.

1 Einleitung

Klassische Sicherungen lösen durch das Durchschmelzen eines dünnen Leiters mit einem von einem Kfz-Kabel zum Teil stark abweichenden thermischen Verhalten aus. Dadurch müssen oft größere Sicherungswerte und damit überdimensionierte Leitungsquerschnitte eingesetzt werden. Besonders bei den immer häufiger anzutreffenden Verbrauchern mit nur kurzen aber sehr hohen Spitzenstromaufnahmen erschweren Schmelzsicherungen eine optimale Querschnittsauslegung. Bild 1 veranschaulicht diese Problematik durch den Vergleich der Auslösekennlinie einer Schmelzsicherung mit der Zerstörkennlinie einer Leitung. Bei einer intelligenten Sicherung kann im Gegensatz zu einer Schmelzsicherung, bei der als Auslösekriterium die Schmelztemperatur des Sicherungselements dient, direkt die zulässige Temperatur der Leitung als Auslösekriterium verwendet werden (Bild 1, rechts).

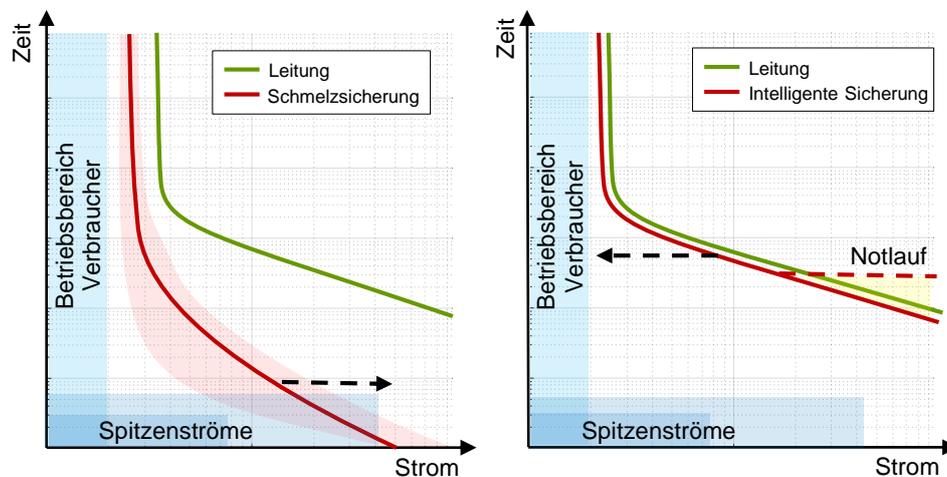


Bild 1: Vergleich von Schmelzsicherungen und intelligenten Sicherungen anhand von Auslösekennlinien (rot) bzw. Zerstörkennlinie einer zu schützenden Leitung (grün)

Eine solche intelligente Sicherung ist durch die Kombination eines geeigneten elektrothermischen Leitungsmodells, das beispielsweise auf einem Mikrocontroller implementiert sein kann, mit einer Strommessung und einem gesteuerten elektronischen Schalter möglich. Die Leitungstemperatur sollte auch bei komplexeren Stromprofilen genau berechnet werden können. Aufgrund der Temperaturabhängigkeit der thermischen Leitungsparameter ist die numerische Lösung einer Differentialgleichung zur genauen Bestimmung der Leitungstemperatur notwendig. Wichtige Eingangsparameter sind der gemessene elektrische Strom und die Umgebungstemperatur. Dabei ist eine Vereinfachung der Berechnung durch die Annahme einer Einzelverlegung in Luft mit einer maximal möglichen (Worstcase-)Umgebungstemperatur ohne Einflüsse von Kontakten bzw. axialen Wärmeflüssen möglich.

Da in der Praxis keine Luftverlegung sondern eine Bündelverlegung und damit oft eine bessere Wärmeabgabe vorliegen und reale Umgebungstemperaturen niedriger sein können, werden i.d.R. höhere Leitungstemperaturen als real auftreten berechnet. Dies ist bei einer Querschnittdimensionierung sinnvoll, da dort Worstcase-Annahmen zu berücksichtigen sind. Anders als bei einer Schmelzsicherung ist es bei intelligenten Sicherung jedoch möglich, das Auslöseverhalten dynamisch anzupassen.

1A.x Modellbasierte intelligente Sicherungen mit umgebungsadaptiver Anpassung der Auslöseparameter

Es ist beispielsweise denkbar, die Leitung unter Umständen mit einem höheren Strom als bei den Worstcase-Annahmen bzw. ihrer im Vorfeld berechneten Zerstörkennlinie zu belasten, falls der abkühlende Einfluss von realen Umgebungseigenschaften mitberücksichtigt werden könnte. So kann die intelligente Sicherung z.B. bei Bedarf eine Überlast unter Berücksichtigung der maximal zulässigen Leitungstemperatur erlauben oder sogar einen Notlauf ermöglichen, bei dem die Leitung kurzzeitig auch über die zulässige Leitungstemperatur belastet werden kann.

Dabei bietet sich z.B. die Auswertung des gemessenen Leiterwiderstands, der zwar eine – genaue – Spannungsmessung über der Leitung voraussetzt aber ohne direkte Temperaturmessung der elektrische Widerstand Informationen über die aktuelle Leitungstemperatur liefert. Neben der Messgenauigkeit muss dabei auch das ungleichmäßige Profil des Widerstandsbelags entlang der Leitung berücksichtigt werden. Im Folgenden werden zunächst elektrothermische Modelle für Kfz-Leitungen präsentiert, die durch Worstcase-Parametrierung als Basis Modelle für intelligente Sicherung dienen sollen. Anschließend soll die Genauigkeit der Spannungsmessung diskutiert werden und eine Methode zur korrekten Ermittlung des maximalen Widerstandsbelags zur Bestimmung der Leitungstemperatur untersucht werden. Danach soll der Aufbau des vorgeschlagenen Sicherungsmodells mit einem Anwendungsbeispiel vorgestellt werden.

2 Elektrothermische Modelle für Kfz-Leitungen

Zur Erstellung elektrothermischer Leitungsmodelle, die möglichst einfach zu implementieren sind, soll für die Leitung eine Verlegung in Luft angenommen werden. Oft kann der Wärmefluss im Leitungsquerschnitt auf nur eine Dimension, nämlich entlang des Radius, reduziert werden. Elektrothermische Ersatzschaltbilder (ESB), die über physikalische Leitungseigenschaften parametrierbar sind, bieten sich hierfür besonders gut an und sollen hier behandelt werden. Im Folgenden sollen die Ersatzschaltbilder nur für Einfachleitungen mit einer Isolierungsschicht vorgestellt werden, deren Erweiterung jedoch für mehrere zusätzliche Schichten, wie Schirm oder Isolierung, möglich ist [1].

2.1 Modellierung des radialen Wärmeflusses

Zunächst soll als Basismodell ein thermisches ESB für den radialen Wärmefluss im Leitungsquerschnitt wie es in Bild 2 (links) dargestellt ist, vorgestellt werden. Dieses kann zusätzlich noch in ein einfaches kausales Blockdiagramm überführt werden (siehe Bild 2, rechts). Diesem Ersatzschaltbild liegt die Annahme zugrunde, dass die Leitung unendlich lang ist, wodurch axiale Wärmeflüsse und die Leitungslänge (l) keinen Einfluss mehr auf die berechnete Temperatur in der Leitungsmitte haben.

1A.x Modellbasierte intelligente Sicherungen mit umgebungsadaptiver Anpassung der Auslöseparameter

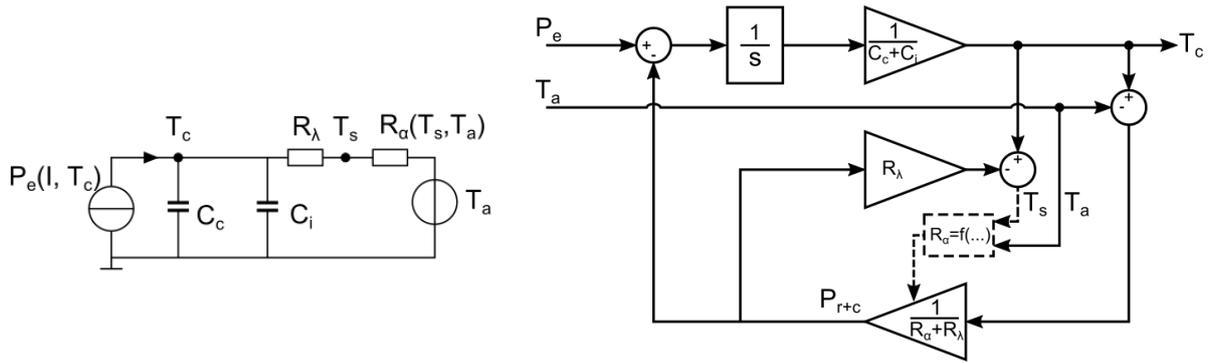


Bild 2: Thermisches ESB und eine äquivalente kausale Darstellung für radiale Wärmeflüsse

Die Wärmequelle P_e im ESB repräsentiert die elektrische Verlustleistung und kann mit Formel 1 berechnet werden, wobei I der elektrische Strom, R_{ref} der elektrische Widerstand bei der Temperatur T_{ref} (z.B. 20°C), α_T der lineare Temperaturkoeffizient des Leitermaterials und T_c die Leitertemperatur sind.

$$P_e = I^2 \cdot R_{ref} \left(1 + \alpha_T (T_c - T_{ref}) \right) \quad (1)$$

Die Berechnung der thermischen Kapazitäten für den Leiter (C_c) bzw. Isolierung (C_i) erfolgt jeweils anhand von volumenbezogener spezifischer Wärmekapazität (c_c bzw. c_i) und dem Volumen durch die Formel 2, wo r_c bzw. r_i das Radius des Leiters bzw. der Isolierung ist:

$$C_c = c_c \pi r_c^2 l \quad C_i = c_i \pi (r_i^2 - r_c^2) l \quad (2)$$

Der thermische Widerstand des Leiters ist gegenüber der Isolierung viel kleiner und wird deshalb vernachlässigt. Die thermischen Widerstände im ESB stellen damit nur R_λ und R_α dar, wobei der erste die Wärmeleitung durch die Isolierungsschicht und der zweite die Wärmeabgabe an die Umgebung durch Konvektion und Strahlung berücksichtigt. Die Berechnung dieser Widerstände erfolgt analog zu [2], wobei λ die thermische Leitfähigkeit der Isolierung ist.

$$R_\lambda = \frac{\ln(r_i/r_c)}{2\pi l \lambda} \quad R_\alpha = \frac{1}{(\alpha_c + \alpha_r) 2\pi r_i l} \quad (3)$$

α_c und α_r sind die Wärmeübergangskoeffizienten durch Konvektion bzw. Strahlung. α_r kann mit der Emissionszahl der Leitungsoberfläche ε (0,95 für die meisten Isolierungsmaterialien), der Stefan-Boltzmann-Konstante σ und der absoluten Umgebungstemperatur T_a bzw. Oberflächentemperatur T_s berechnet werden:

$$\alpha_r = \frac{\varepsilon \sigma [(T_s^4 - T_a^4)]}{T_s - T_a} \quad (4)$$

Die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten für die Konvektion erfolgt anhand von der Nusselt-Zahl Nu , der Wärmeleitfähigkeit der Luft λ_{air} und der Anströmlänge l_a durch die Formel 5. Die Anströmlänge l_a beschreibt die Länge der Luftströmung an der

1A.x Modellbasierte intelligente Sicherungen mit umgebungsadaptiver Anpassung der Auslöseparameter

Oberfläche während Konvektion und ergibt sich für ein horizontal liegendes Kabel als die Hälfte des Leitungsumfangs bzw. πr_i .

$$\alpha_c = \frac{Nu(T_a, T_s) \cdot \lambda_{air}}{l_a} \quad (5)$$

Die Nusselt-Zahl Nu ist dabei besonders maßgebend für die Konvektion und wird abhängig von der Leitungsgeometrie für freie Konvektion über eine spezielle Funktion bestimmt, die verschiedene temperaturabhängige Luftkonstanten enthält. Die Berechnung der Nusselt-Zahl bzw. der Luftkonstanten für die Modelle erfolgt nach [3] bzw. [4]. Bild 3 vergleicht die Simulation mit der Messung für den Temperaturverlauf einer 6 mm² PVC-Kupfer Leitung. Die Temperaturmessung wurde hierbei indirekt über die Widerstandsmessung für eine Luftverlegung gemäß der Norm LV-112 durchgeführt. Dabei wird eine ausreichend lange Leitung verwendet und der Spannungsabfall wird über ein mittleres Stück der Leitung, wo der Widerstandsbelag ein gleichmäßiges Profil hat, abgegriffen, wodurch das Simulationsmodell durch physikalische Parametrierung mit der Messung gut vergleichbar ist. Messung und Simulation stimmen sehr gut überein.

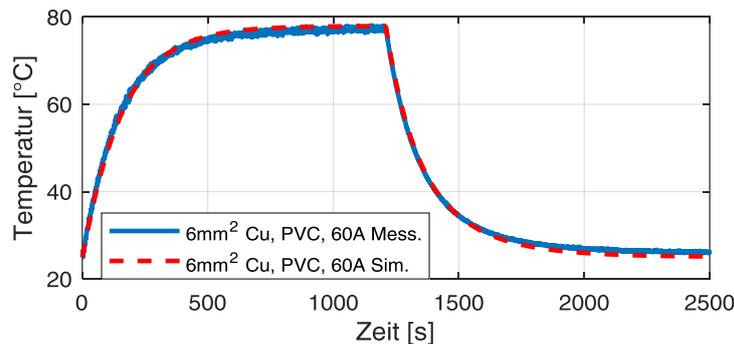


Bild 3: Vergleich zwischen dem gemessenen und simulierten Temperaturverlauf (6 mm², PVC, Kupfer, 60 A bei 0 – 1200 s)

2.2 Modellierung des axialen Wärmeflusses

Um die Einflüsse der Kontakte auf die Leitungstemperatur zu berücksichtigen, kann das ESB aus Abschnitt 2.1 – wie in Bild 4 dargestellt – erweitert werden, welches in der axialen Richtung aus mehreren Leitungssegmenten besteht. Die Wärmeflüsse zwischen benachbarten Segmenten erfolgen dabei jeweils im Leiter über zwei rechts und links angeordnete thermische Widerstände, die abhängig von der Länge des jeweiligen Segments l_{seg} , wie in Formel 6 berechnet werden. Die axiale Wärmeleitung in der Isolierung wird gegenüber der axialen Wärmeleitung im Leiter vernachlässigt.

$$R_{ax}' = \frac{l_{seg}/2}{\lambda \pi r_c^2} \quad (6)$$

Wie in Bild 4 ebenfalls zu erkennen, ist die Leitung an beiden Enden mit idealen Temperaturquellen abgeschlossen. Falls eine Erwärmung durch die Verluste an Kontakten zu berücksichtigen ist, können diese durch geeignete Kontaktmodelle ersetzt werden.

1A.x Modellbasierte intelligente Sicherungen mit umgebungsadaptiver Anpassung der Auslöseparameter

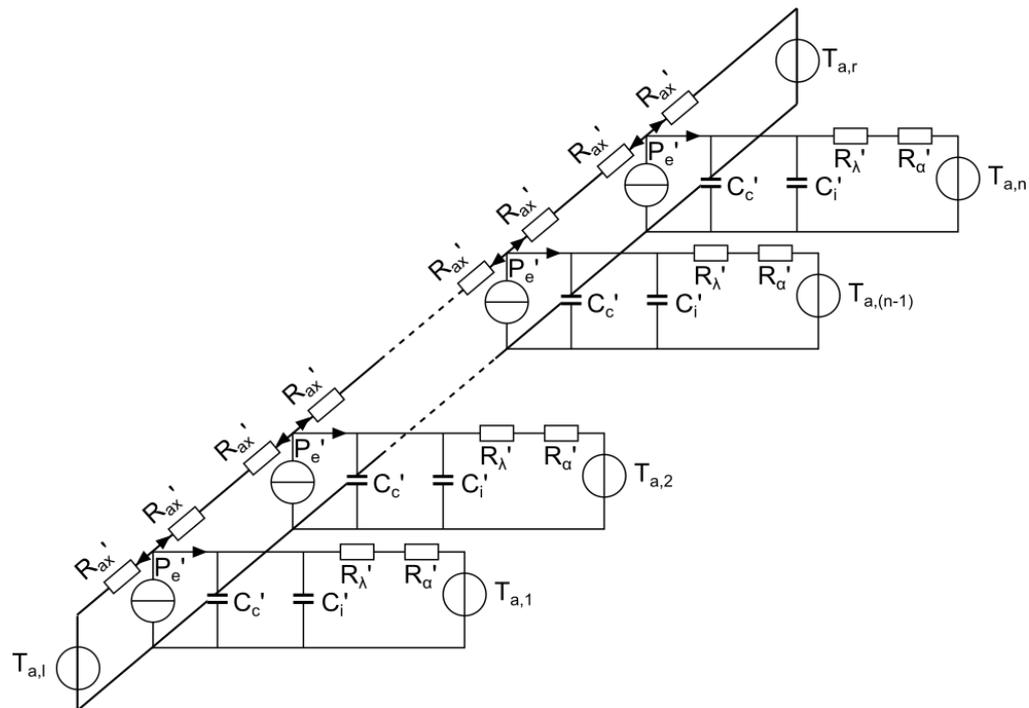


Bild 4: Erweiterung des thermischen ESB um axiale Wärmeflüsse

Bild 5 zeigt beispielhaft das berechnete Temperatur- (links) und Widerstandsprofil (rechts) für eine 10 mm²-Leitung (PVC, Kupfer) mit einer konstanten Umgebungstemperatur von 25 °C und einer Kontakttemperatur von 25 °C (rot) bzw. 60 °C (blau) und einem Strom von 100 A für unterschiedliche Leitungslängen. Die Struktur wurde mit 31 Segmenten diskretisiert (feiner an den Seiten). Die lineare Abhängigkeit des elektrischen Widerstands von der Leitungstemperatur ist dabei gut zu erkennen (siehe Formel 1). Die Reduzierung der maximalen Leitungstemperatur in der Leitungsmitte ab einer Länge von ca. 1 m durch die gute Wärmeleitung an den Leitungsenden ist ebenfalls sichtbar, wobei die Änderung der Kontakttemperaturen aufgrund von idealer Temperaturquellen ohne Verluste einen sehr geringen Einfluss auf die Temperatur in der Leitungsmitte hat.

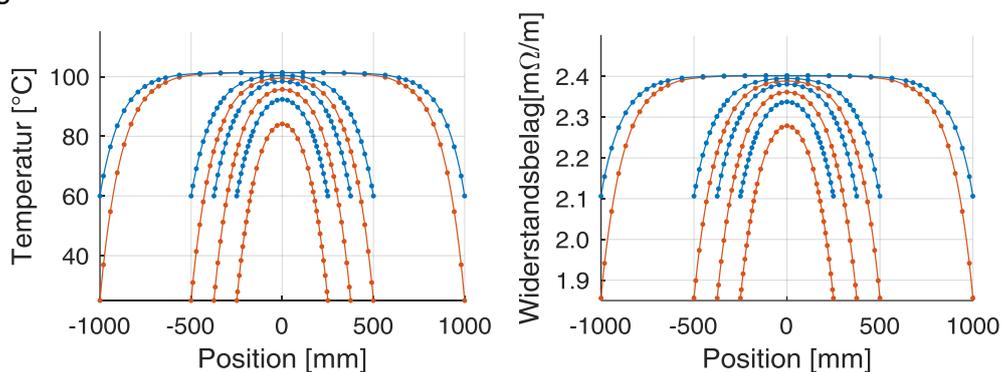


Bild 5: Einfluss der Leitungslänge auf das Temperatur- (links) bzw. Widerstandsprofil (rechts), Umgebungstemperatur: 25 °C, Kontakttemperatur: 25 °C (rot), 60 °C (blau)

Unterschiedliche Umgebungstemperaturzonen entlang der Leitung werden über die Temperaturquellen der einzelnen Segmente berücksichtigt. Hierbei können die Initial-

1A.x Modellbasierte intelligente Sicherungen mit umgebungsadaptiver Anpassung der Auslöseparameter

werte der thermischen Kapazitäten als Vereinfachung ebenfalls auf die jeweilige Temperatur gesetzt werden. Es ist dabei zu beachten, dass durch stark voneinander abweichenden Umgebungstemperaturzonen entlang der Leitung bzw. durch nichtphysikalische Initialwerten der thermischen Kapazitäten zu Beginn einer Simulation unrealistische Temperaturengleichvorgänge stattfinden können und diese ggf. zu falschen Ergebnissen führen können. Deshalb ist es hier notwendig, eine Simulation entweder mit den physikalischen Initialwerten zu starten oder die Leitung zu Beginn der Simulation ohne Strom zu simulieren, wodurch sich die korrekten Initialwerte automatisch ergeben.

2.3 Einfluss einer Bündelverlegung

Durch die Verlegung einer Leitung im Bündel kann sich das thermische Verhalten stark ändern. Im Gegensatz zu einer Einzelverlegung können hier die Konvektion und Strahlung abhängig von der Position der Leitung im Bündel teilweise oder komplett an der Bündeloberfläche stattfinden. Dadurch, dass die einzelnen Leitungen über die Wärmeleitung zwischen den einzelnen Leitungen stark thermisch miteinander verkoppelt sind, haben die thermische Kapazitäten und die Verluste der benachbarten Leitungen ebenfalls Einfluss auf die Temperatur einer zu modellierenden Leitung.

Beispielhafte Verlegung einer 10 mm²-Leitung (PVC, Kupfer) zentrisch in einem Bündel von ca. 2 cm Durchmesser und unter einer Umgebungstemperatur von 25 °C ist in Bild 6 gezeigt, wo die Temperaturverteilungen im Querschnitt bis zu dem stationären Zustand jeweils durch FEM (Finite-Elemente-Methode) für verschiedene Fälle berechnet wurde. Bild 7 zeigt die zeitlichen Temperaturverläufe der betrachteten Leitungen für diese Bündelverlegungen (a, b, c) und den Temperaturverlauf im Falle einer Einzelverlegung mit einer Umgebungstemperatur von 25 °C (braun) und von 85 °C (rot, Worstcase). Die Bündelverlegung (a) repräsentiert den Fall, dass die Leitung mit einem konstanten Nennstrom von 60 A belastet wird, aber keine der benachbarten Leitungen bestromt sind, wobei eine Verlegung des Bündels in Luft angenommen wurde. Hier erreicht die Leitung eine maximale Temperatur von ca. 40 °C. Dieser Wert liegt ca. 10 °C unter der Temperatur in der äquivalenten Einzelleitung (siehe Bild 7).

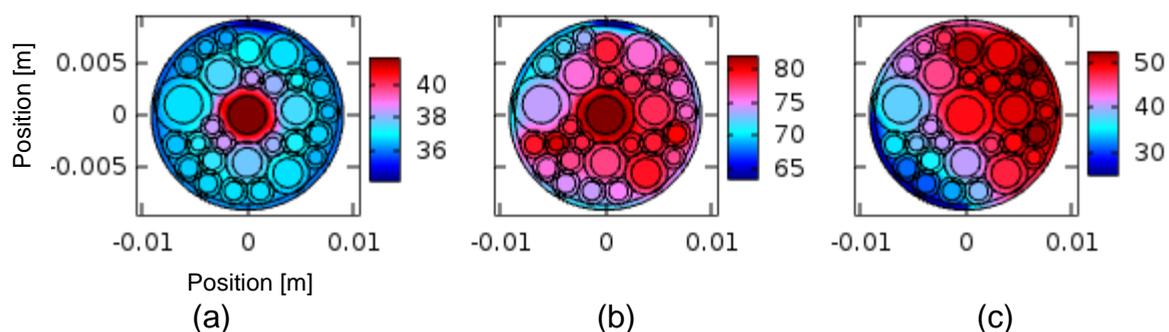


Bild 6: Stationäre Temperaturen im Querschnitt eines Kabelbündels aus einer FEM-Berechnung mit Bündelverlegung in Luft ohne (a) und mit (b) der Belastung der benachbarten Leitungen und Bündelverlegung auf einer thermisch gut leitenden Oberfläche, z.B. Karosserieblech, (c) mit Belastung der benachbarten Leitungen

1A.x Modellbasierte intelligente Sicherungen mit umgebungsadaptiver Anpassung der Auslöseparameter

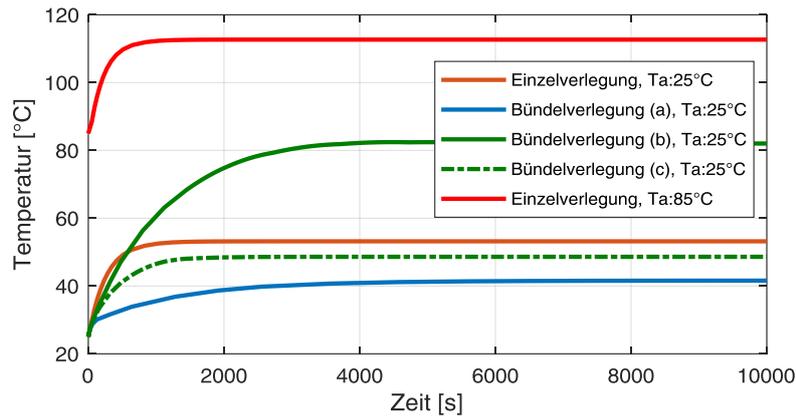


Bild 7: Vergleich des Temperaturverlaufs der Einzelverlegung in Luft mit einer Umgebungstemperatur von 25°C (braun) und 85°C (rot) mit Bündelverlegungen aus dem Bild 6

Falls mehrere benachbarte Leitungen auch mit ihren Nennströmen belastet werden, erreicht die Leitungstemperatur ca. 80 °C (b, grüner Verlauf), die wesentlich höher als bei der Einzelverlegung ist. Da bei der Dimensionierung bei Schmelzsicherungen oder auch bei der einfachen Implementierung der intelligenten Sicherung eine Worstcase-Umgebungstemperatur zu berücksichtigen ist, wie z.B. 85 °C, liegt jedoch die Temperatur der Leitung auch in diesem Fall aufgrund von geringer Umgebungstemperatur deutlich unter der Temperatur für Einzelverlegung. Dabei reduziert eine realistischere Verlegung wie z.B. auf dem Boden (c, 1/4 der Oberfläche liegt auf konstanter Umgebungstemperatur von 25°C) die Leitungstemperatur auf ca. 50 °C. Da in diesem Fall sowohl die Schmelzsicherung als auch die einfache Anwendung des Leitungsmodells mit Worstcase-Annahmen als intelligente Sicherung nur durch den Strom der zu schützenden Leitung beeinflusst werden, können diese zusätzlichen Belastungsreserven nur durch die Berücksichtigung der aktuellen Umgebungseigenschaften ausgenutzt werden. Dies kann z.B. indirekt durch eine ausreichend genaue Widerstandsmessung möglich sein, auf die im nächsten Abschnitt eingegangen wird.

In dem Fall, dass die Leitungen eine gleichmäßige Anordnung entlang des gesamten Bündels haben und keine benachbarten Leitungen bestromt sind, kann eine Bündelverlegung durch die Erweiterung der Leitungsmodelle in radialer Richtung um ein mehrgliedriges thermisches RC-Netzwerk, wie in Bild 8 dargestellt, angenähert werden.

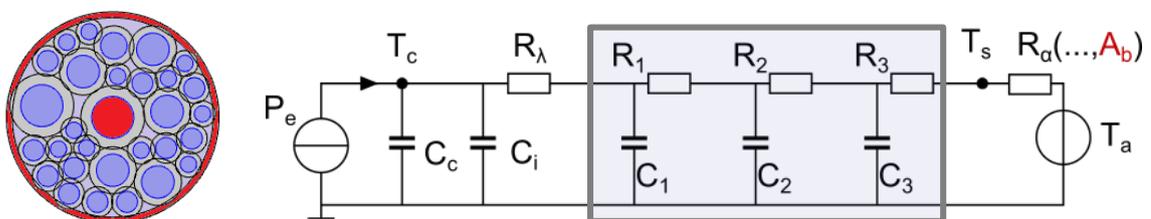


Bild 8: Die vereinfachte Modellierung einer Bündelverlegung ohne Belastung von benachbarten Leitungen durch Erweiterung des Einzelleitungsmodells

Es ist hier zu beachten, dass der thermische Widerstand R_α nicht mehr über die Leitungsoberfläche, sondern eine angenommene Bündeloberfläche (A_b) berechnet wird.

3 Temperaturberechnung durch Widerstandsmessung

Durch die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands einer Leitung ist es möglich über den gemessenen Widerstand auf die Temperatur der Leitung zu schließen, was auch als indirekte Temperaturmessung bekannt ist. Aufgrund von relevantem Temperaturbereich ist es für die Kfz-Leitungen ausreichend nur den linearen Temperaturkoeffizient (α_T) zu berücksichtigen. Formel 7 zeigt diesen Zusammenhang, der nach der Leitertemperatur T_c umgeformt ist, wobei R_c der aktuell gemessene Leiterwiderstand und R_{ref} der Referenzwiderstand für eine Referenztemperatur T_{ref} ist.

$$T_c = \left(\frac{R_c}{R_{ref}} - 1 \right) / \alpha_T + T_{ref} \quad (7)$$

Es ist zu beachten, dass diese Formel für einen gemessenen Leitungswiderstand nur dann gültig ist, wenn die Temperatur bzw. der Widerstandsbelag konstant entlang der Leitung sind. Eine präzise Messmethodik hierfür ist in Norm LV-112-3 zur Temperaturmessungen an Kfz-Leitungen für Einzelverlegung in Luft beschreiben. Um eine korrekte Widerstandsmessung zu ermöglichen, wird eine Vierpunktmessung an einem relativ langen Leitungsstück (mindestens 4 m) durchgeführt, wo der Spannungsabfall nicht über den Leitungsenden, sondern über einem mittleren Stück der Leitung, das ein gleichmäßiges Temperaturprofil hat, gemessen. Da am Fahrzeug die Spannungsmessung nur an den Leitungsenden möglich ist, ist dieses Verfahren nicht am Fahrzeug direkt anzuwenden. Bild 9 veranschaulicht dies durch Simulation für eine 4 m lange 10 mm^2 Leitung mit 100 A im stationären Zustand, wo links das resultierende Temperaturprofil und rechts das dazugehörige Widerstandsbelagsprofil dargestellt sind. Die Leitung ist an beiden Enden an idealen Kontakten angeschlossen und liegt unter einer Umgebungstemperatur von 25 °C in Luft.

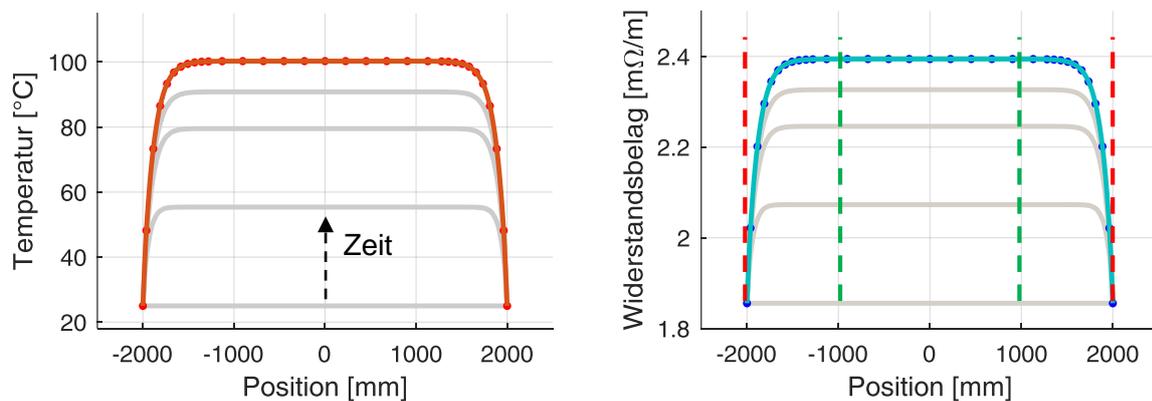


Bild 9: Temperatur- und Widerstandsprofil einer 10 mm^2 Leitung (PVC, Kupfer, 100 A)

Wie in Bild 9 (rechts) zu erkennen ist für die Berechnung der maximalen Leitungstemperatur der Widerstandsbelag in der Leitungsmitte erforderlich, der direkt nur durch Spannungsmessung zwischen grün gekennzeichneten Abgriffpunkten gemessen werden könnte. Falls der Widerstand zwischen den Leitungsenden gemessen wird (rot gekennzeichnet), ist ein Korrekturfaktor erforderlich, der in Abschnitt 3.2 betrachtet wird.

3.1 Erforderliche Messgenauigkeiten für indirekte Temperaturmessung

Für eine Leitungsabsicherung sind hohe Leitungstemperaturen relevant. In diesem Fall sind die Ströme in der Regel hoch. Der dadurch bedingte Spannungsabfall ist auch aufgrund seiner Größe noch mit vergleichsweise einfachen Methoden ausreichend genau messbar. Aus der Spannungs- und Strommessung wird der temperaturabhängige Widerstand berechnet. Um die Genauigkeit dieser indirekten Temperaturmessung bewerten zu können, wird im Folgenden die Temporauflösung bei verschiedenen Belastungsströmen und Spannungsmessfehlern für eine 1 m lange 10 mm²-Kupferleitung beispielhaft berechnet. Bild 10 (links) zeigt für drei Spannungsaufösungen, 1 mV, 5 mV und 10 mV, und einer Strommessgenauigkeit von $\pm 1\%$ mögliche Temporaufösungen. Aufgrund des linearen Zusammenhangs zwischen dem Leiterwiderstand und der Leitertemperatur (siehe Formel 7) ist dabei eine einfache Skalierung der Temporauflösung für weitere Querschnitte bzw. Leitungslängen möglich. Beispielsweise verdoppelt sich die Temperaturmessgenauigkeit durch die Verdopplung der Leitungslänge bzw. des Belastungsstroms oder durch die Halbierung des Querschnittes. In Bild 10 (rechts) ist die Zerstörkennlinie für diese Leitung im Falle einer PVC-Isolierung für eine Umgebungstemperatur von 25 °C bzw. 85 °C und Luftverlegung dargestellt, wo der Mindestzerstörstrom im Dauerbelastungsfall ca. 100 A bzw. 130 A beträgt. Bei diesen Strömen ist eine Messauflösung unter 2 K bei einer Spannungsauflösung von ca. 1 mV möglich. Für eine Spannungsauflösung von ca. 5 mV, welche z.B. mit einem 12-bit A/D-Wandler (auf vielen Mikrocontrollern verfügbar) möglich sein kann, ergibt sich eine Temporauflösung von ca. 7 K, was für eine Leitungslänge von 2 m oder einen Strom von 200 A 3,5 K bedeutet.

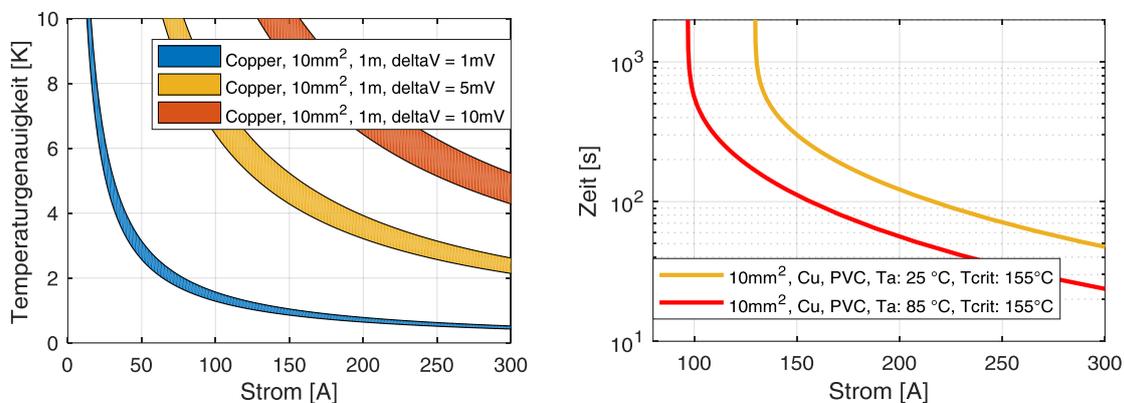


Bild 10: Temperaturmessauflösungen (links) und Zerstörkennlinie (rechts) für eine 10 mm² PVC-Leitung in Luftverlegung

Durch die Weiterentwicklung des Kfz-Bordnetzes und den immer größer werdenden Bedarf an einer umfangreichen Bordnetzdiagnose, insbesondere beim hochautomatisierten Fahren, ist zu erwarten, dass in zukünftigen Bordnetzen eine ausreichende Messgenauigkeit für viele Verbraucher sichergestellt ist.

1A.x Modellbasierte intelligente Sicherungen mit umgebungsadaptiver Anpassung der Auslöseparameter

3.2 Berücksichtigung des Einflusses von Umgebungstemperaturprofil

Wie bereits in Bild 9 gezeigt wurde hat das ungleichmäßige Temperaturprofil Einfluss auf den gemessenen Widerstand und damit die berechnete Temperatur der Leitung, wobei dieser Einfluss bei kürzeren Leitungen stärker ist. Dies wird nochmals veranschaulicht durch eine Beispielsimulation in Bild 11 für dieselbe Konfiguration, jedoch mit einer Leitungslänge von 1 m. Bild 11 (links) vergleicht den gemessenen Widerstandsbelag, der für 1 m dem Gesamtwiderstand entspricht, mit dem realen Widerstandsprofil für den stationären Fall. Es ist dabei zu erkennen, dass der berechnete durchschnittliche Widerstandsbelag um einen Faktor k erhöht werden muss, damit sich als gemessener Widerstand der maximale Widerstandsbelag in der Leitung ergibt, der für die korrekte Temperaturberechnung erforderlich ist. In Bild 11 (rechts) ist die Änderung des Widerstandsbelags über die Zeit vergrößert dargestellt.

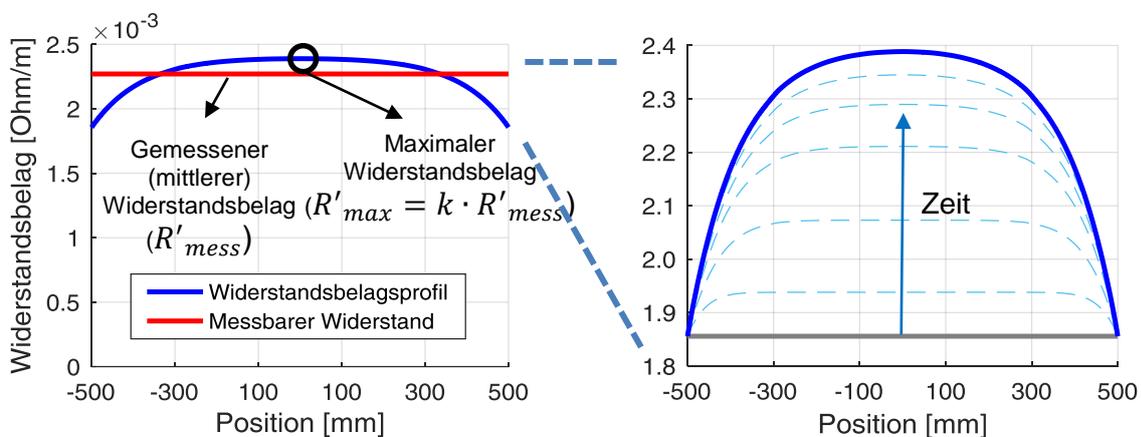


Bild 11: Vergleich des gemessenen Widerstandes mit dem realen Widerstand im Stationären Fall (a) und die zeitliche Änderung des Widerstandsbelages (b) (10 mm^2 , 1 m, Kupfer, PVC, 100 A, T_a : 25 °C)

Der Einfluss von unterschiedlichen Temperaturzonen entlang einer Leitung ist in Bild 12 für dieselbe Konfiguration dargestellt, wo links der vorgegebenen Umgebungstemperaturen und rechts die daraus resultierenden Widerstandsbelagsprofile für den stationären Fall in denselben Farben dargestellt sind. Die benötigten Korrekturfaktoren k sind dabei ebenfalls in den Legenden eingetragen ($R'_{max} = k \cdot R'_{mess}$). Dabei führt das Umgebungstemperaturprofil (4) zu dem höchsten Korrekturfaktor bzw. 1,125 und stellt damit den Worstcase dar, wo etwa mittig in 1/3 von der Leitung eine Temperatur von 85 °C und an den Kontakten jeweils 25 °C vorliegt.

1A.x Modellbasierte intelligente Sicherungen mit umgebungsadaptiver Anpassung der Auslöseparameter

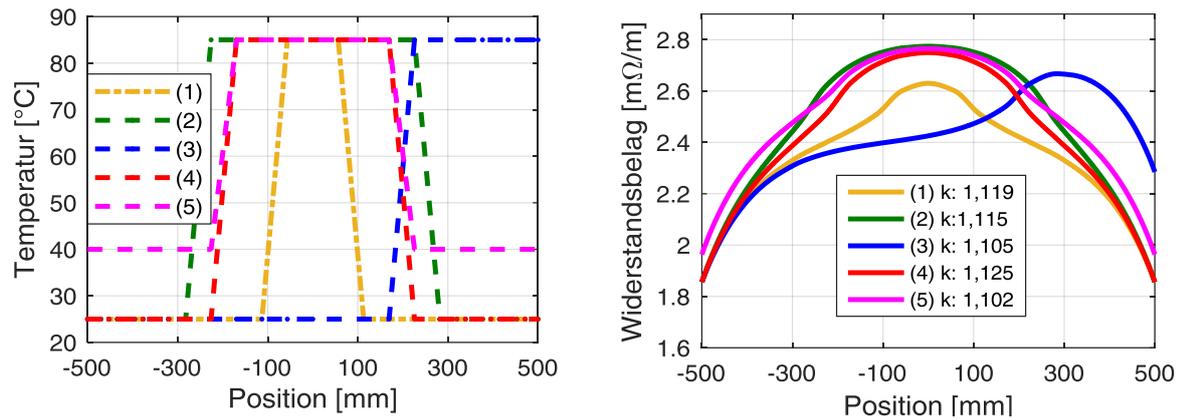


Bild 12: Profil des elektrischen Widerstandsbelags für unterschiedliche Umgebungstemperaturzonen (stationär)

Die Änderung der Breite der Temperaturzone mit 85 °C (4) beeinflusst den Korrekturfaktor nur gering bzw. 0,1 % und 0,6 % (1,2), während die Änderung der Positionen und Verwendung einer Kontakttemperatur von 85°C anstatt 25°C an der rechten Seite (3) zu einer Abweichung von ca. 2 % führt. Eine Erhöhung der seitlichen bzw. der Kontakttemperaturen von 25 °C auf 40 °C beeinflusst den Korrekturfaktor auch nur geringfügig (5). Die maximal ermittelte Abweichung von 2 % im Korrekturfaktor führt für den relevanten Temperaturbereich der Leitung zu einem akzeptablen Temperaturfehler von ca. 5 bis 8 K, welche durch Formel 7 berechnet werden kann. Es ist ebenfalls hier zu beachten, dass der Einfluss des Temperaturprofils bei einer längeren Leitung immer geringer wird und mit einer maximalen Temperaturvorgabe (z.B. 85°C) für die Temperaturzone und eine minimale Temperaturvorgabe für Kontakte der Worstcase für den Korrekturfaktor berücksichtigt ist.

Durch die Annahme, dass bei einem Bündel ein möglichst gleichmäßiger Querschnitt entlang der Leitung vorliegt und die Umgebungstemperaturzonen entlang der Leitung für die resultierenden Temperaturprofile maßgebend sind, soll im Folgenden der Korrekturfaktor k der Einzelverlegung für die Bündelverlegung verwendet werden. Damit ist es möglich den Korrekturfaktor bei der intelligenten Sicherung über das axial-discretisierte elektrothermische Leitungsmodell (Abschnitt 2.2) zeitabhängig zu berechnen, falls eine grobe Kenntnis über die (Worstcase-) Temperaturzonen und Kontakttemperaturen zur Verfügung steht.

4 Aufbau des Sicherungsmodells

In Bild 13 ist ein möglicher Aufbau einer Sicherungssteuerung auf Basis von den obigen Überlegungen schematisch dargestellt. Der Steuerung liegt ein Modell für die Temperaturberechnung aus dem elektrothermischen Leitungsmodell (a) und ein Modell für die Berechnung der Temperatur auf Basis des gemessenen Leitungswiderstands (b) zugrunde. Es wird davon ausgegangen, dass eine ausreichend genaue Messung des Spannungsabfalls (ΔV) und des Stroms (I) durch die Leitung zur Verfügung steht. Nach diesem Konzept soll das Sicherungsmodell im normalen Betrieb nach dem elektrothermischen Worstcase-Modell (a) arbeiten und beim Erreichen einer kritischen Leitungstemperatur (T_{6h} , z.B. 155 °C für PVC) auslösen. Eine frühzeitige

1A.x Modellbasierte intelligente Sicherungen mit umgebungsadaptiver Anpassung der Auslöseparameter

Auslösung ist jedoch durch die kontinuierliche Überwachung der Lebensdauer ebenfalls möglich (d), falls ein festgelegter Lebensdauerverbrauch überschritten wird (siehe Abschnitt 2.1). Sofern ein Bedarf für einen gezielten Überlastbetrieb besteht, schaltet die Sicherung auf die Temperaturberechnung um (c), wo der Korrekturfaktor k durch das elektrothermische Leitungsmodell zur Verfügung gestellt wird (b). Die Entscheidung, ob eine Widerstandsberechnung sinnvoller ist, kann im Sicherungsmodell abhängig von dem Belastungsstrom erfolgen. Es ist jedoch auch möglich dies durch eine übergeordnete Steuerung abhängig von zusätzlichen aktuellen Umgebungs- bzw. Belastungssituationen am Einbauort zu realisieren (f). Der Übergang zwischen den beiden Betriebsarten (c) erfolgt nicht schlagartig, sondern durch eine Tiefpassfilterung (e) über das Kontrollsignal. Dabei wird die Umschaltzeit über die Parameter t_s eingestellt.

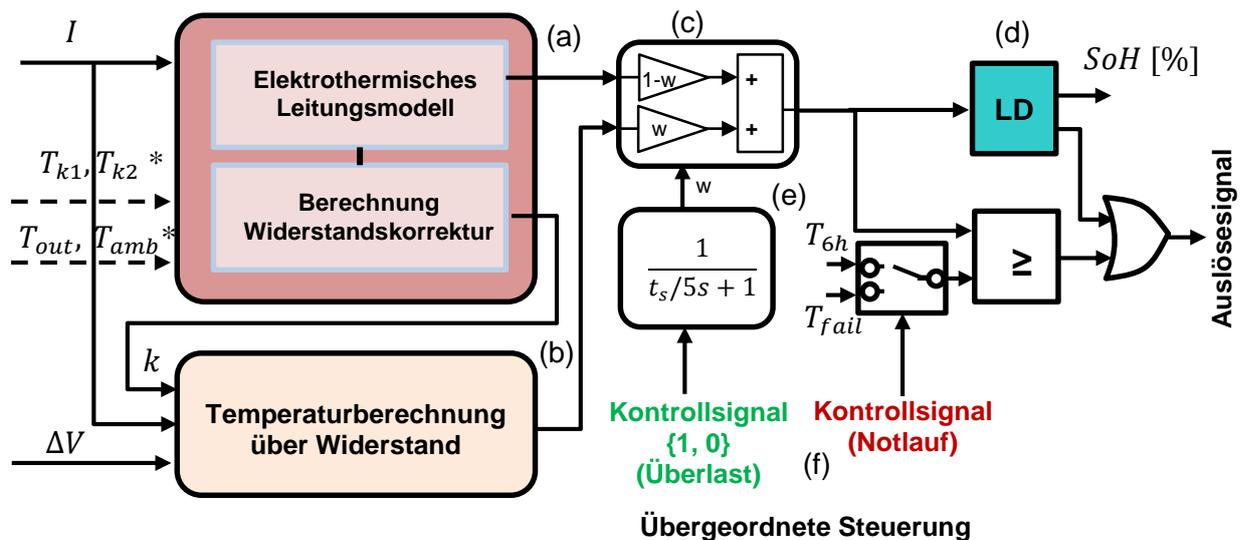


Bild 13: Schematischer Aufbau einer intelligenten Sicherung mit umgebungsadaptiver Anpassung (* optional)

In speziellen Notfallsituationen, in denen durch eine kurzzeitige Überlastung eines Verbrauchers ein sicherer Zustand erreicht werden kann, muss die Leitung den Verbraucher kurzzeitig mit sehr hohen Strömen versorgen. In diesem Fall kann das Modell ebenfalls eine viel höhere Leitungstemperatur als Auslösekriterium (T_{fail}) verwenden. Dabei ist mit einer starken Degradierung der Leitungsisolierung zu rechnen, was jedoch in zu gefährlichen Notfallsituation in Kauf genommen werden kann.

4.1 Auslösekriterien für intelligente Sicherung

Im Gegensatz zu den Schmelzsicherungen, kann das Auslösekriterium bei intelligenten Sicherungen beliebig gewählt werden. Da in den Normen bereits maximal zulässige Temperaturen für Isolierwerkstoffen der Kfz-Leitungen definiert sind, wie sie z.B. in Tabelle 1 für PVC-Leitungen (Temperaturklasse B) angegeben sind, können diese für die Festlegung einer Auslösetemperatur bei intelligenten Sicherungen dienen. Es ist zu beachten, dass diese belastungszeitspezifischen Temperaturen bei der Querschnittdimensionierung im Falle intelligenter Sicherungen ebenfalls berücksichtigt werden müssen. Wie in Tabelle 1 zu sehen, verbraucht eine PVC-Leitung ihre Lebensdauer bei einer Dauertemperatur von 105 °C innerhalb von 3000 Stunden, während sie bei 155 °C Dauertemperatur nur 6 Stunden belastet werden darf.

1A.x Modellbasierte intelligente Sicherungen mit umgebungsadaptiver Anpassung der Auslöseparameter

Klasse	Dauergebrauchstemperatur (3000 h)	Kurzzeittemperatur (240 h)	Temperatur für thermische Überlast (6 h)
B	(-40 bis 105) °C	(130 ± 3) °C	(155 ± 3) °C

Tabelle 1: Temperaturklasse B nach ISO 6722 bzw. LV 112-1

Falls eine Querschnittreduzierung durch intelligente Sicherung erfolgt, ist ebenfalls mit der Reduzierung der Lebensdauer zu rechnen. D.h. die Leitungstemperatur im normalen Betrieb muss auch bei intelligenten Sicherungen möglichst unter diesen zulässigen Temperaturen sein. Im Absicherungsfall mit viel höheren Strömen wie z.B. bei einem Kurzschluss kann die Temperatur für thermische Überlast (155 °C für PVC) als Auslösekriterium für intelligente Sicherungen verwendet werden. Problematisch bei intelligenten Sicherungen können jedoch längere Auslösezeiten sein, besonders wenn die intelligente Sicherung die Leitung bedingt durch eine präzise Abschätzung der Leitungstemperatur bis sehr nah an die kritische Temperatur über längere Zeit erwärmen lässt. Das gilt ebenfalls bei einem gezielten Überlastfall, wo die Leitung zwar ihre kritische Temperatur noch nicht erreicht aber aufgrund von höheren Temperaturen sehr schnell altert. Dabei kann als ein zweites Auslösekriterium die Alterung berücksichtigt werden, deren Abschätzung im Sicherungsmodell durch Implementierung von der bekannten Arrhenius-Gleichung, wie in Formel 8, erfolgen kann, wo A und b als materialabhängige Konstanten, k als die Reaktionsgeschwindigkeit z.B. in [1/h] interpretiert werden können und T die Temperatur in Kelvin ist.

$$k = Ae^{(-\frac{b}{T})} \quad (8)$$

Wie in Formel 8 zu erkennen besteht bei der Arrhenius-Gleichung ein linearer Zusammenhang zwischen dem natürlichen Logarithmus der Alterungsgeschwindigkeit k und dem Kehrwert der absoluten Temperatur. Die Lebensdauer (LD) berechnet sich für eine konstante Temperatur T wie folgt.

$$LD = \frac{1}{A} e^{\frac{b}{T}} \quad (9)$$

Für zwei bekannte Wertepaare von LD und T können dabei die Konstante A und b bestimmt werden. Durch die Verwendung von zwei Wertepaaren für PVC in Tabelle 1, nämlich 3000 Stunden / 105 °C bzw. 6 Stunden / 155 °C ergibt sich z.B. hierfür für A $4,3068 \cdot 10^{19}$ und für b 20123,5. Die verbrauchte Lebensdauer abhängig von einem beliebigen Temperaturverlauf ist durch das Integral über die Alterungsgeschwindigkeit abzuschätzen, wo das Erreichen des Wertes 1 den Ausfall der Leitung bedeutet. Die intelligente Sicherung kann über den simulierten Temperaturverlauf im Absicherungsfall oder auch bei einer gezielten Überlast diese berechnen und ebenfalls als ein zusätzliches Auslösekriterium verwenden. Zur Berechnung der verbleibenden Gesamtlebensdauer in [%] bzw. SoH (eng. „State of Health“) kann berechnet werden durch:

$$SoH [\%] = \left(1 - \int_0^{t_f} Ae^{(-\frac{b}{T(t)})} dt \right) \cdot 100 \quad (10)$$

5 Anwendungsbeispiel

Der vorgestellte Ansatz soll durch ein einfaches Szenario mit der konventionellen Sicherung und einem einfachem Sicherungsmodell verglichen werden. Es wird von einem Stromverbraucher mit einer für längere Zeit konstanten Stromaufnahme ausgegangen. Der maximale Nennstrom des Verbrauchers beträgt 40 A. Die passende Schmelzsicherung hierfür muss nach der Norm VW7512 einen Nennstrom des mindestens 1,25-fachen des Verbraucherstroms bzw. 50 A (MAXI50) besitzen. Es ergibt sich ebenfalls nach der Norm ein Leitungsquerschnitt von mindestens 6 mm², wobei im Folgenden als Leiter- bzw. Isolierungsmaterial von Kupfer bzw. PVC und von einer Leitungslänge von 1 m ausgegangen sind. Durch den Sicherheitsabstand zwischen Sicherung und Verbraucher wird sichergestellt, dass die Sicherung während des normalen Betriebs nicht auslöst. Bei intelligenten Sicherungen ist es durch die Stromüberwachung möglich, einen sinnvollen Stromwert als untere Grenze zu bestimmen, unter welchem die Auslösekurve angepasst sein kann. Es wird jetzt ein für längere Zeit konstanter Betriebsstrom von 40 A angenommen. Die Leitung nimmt einen stationären thermischen Zustand ein. Durch einen Fehler erhöht sich der Strom im nächsten Schritt auf ca. 70 A. Damit wird die Leitung überlastet. Bild 14 zeigt hierfür den Strom und der Temperaturverlauf an der Schmelzsicherung, wo die Sicherung ca. 90 Sekunden nach der Überlast durchschmilzt (Sicherungsmodell nach [5]).

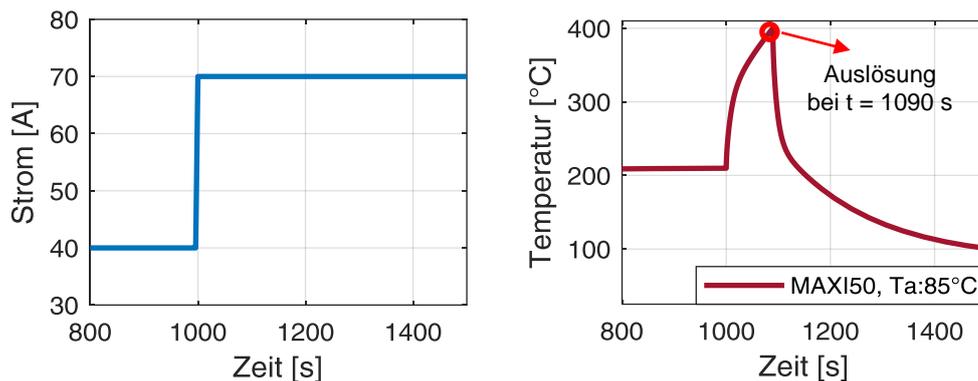


Bild 14: Vorgegebenes Stromprofil (links) und der resultierende Temperaturverlauf bei einer MAXI50-Sicherung mit Auslösung bei 1090 s (rechts)

Die zu sichernde Leitung soll sich zentrisch in einem Kabelbündel von einem Durchmesser von 10 cm befinden. Zur Vereinfachung wird angenommen, dass keine der benachbarten Leitungen bestromt ist und die Wärmeabgabe im Vergleich zu einer Einzelverlegung in Luft besser ist. Die Bündelverlegung wird in der Simulation, wie in Abschnitt 3.1. beschrieben wurde, durch ein erweitertes ESB berücksichtigt (RC-Parameter: $R'_{1,2,3}: [2.2, 0.05, 0.94] K/W \cdot m$, $C'_{1,2,3}: [0.31, 629, 1259] J/K/m$). Weiterhin soll sich die Leitung am Einbauort unter einer Temperatur von 60 °C befinden, wobei die Kontakte eine Temperatur von jeweils 40 °C und keine nennenswerte Verlustleistung erzeugen. Die Informationen über diese Temperaturen liegen jedoch nicht vor, wodurch bei der intelligenten Sicherung als Worstcase eine Umgebungstemperatur von 85 °C und als Kontakttemperaturen die Außentemperatur von 25 °C anzunehmen sind. Damit wird es sichergestellt, dass der berechnete Korrekturfaktor möglichst groß ist (siehe Abschnitt 3.1) und zu einer höher berechneten Temperatur führt. Bild 15 vergleicht die resultierenden Temperaturverläufe in der Simulation. Dadurch, dass die Bündelverlegung die Leitung abkühlt und auch die Umgebungstemperatur 60 °C

1A.x Modellbasierte intelligente Sicherungen mit umgebungsadaptiver Anpassung der Auslöseparameter

anstatt der Worstcase-Temperatur von 85 °C beträgt, liegt die Leitung unter dem normalen Betriebsstrom im Dauerbelastungsfall bei ca. 77 °C (schwarze Linie).

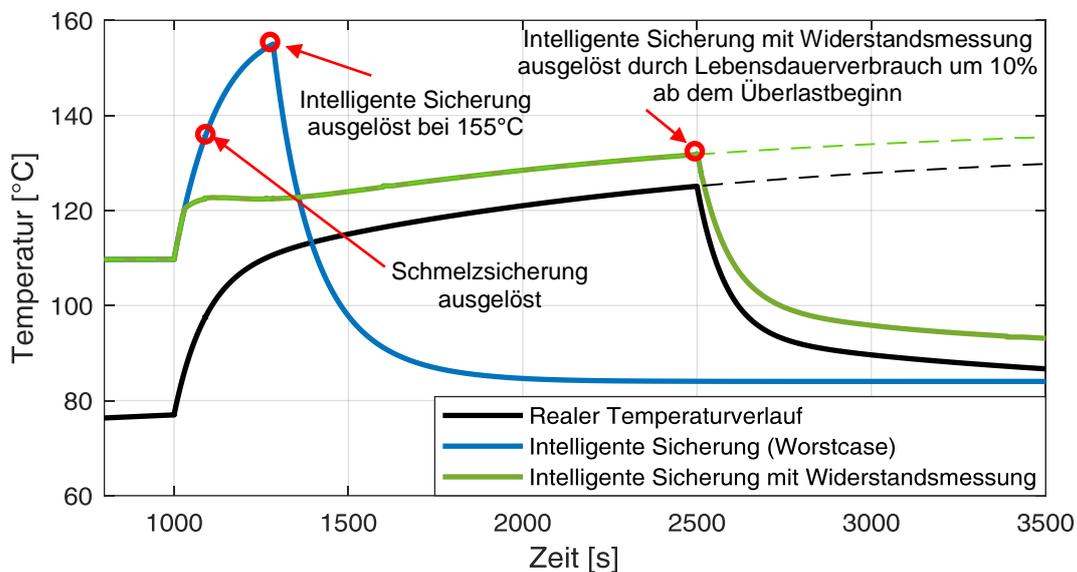


Bild 15: Vergleich der Temperaturverläufe von verschiedenen Sicherungsmodellen mit dem realen Temperaturverlauf

Das elektrothermische Leitungsmodell einer intelligenten Sicherung liefert dabei aufgrund von Worstcase-Parametrierung eine Temperatur von ca. 110 °C bei 40 A Dauerbelastung und löst im Überlastfall bei der kritischen Temperatur 155°C ca. 200 s nach der Schmelzsicherung (blauer Verlauf) aus. Ca. 30 Sekunden nach dem Überlastbeginn schaltet die Sicherung auf die indirekte Temperaturmessung um. Damit wird die Leitungstemperatur durch die Kombination des Leitungsmodells mit der Spannungsmessung mit guter Genauigkeit abgeschätzt, und eine Fehlauslösung wird vermieden. Die intelligente Sicherung berücksichtigt noch die Alterung der Leitung innerhalb der Überlastzeit und löst nach einem festgelegten Wert von ca. 10 % bzw. ca. 23 Minuten nach dem Überlastbetrieb aus. Das Ziel ist dabei, durch fehlerbedingten Überlastbetrieb eine ausreichende Zeit zu gewinnen, in der das Fahrzeug so schnell wie möglich in einen sicheren Zustand gebracht werden kann, was z.B. im Falle eines einem autonomen Fahrbetrieb von großer Bedeutung ist.

6 Zusammenfassung

Es wurde in diesem Beitrag ein neues Konzept für intelligente Sicherungen vorgestellt, bei dem das Modell sich durch Verfügbarkeit einer Spannungsmessung bei höheren Strömen und nur groben Informationen über die Temperaturen am Einbauort der Leitung anpassen und eine bessere Temperaturabschätzung für die Leitung ermöglichen kann.

Dem Sicherungsmodell liegen dabei ein elektrothermisches Leitungsmodell und eine indirekte Temperaturmessung zugrunde. Im normalen Betrieb wird das Auslösesignal durch das thermische Modell abhängig vom Laststrom und der Worstcase- Umgebungs- bzw. Kontakttemperaturen erzeugt, wenn die abgeschätzte Leitungstemperatur eine zulässige Grenze überschreitet. Durch die Auswertung des gemessenen Leiterwiderstands ermöglicht das Modell in einem Überlastfall eine bessere Temperaturabschätzung durch die Widerstandsmessung, wodurch eine Bündelverlegung bzw. lokale Umgebungstemperaturen indirekt berücksichtigt sind. Die erforderliche Messgenauigkeit für den Leiterwiderstand ist dabei durch die höheren Lastströme im Überlastfall realisierbar. Die Korrektur des gemessenen Widerstands aufgrund des ungleichmäßigen Temperaturprofils entlang der Leitung erfolgt zeitabhängig über das elektrothermische Leitungsmodell mit grob geschätzten (bzw. Worstcase) Umgebungs- und Kontakttemperaturen. Da die zu schützende Leitung durch diesen Ansatz bis an die zulässigen Temperaturgrenzen belastet werden kann, berücksichtigt das Modell als ein zweites Auslösekriterium die Alterung der Leitungsisolierung, die auf Basis der Angaben in den Normen über die Zeit mit Hilfe der Arrhenius-Gleichung näherungsweise berechnet wird.

Für den vorgestellten Ansatz wurde ebenfalls ein Anwendungsbeispiel vorgestellt, wo er mit der klassischen Schmelzsicherung und der einfachen intelligenten Sicherung verglichen wurde. Dabei führten sowohl die Schmelzsicherung als auch die klassische intelligente Sicherung aufgrund von Worstcase-Annahmen zu einer früheren Auslösung, obwohl die Leitung bedingt durch eine Bündelverlegung und geringere Umgebungstemperaturen noch Belastungsreserven hatte. Das Sicherungsmodell mit dem vorgestellten Ansatz hatte dabei eine bessere Temperaturabschätzung ermöglicht und konnte eine Überlast bis zu einer festgelegten zulässigen Alterung erlauben.

Für die Umsetzung des Ansatzes ist es erforderlich die vorausgesetzten Messgenauigkeiten für die Widerstandsmessung am Fahrzeug zu überprüfen. Weiterhin sollten die Einflüsse von Einbauorttemperaturen auf das longitudinale Temperaturprofil sowohl für die Einzelverlegung als auch für die Bündelverlegung durch Laborversuche näher untersucht werden.

Literaturverzeichnis

- [1] G. J. Anders, Rating of Electric Power Cables, USA: McGraw-Hill, 1997.
- [2] R. Marek and K. Nitsche, Praxis der Wärmeübertragung, München: Carl Hanser Verlag, 2012.
- [3] VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, VDI-Wärmeatlas, Karlsruhe: Springer, 2005.
- [4] A. Ilgevicus, Analytical and numerical analysis and simulation of heat transfer in electrical conductors and fuses, Neubiberg: Universität der Bundeswehr München, 2004.
- [5] P. Schwarz and J. Haase, "Erstellung einer VHDL-AMS Modellbibliothek für die Simulation von Kfz-Systemen," *FAT-Schriftenreihe*, vol. FAT 207, 2006.

1A.x Modellbasierte intelligente Sicherungen mit umgebungsadaptiver Anpassung der Auslöseparameter

Autoren / *The Authors:*

M. Sc. Selcuk Önal, TU Dortmund, Arbeitsgebiet Bordsysteme, Dortmund

M. Sc. Michael Kiffmeier, TU Dortmund, Arbeitsgebiet Bordsysteme, Dortmund

Prof. Dr.-Ing. Stephan Frei, TU Dortmund, Arbeitsgebiet Bordsysteme, Dortmund