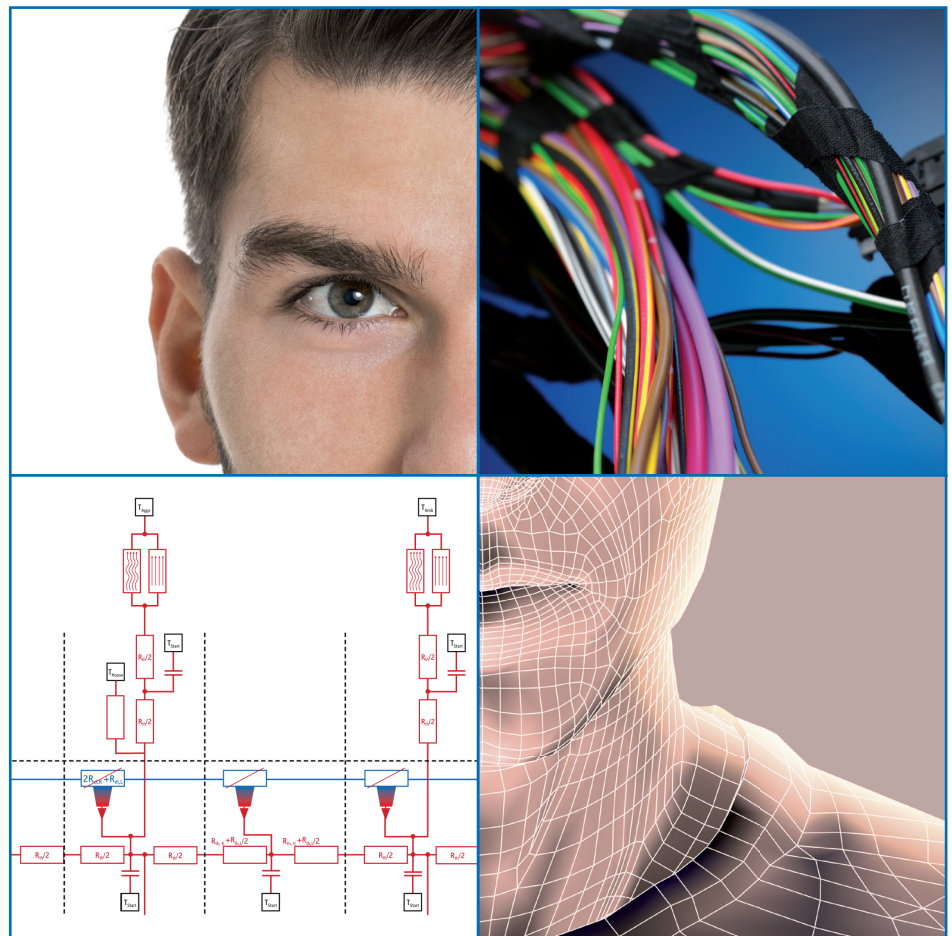


Thermosimulationsmodelle



Beteiligte Unternehmen:

Amphenol-Tuchel Electronics GmbH
BMW AG
Coficab Deutschland GmbH
Coroplast Fritz Müller GmbH & Co. KG
Daimler AG
Dräxlmaier Group
Gebauer & Griller Kabelwerke GmbH
Hirschmann Automotive GmbH
Huber + Suhner AG
Kostal Kontakt Systeme GmbH
Kromberg & Schubert GmbH
Leoni Bordnetz-Systeme GmbH
Leoni Kabel GmbH
Mennekes Elektrotechnik GmbH & Co. KG
Nexans autoelectric GmbH
Physical Software Solutions GmbH
Rosenberger Hochfrequenztechnik GmbH & Co. KG
TE Connectivity Germany GmbH
vancom GmbH & Co. KG
Volkswagen AG
Yazaki Europe Ltd.



Die Elektroindustrie

Technischer Leitfaden 0101 Thermosimulationsmodelle

Herausgeber:

ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik-
und Elektronikindustrie e. V.
Fachverband Kabel und isolierte Drähte
Minoritenstraße 9–11
50667 Köln

Verantwortlich: Sebastian Glatz

Telefon: +49 221 96228-16

E-Mail: kabel@zvei.org

www.zvei.org

März 2020

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist
urheberrechtlich geschützt.

Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des
Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des
Herausgebers unzulässig.

Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzung,
Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und
Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Inhalt

1 Einführung	5
1.1 Hintergrund	5
1.2 Ziel des Leitfadens	5
1.3 Gültigkeitsbereich	6
1.3.1 Anwendungsszenarien	6
1.3.2 Genauigkeit	6
2 Gemeinsamer Teil	7
2.1 Beschreibung des Ersatzschaltbilds	7
2.1.1 Farbgebung	7
2.2 Allgemeine Symbole	7
2.2.1 Ausrichtung des Ersatzschaltbilds	7
2.3 Elektrische Komponenten	10
2.3.1 Joulesche Wärmequelle	10
2.4 Thermische Komponenten	11
2.4.1 Thermischer Widerstand	11
2.4.2 Thermische Masse / Thermische Kapazität	12
2.4.3 Konvektionswiderstand	12
2.4.4 Strahlungswiderstand	13
2.5 Anmerkungen zu den Leitungsscheiben	14
2.6 Ableitung der Werte	16
2.6.1 Elektrischer Widerstand	16
2.6.2 Thermischer Widerstand	16
2.6.3 Thermische Masse	17
3 Spezieller Teil / Subsysteme	18
3.1 Spezialfälle im Leitungssatz	18
3.1.1 Joulesche Wärmequelle für das Leitungselement	18
3.1.2 Wärmeleitung durch die Isolation	18
3.1.3 Entwärmung über Strahlung und Konvektion	18
3.2 Spezialfälle im Steckersystem: Buchse	19
3.2.1 Joulesche Wärmequelle für das Kontaktelement (alternativ)	19
3.2.2 Joulesche Wärmequelle für den Leitungswiderstand der Buchse	20
3.2.3 Wärmeleitung vom Kontaktpfad zum Aggregategehäuse	21
3.2.4 Wärmeleitung vom Kontaktpfad zur Gehäuseoberfläche der Stiftwanne im Aggregat	21
3.2.5 Entwärmung über das Buchsengehäuse zur Umgebung	21
3.3 Spezialfälle im Steckersystem: Stiftwanne	23
3.3.1 Joulesche Wärmequelle für den Stift	23
3.3.2 Entwärmung von Stiftwanne zum Aggregateinneren	23
3.3.3 Entwärmung über die Stiftwanne ins Innere des Aggregats	23
3.4 Austausch der Parameter	24
3.5 Verifikation des übergebenen Modells	26
3.6 Sicherheitstoleranzen für Steckverbinder	27
4 Leitungen	29

5 Stecker	32
5.1 Anwendungsbeispiel	32
5.1.1 Einpoliger ungeschirmter Steckverbinder	32
5.1.2 Zweipolige ungeschirmte Buchsenstecker mit Wärmeaustausch über Gehäuse	33
5.1.3 Zweipolige ungeschirmte Stiftwanne mit Wärmeaustausch über Aggregat	34
5.1.4 Einpoliger geschirmter Steckverbinder	35
5.2 Validierung	39
5.3 Umgebungsbedingungen	39
6 Ermittlung der Parametersets	40
6.1 Leitungen	40
6.1.1 Basisparameter für ungeschirmte Einzelleitungen	40
6.1.2 Kompakte Parameter für ungeschirmte Einzelleitungen	41
6.1.3 Basisparameter für geschirmte Einzelleitungen	42
6.1.4 Kompakte Parameter für geschirmte Einzelleitungen	43
6.1.5 Formeln zur Bestimmung der kompakten Parameter	43
6.2 Stecker	48
6.2.1 Vorgeschlagener Testaufbau zur Bestimmung der thermischen Eigenschaften von HV-Steckverbindern	48
6.2.2 Herleitung der Modellparameter	49
6.3 Geometriaufbereitung	50
6.4 Definition der Schnittgrenzen	55
6.4.1 Systemgrenze zur Leitung	55
6.4.2 Übergangswiderstand Kabelinnenleiter	55
6.4.3 Innenleiter Buchse	55
6.4.4 Wärmestrom von Kern zu Schirm	56
6.4.5 Crimp/Schirmübergang	56
6.4.6 Wärmestrom durch den Schirmleiter	56
6.4.7 Wärmeleitung durch das Gehäuse	56
6.4.8 Entwärmung über das Gehäuse	56
6.5 Kontaktdefinition	56
6.6 Randbedingungen und Analyse	57
6.7 Elektrische Verlustleistung und axialer thermischer Widerstand	57
6.7.1 Axialer Wärmestrom durch Einprägen	57
6.7.2 Radialer Wärmestrom	57
6.8 Auswertung und Überführung der Parameter für die Systemsimulation	58
6.9 Notwendige Gleichungen	59
6.10 Crimp/Übergangswiderstand (IL)	59
6.11 Buchse	59
6.12 Kontaktfeder	59
6.13 Wärmeleitung Kern zu Schirm	59
6.14 Crimp/Übergangswiderstand Schirmung	59
6.18 Entwärmung über Gehäuse	59
7 Literaturverzeichnis	60

1 Einführung

1.1 Hintergrund

Bei der Auslegung von Leitungssätzen wird heute noch vielfach auf die Stromerwärmungs- und Dera-ting-Kurven zurückgegriffen, die in den Datenblättern der verwendeten zylindrischen Leitungen und Kontaktsysteme von den Herstellern angegeben werden. In der Konzeptphase stehen daher die für eine FEM- oder CFD-Simulation notwendigen 3D-Daten noch nicht zur Verfügung. Und auch in späteren Entwicklungsphasen erweist sich der Aufwand zur Thermosimulation eines automobilen Leitungssatzes mit den oben genannten Methoden zumeist als unverhältnismäßig hoch.

Die üblichen Kennlinien der Datenblätter sind nur für den eingeschwungenen Zustand gültig, und die Wärmeleitung entlang von Leitungen lässt sich mithilfe von Datenblättern nicht angemessen beurteilen. Deshalb bleiben Optimierungspotenziale, die sich aus der thermischen Trägheit des Leitungssatzes ergeben, und Entwärmungseffekte durch axiale Wärmeleitung oftmals ungenutzt.

Gerade der HV-Leitungssatz bietet sich für die Thermosimulation an, denn

- er weist eine einfache Struktur auf und besteht zumeist aus Punkt-zu-Punkt-Verbindungen einzelner Leitungen,
- eine Änderung des Nennquerschnitts um nur eine Stufe hat bereits signifikante Auswirkungen auf Kosten, Gewicht und Bauraum,
- die elektrischen Ströme auf den Leitungen sind gut kalkulierbar, da sie jeweils nur durch eine oder sehr wenige Parameter definiert werden.

Zur Auslegung eines Leitungssatzes kann eine Ungenauigkeit der Simulation in der Größenordnung weniger Kelvin (K) ohne Weiteres akzeptiert werden. Die Verwendung der hochkomplexen und damit rechenzeitintensiven FEM-Modelle ist deshalb nicht notwendig. Durch die Berücksichtigung der Rotationssymmetrie ist eine weitere, wesentliche Vereinfachung der Simulationsmodelle möglich.

Die Simulationsmethode der „Thermischen Netze“, auf der alle weiteren Darstellungen beruhen, hat sich für HV-Leitungssätze als ausgesprochen effizient und erstaunlich präzise erwiesen. Die üblichen Simulationszeiten für das dynamische Verhalten eines Leitungsstrangs liegen unter einer Minute. Vergleichsmessungen belegen die Genauigkeit im Bereich der Messtoleranz.

1.2 Ziel des Leitfadens

Auch wenn die Struktur eines thermischen Netzes relativ einfach ist, so sind dessen Entwicklung und die Bestimmung der Parameter nicht trivial. Es ist also naheliegend, dass die thermischen Netze von Leitungen und Steckverbinder kooperativ entwickelt und genutzt werden sollten.

Es gibt vielfältige Simulationswerkzeuge für thermische Netze, die in der Regel Teilfunktionen von größeren Programmpaketen sind. Die Entscheidung für eine solche Entwicklungsumgebung erfolgt üblicherweise längerfristig, sodass es weder möglich noch sinnvoll wäre, sich für die gemeinsame Entwicklung thermischer Netze auf ein einziges Entwicklungswerkzeug (Tool) zu verständigen.

Leider existiert bislang kein Standardformat für den toolunabhängigen Austausch thermischer Netze. Das Ziel der Partner, die den vorliegenden Leitfaden erstellt haben, war es dennoch, einen unternehmensübergreifenden Austausch von Modellen zu ermöglichen. Dazu wurden die Bausteine, d. h. generische Teilmodelle, die zur Modellierung von Steckverbindern und Leitungen notwendig sind, zusammengestellt und ihre Parametersätze in diesem Leitfaden definiert.

Zum Austausch von thermischen Modellen zwischen Entwicklungspartnern genügen nun die Referenzierung der jeweiligen Bausteine aus diesem Leitfaden sowie die Angabe des zugehörigen Parametersatzes. Jeder Entwicklungspartner kann die genutzten Bausteine in einer Bibliothek in dem von ihm genutzten Tool ablegen.

Dieser Leitfaden enthält nicht nur einen Katalog der Simulationsbausteine sowie ihrer „kompakten“ Parameter, sondern auch Anleitungen, wie diese kompakten Parameter aus den „Basisparametern“, also den physikalischen Eigenschaften der verwendeten Werkstoffe und Bauteile, ermittelt werden können.

Zur Ermittlung der Parameter für Steckverbindermodelle sind entweder Messungen oder Simulationen notwendig. Dieser Leitfaden enthält auch eine Anleitung zu diesen Messungen und stellt somit sicher, dass thermische Simulationen, die auf Modellen dieses Leitfadens basieren, zu vergleichbaren Ergebnissen führen.

1.3 Gültigkeitsbereich

1.3.1 Anwendungsszenarien

Die Modelle, die mittels dieses Leitfadens erstellt werden, können dazu dienen, einen HV-Leitungssatz für seinen Arbeitsbereich korrekt auszulegen.

Dieses Simulationsmodell hat innerhalb des in der Automobilbranche üblichen Umgebungstemperaturbereichs (-40 °C bis 125 °C) sowie bis zur Grenztemperatur der verwendeten Materialien bis 180 °C Gültigkeit.

Die Hersteller der Meterwaren und Steckverbinder haben bei der Erarbeitung dieses Leitfadens die grundlegende Struktur und die kompakten Parameter der Komponenten so definiert, dass die dem Anwender zur Verfügung gestellten Daten eine hinreichende Genauigkeit innerhalb der definierten Temperaturbereiche und für übliche Betriebsstromprofile abbilden.

Irreversible Vorgänge, wie beispielsweise Relaxation oder Korrosion durch unzulässige Übertemperaturen und Effekte durch Kurzschlüsse wie Levitation und Lichtbögen werden durch die Modelle nicht abgebildet und müssen gesondert betrachtet werden.

Bei zweipoligen HV-Steckverbindern fließt über beide Kontakte betragsmäßig der gleiche Strom. In den Modellen wird jeweils für beide Kontakte der gleiche Widerstand angenommen. Da sich somit beide Kontakte thermisch gleich verhalten und keine Wärme zwischen den Kontakten fließt, wurde in der Regel auf eine Modellierung des thermischen Pfads zwischen den Kontakten verzichtet.

Eine Alterung von Kontakten wird durch unterschiedliche Kontaktwiderstände für neue und gealterte Teile berücksichtigt.

Für die Berechnung der Konvektion an der Oberfläche von Leitungen und Steckverbindern stehen sowohl stark vereinfachte Modelle, die einfach zu parametrisieren sind, als auch detailliertere, präzise Modelle zur Verfügung. Details zu diesen Modellen sind jedoch nicht Inhalt dieses Dokuments.

1.3.2 Genauigkeit

Die Modelle dienen hauptsächlich der Auslegung der Leitungssätze, wie sie in der Konzeptphase der Automobilentwicklung stattfindet. In dieser Phase liegen in der Regel noch keine CAD-Daten vor und Umgebungstemperaturen können nur abgeschätzt werden.

Die Genauigkeit der vorliegenden Modelle ist weit höher als notwendig angesichts der Ungenauigkeit, die sich zwangsläufig durch die unklaren Rahmenbedingungen ergibt.

Bei der Verwendung der Modelle in späteren Entwicklungsphasen kann eine Simulationsgenauigkeit im Rahmen der Messtoleranz erreicht werden. Auslegungsprämisse für die vorliegenden Modelle war ein Simulationsfehler von wenigen Kelvin.

Die Methode der thermischen Netze lässt auch zu, die Leitungssatzmodelle durch applikationsspezifische Elemente zu ergänzen, die über den Umfang des vorliegenden Leitfadens hinausgehen. Beispiele hierfür finden sich im Teil Ausblick des Leitfadens.


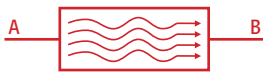
2 Gemeinsamer Teil

2.1 Beschreibung des Ersatzschaltbilds

2.1.1 Farbgebung

Da generell mindestens zwei verschiedene physikalische Teilbereiche in einem thermischen Ersatzschaltbild implementiert werden, ist es empfehlenswert, eine farbliche Unterscheidung der physikalischen Domänen einzuführen:


Tab. 1: Domänen des Ersatzschaltbild

Physikalische Domäne	Farbgebung	Beispiel
Elektrodynamik	Blau	Stromquelle: 
Thermodynamik	Rot	Konvektion: 

2.2 Allgemeine Symbole

Es ist oft auch notwendig, nicht physikalische, rein mathematische Konstrukte zu verwenden, beispielsweise um einen Datenausgang (z.B. Temperaturabgriff) zu nutzen oder um Konstanten zu übergeben, etwa die Umgebungstemperatur zu definieren oder eine Stromstärke einzustellen. Solche mathematischen Werte werden im Ersatzschaltbild schwarz eingefärbt.

Tab. 2: Konstanten

Name	Symbol	Schnittstellen
Konstante		Ausgang

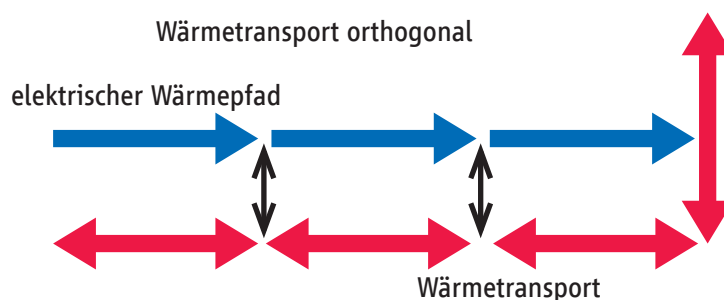
2.2.1 Ausrichtung des Ersatzschaltbilds

Die Leserichtung der Schaltbilder wird entlang der Hauptstrompfade (elektrische und thermische Lastpfade), auf denen die primären Transportmechanismen stattfinden, von links nach rechts definiert. Die Wärmetransportpfade zum Wärmeaustausch mit der Umgebung werden vertikal zu den Lastpfaden im Ersatzschaltbild eingezeichnet.

2.2.1.1 Horizontale Ausrichtung

Der elektrische Lastpfad spiegelt den Stromfluss entlang der Leiter wider, der primäre Wärmetransportpfad den Temperaturfluss entlang der Leiter. Beide Mechanismen können miteinander wechselwirken (beispielsweise über joulesche Erwärmung). Der sekundäre Wärmetransport betrifft den Wärmetransport orthogonal von einem Leiter weg zu einem weiteren Leiter, zu Kunststoffkomponenten oder zur Umgebung und wird vertikal eingezeichnet.

Abb. 1: Wärmetransportpfad

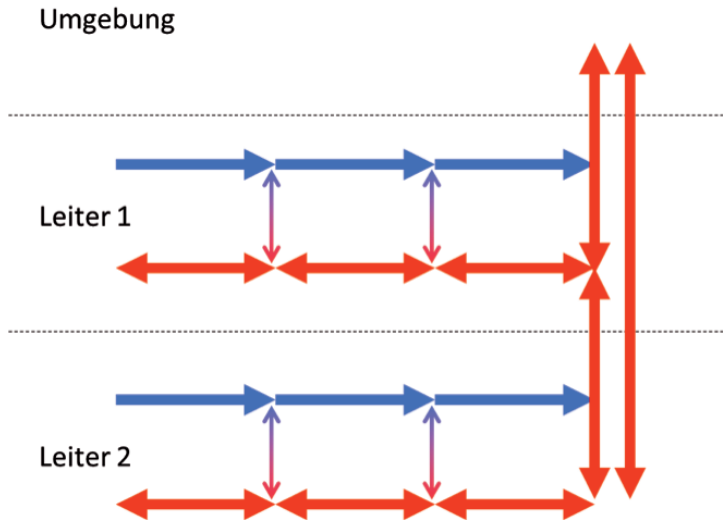


Quelle: ZVEI

2.2.1.2 Anordnung im Ersatzschaltbild

Neben der Schreib- und Leserichtung für den primären Wärmetransport entlang des Lastpfads soll auch festgelegt werden, wie die generelle Anordnung aussehen soll:

Abb. 2: Anordnung des Wärmetransports



Quelle: ZVEI

Generell sollen die vertikalen Wärmepfade, die mit der Umgebung wechselwirken (z. B. Konvektion, Strahlung und Wärmeleitung an andere Komponenten), im oberen Teil des Ersatzschaltbilds arrangiert sein. Die Ersatzschaltbildkomponenten für die Lastpfade sollen räumlich getrennt zueinander und unter der Umgebung aufgetragen werden.

2.2.1.3 Geometrische Interpretation und Repräsentation im Ersatzschaltbild

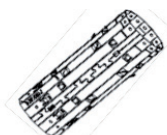
Um thermische Eigenschaften von komplexen Bauteilen in der Simulation abzubilden, ist es notwendig und zweckmäßig, Vereinfachungen vorzunehmen. Eine solche Vereinfachung ist die Rückführung auf einfache geometrische Formen.

Abb. 3: Vereinfachung von Bauteilen



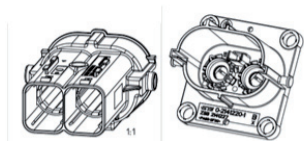
Innenleiter, Drahtbündel, Kontaktstift → Zylinder

Quelle: Gebauer & Grilller



Schirmwicklung, Isolierung, Schirmgitter → Hohlzylinder

Quelle: ZVEI



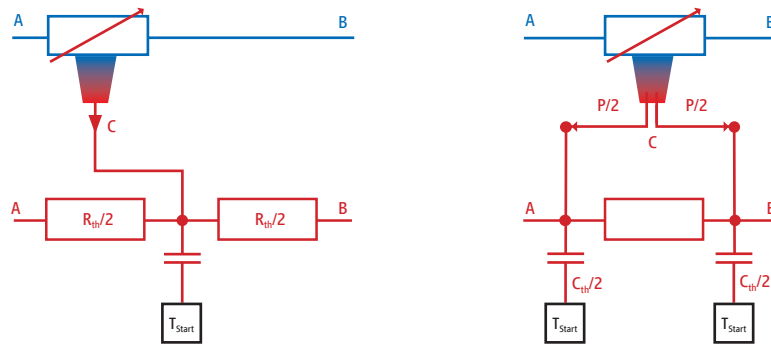
Stiftwanne & Steckergehäuse → Zylinder

Quelle: TE

Um die Wärmetransfermechanismen korrekt im Ersatzschaltbild abzubilden, ist es notwendig, dass die Anbindung von Quellen und Senken berücksichtigt wird. Es gibt zwei Ansätze, die identisch sind, aber Auswirkungen auf die Anbindung von Quellen und Senken haben:

Der erste Ansatz basiert auf einer T- bzw. Y-Struktur, der zweite auf einer Anordnung der Komponenten in einer Pi-förmigen Struktur:

Abb. 4: Anordnung der Komponenten T- und Y-Struktur

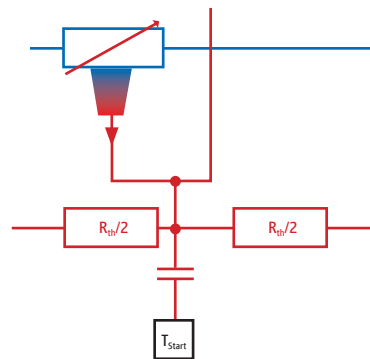


Quelle: ZVEI

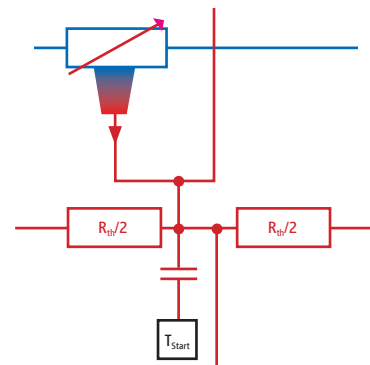
Bei der hier gezeigten Ersatzschaltung handelt es sich um eine repräsentative Darstellung für einen elektrischen Leiter ohne äußere Wärmeabgabe. Das heißt, dass die einzigen Wärmetransportpfade entlang des Leiters zu finden sind. Da es bei vielen Bauteilen notwendig und sinnvoll ist, auch radiale Wärmeleitung zu betrachten, ist es zweckmäßig, sich auf das Modell in der Y-Struktur zu stützen. Es kann entsprechend wie folgt erweitert werden:

Abb. 5: Anordnung der Komponenten Y-Struktur

Modell mit einem vertikalen Wärmepfad



Modell mit zwei vertikalen Wärmepfaden z. B. Leiter z.B. Geflechtsschirm



Quelle: ZVEI

In dem linken Ersatzschaltbild wird hierbei die radiale Wärmeleitung nach außen, beispielsweise von einem Leiter auf eine Isolation, berücksichtigt. Das rechte Ersatzschaltbild ist eine Erweiterung, die nun auch die Wärmeleitung nach „unten“ berücksichtigt. Dieses Ersatzschaltbild repräsentiert beispielsweise einen Schirm, der über eine innere Isolation mit dem Leiter und über eine äußere Isolation (Mantel) mit der Umgebung wechselwirkt.

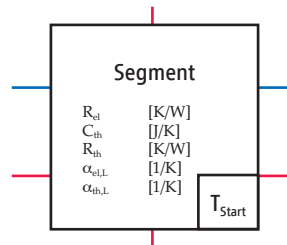
Verallgemeinert kann das rechte Ersatzschaltbild für alle Komponenten verwendet werden, wobei je nach Anwendung die senkrechten Wärmeleitpfade gegebenenfalls nicht angeschlossen werden.

Da bei dem thermischen Ersatzschaltbild mehrere solcher Bausteine zusammenschaltet werden, lassen sich auch die einzelnen Komponenten zusammenfassen (z. B. Reihenschaltung von Widerständen), um das vollständige Ersatzschaltbild zu vereinfachen. Zur Visualisierung ist es dabei zweckmä-

Big, eine einheitliche Schaltungsanordnung in Blöcken abzubilden, die dann in einem übersichtlichen Blockschaltbild zusammengefasst werden können. Die entsprechenden Parameter der einzelnen Bauelemente sowie die Startbedingungen müssen entsprechend übergeben werden.

Die Y-Struktur ist wie folgt dargestellt:

Abb. 6: Blockschaltbild der Y-Struktur



Quelle: ZVEI

Die waagerechten Ein- und Ausgänge spiegeln den elektrischen und thermischen Pfad der Strom- und Wärmeleitung von und zum nächsten Segment wider. Die senkrechten Abgänge sind Anschlüsse zu weiter innen und außen liegenden thermischen Elementen (z. B. Isolations- und Gehäuseelemente).

2.3 Elektrische Komponenten

In diesem Kapitel werden die elektrischen Komponenten des Ersatzschaltbilds beschrieben.

2.3.1 Joulesche Wärmequelle

Es gibt im Ersatzschaltbild eine Schnittstelle zwischen der Thermodynamik und der Elektrodynamik in Form der jouleschen Erwärmung. Bei dieser Wärmequelle wird elektrischer Strom in Wärmeleistung umgesetzt.

Das entsprechende Element im thermischen Ersatzschaltbild enthält somit drei Schnittstellen. Die Schnittstellen A und B sind Schnittstellen in der elektrodynamischen Domäne. Sie entsprechen den Ein- und Ausgängen für den elektrischen Strom. Die Schnittstelle C betrifft die thermodynamische Domäne und prägt einen Wärmestrom in das Ersatzschaltbild ein.

Tab. 3: Ersatzschaltbild der jouleschen Erwärmung

Name	Symbol	Schnittstellen
Joulesche Erwärmung		A: Stromeingang B: Stromausgang C: Wärmestrom / Leistung Ausgang

2.3.1.1 Mathematische Beschreibung

Die joulesche Erwärmung kann beschrieben werden über Formel (1)

$$\dot{Q} = I^2 \cdot R_{el} \text{ oder } P = I^2 \cdot R_{el} \quad (1)$$

wobei \dot{Q} bzw. P den Wärmestrom oder die elektrische Verlustleistung beschreibt und I den elektrischen Strom. Der Parameter R stellt den elektrischen Widerstand dar und hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie etwa Dimension, Material und Temperatur des Körpers. Die Einbeziehung der Temperaturabhängigkeit des Widerstands erfolgt in erster Näherung über den linearen Temperaturkoeffizienten α_{el} .

$$R_{el}(T) = R_{el,0} \cdot (1 + \alpha_{el} \cdot (T - T_0)) \quad (2)$$

In Gleichung (2) gibt hierbei $R_{el,0}$ den elektrischen Widerstand bei der Referenztemperatur $T = T_0$ an. Diese Temperatur liegt in der Regel bei $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, aber auch Temperaturen von $T_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ oder $T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ finden Verwendung. Sofern keine anderen Angaben vorhanden sind, gilt die Referenztemperatur von $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

2.3.1.2 Physikalische Einheit

Die Komponente liefert den Wärmestrom in der Einheit Watt [W].


2.4 Thermische Komponenten

In diesem Kapitel werden die thermischen Komponenten des Ersatzschaltbilds beschrieben.

2.4.1 Thermischer Widerstand

Der thermische Widerstand eines Körpers ist reziprok zur thermischen Leitfähigkeit definiert und gibt an, welche Temperaturdifferenz sich an dem Körper bei einem eingepprägten Wärmestrom einstellt. Im thermischen Ersatzschaltbild enthält der thermische Widerstand zwei Schnittstellen: die thermischen Ein- und Ausgänge.

Tab. 4: Ersatzschaltbild thermischer Widerstand

Name	Symbol	Schnittstellen
Thermischer Leitwiderstand		A: Thermischer Port B: Thermischer Port

2.4.1.1 Mathematische Beschreibung

Der Wärmestrom \dot{Q} , der mit der Leistung P über die Schnittstellen in das thermische Netzwerk eingekoppelt wird, ist der Quotient aus der Temperaturdifferenz ΔT und dem thermischen Widerstand R_{th} , vgl. Formel (3).

$$\dot{Q} = P = \Delta T / R_{th} \quad (3)$$

Der thermische Leitwiderstand R_{th} kann, vergleichbar zu einem elektrischen Widerstand, von der Temperatur abhängen, und bei der Berechnung kann ein linearer thermischer Temperaturkoeffizient $\alpha_{R_{th}}$ berücksichtigt werden.

$$R_{th}(T) = R_{th,0} \cdot (1 + \alpha_{R_{th}} \cdot (T - T_0)) \quad (4)$$

In Gleichung (4) gibt hierbei $R_{th,0}$ den thermischen Leitwiderstand bei einer Referenztemperatur $T = T_0$ (üblicherweise $20 \text{ }^\circ\text{C}$) an. Zur Berechnung von $R_{th}(T)$ im Volumen des Körpers nach Formel (4) wird dabei vereinfachend für T der Mittelwert der Temperaturen an den Schnittstellen A und B verwendet:

$$T = (T_A + T_B) / 2 \quad (5)$$

Für einige Darstellungen ist es vorteilhaft, mit dem Leitwert Y_{th} statt dem Widerstand zu rechnen. In diesen Fällen gilt die folgende Beziehung:

$$R_{th} = \frac{1}{Y_{th}} \quad (6)$$


2.4.1.2 Physikalische Einheit

Der Leitwiderstand der Komponente wird in der Einheit Kelvin/Watt [K/W] beschrieben. Der Leitwert wird dementsprechend in der Einheit Watt/Kelvin [W/K] angegeben.

2.4.2 Thermische Masse / Thermische Kapazität

Die thermische Masse oder auch thermische Kapazität spiegelt die Wärmemenge wider, die ein Körper bei einer Temperaturänderung aufnehmen kann. Damit ist die thermische Kapazität, analog zu dem elektrischen Pendant, dafür verantwortlich, das zeitliche Systemverhalten abzubilden. In physikalischer Hinsicht spiegelt die thermische Kapazität das Volumen des Körpers und seine Materialeigenschaften wider. Eine thermische Schnittstelle stellt somit den Eingang dar, von welchem ein Wärmezu- bzw. -abfluss stattfindet, während die andere Schnittstelle an die Temperatur zu Messbeginn angeschlossen ist – bei Simulationsbeginn im Gleichgewicht wird dies die Umgebungstemperatur sein.

Tab. 5: Ersatzschaltbild thermische Kapazität

Name	Symbol	Schnittstellen
Thermische Kapazität		<p>A: Thermischer Port</p> <p>Der zweite Port wird an die initiale Bedingung angeschlossen, keinesfalls an andere Bauteile!</p>

2.4.2.1 Mathematische Beschreibung

Der Wärmestrom \dot{Q} , der mit Leistung P über die Schnittstellen in das thermische Netzwerk gekoppelt wird, ist das Produkt aus der thermischen Kapazität C_{th} und der zeitlichen Änderung der Temperatur $\frac{dT}{dt}$, vgl. Formel (7).

$$\dot{Q} = P = C_{th} \cdot \frac{dT}{dt} \quad (7)$$

Die thermische Kapazität ergibt sich aus der Masse des Volumenkörpers m und der spezifischen Wärmekapazität c des Materials. Alternativ zu der Masse kann auch das Volumen V und die spezifische Dichte ρ benutzt werden.

$$C_{th} = m \cdot c \Leftrightarrow C_{th} = V \cdot \rho \cdot c \quad (8)$$

Analog zu dem linearen Temperaturkoeffizienten für elektrische und thermische Widerstände kann auch ein linearer Temperaturkoeffizient $\alpha_{C_{th}}$ für thermische Kapazitäten definiert werden. Unter Berücksichtigung dieses Koeffizienten erfolgt somit für die Kapazität:

$$C_{th}(T) = C_{th,0=T_0} \cdot (1 + \alpha_{C_{th}} \cdot (T - T_0)) \quad (9)$$


2.4.2.2 Physikalische Einheit

Die Kapazität der Komponente wird in der Einheit Joule/Kelvin [J/K] bzw. Wattsekunde/Kelvin [Ws/K] beschrieben.

2.4.3 Konvektionswiderstand

Die Konvektion beschreibt den Wärmeübertrag von einem Körper auf ein strömendes Medium. Hierbei spielen verschiedenste Größen des Mediums eine Rolle. Auf Seite des Körpers, an dessen Oberfläche thermische Konvektion stattfindet, gehen die Oberfläche und im Extremfall auch geometrische Faktoren ein, die die Strömung beeinflussen und zum Beispiel Verwirbelungen und Turbulenzen verursachen. Der Konvektionswiderstand beschreibt somit reziprok die Größe des Wärmetransports über Konvektion.

Tab. 6: Ersatzschaltbild Konvektionswiderstand

Name	Symbol	Schnittstellen
Konvektionswiderstand		<p>A: Thermischer Port</p> <p>B: Thermischer Port</p>

2.4.3.1 Mathematische Beschreibung

Der Wärmestrom, der über die Schnittstellen ausgetauscht wird, lässt sich über die Temperaturdifferenz $\Delta T = T_A - T_B$ beschreiben, wobei T_A und T_B die Temperaturen der am Wärmeaustausch beteiligten Partner widerspiegeln.

$$\dot{Q} = P = \alpha_{\text{Conv}} \cdot A \cdot \Delta T \quad (10)$$

Hierbei repräsentiert A die Oberfläche des Körpers zum Wärmeaustausch und α_{Conv} ist der Wärmeübergangskoeffizient.

Der Konvektionsleitwert $Y_{\text{th,Conv}}$ ist wie folgt definiert:

$$Y_{\text{th,Conv}} = \alpha_{\text{Conv}} \cdot A \quad (11)$$

Für die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten müssen Parameter wie die Wärmeleitfähigkeit des Fluids, die charakteristische Länge, die Strömungsgeschwindigkeit, die Dichte, die Viskosität und die spezifische Wärmekapazität herangezogen werden. Der Wert ist aufgrund seiner Einflussgrößen von der Temperatur abhängig. Es sollte eine Wertetabelle sinnvoll angegeben werden oder einfacher die Werte aus dem VDI-Wärmeatlas verwendet werden.

Der Konvektionswiderstand $R_{\text{th,Conv}}$ ist der Kehrwert des Konvektionsleitwerts $Y_{\text{th,Conv}}$.

$$R_{\text{th,Conv}} = \frac{1}{Y_{\text{th,Conv}}} \quad (12)$$

$$\dot{Q} = P = \frac{\Delta T}{R_{\text{th,Conv}}} \quad (13)$$


2.4.3.2 Physikalische Einheit

Der thermische Konvektionswiderstand $R_{\text{th,Conv}}$ wird in der Einheit Kelvin/Watt/ [K/W] angegeben.

2.4.4 Strahlungswiderstand

Wärmestrahlung beschreibt den Wärmeaustausch zwischen zwei Körpern bzw. die Wärmeabgabe eines Körpers in eine Umgebung. In diesem Fall lässt sich die Umgebung als Körper mit der Temperatur T_B ansehen.

Tab. 7: Ersatzschaltbild des Strahlungswiderstands

Name	Symbol	Schnittstellen
Strahlungswiderstand		A: Thermischer Port B: Thermischer Port

2.4.4.1 Mathematische Beschreibung

Der Wärmestrom, der über die Schnittstellen ausgetauscht wird, lässt sich nach dem Stefan-Boltzmann-Strahlungsgesetz über die Temperaturdifferenz zwischen einer Oberfläche und seiner Umgebung beschreiben, wobei T_A und T_B die Temperaturen der am Wärmeaustausch beteiligten Partner widerspiegeln. Im Falle der Strahlung in die Umgebung ist T_A mit der Oberflächen- und T_B mit der Umgebungstemperatur gleichzusetzen.

$$\dot{Q} = P = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_A^4 - T_B^4) \quad (14)$$

Der Parameter ε gibt in diesem Zusammenhang den Emissionsgrad des strahlenden Körpers und A seine Oberfläche an. σ ist die Stefan-Boltzmann-Konstante.

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} \quad (15)$$

Der Emissionsgrad ε ist eine dimensionslose Zahl und liegt zwischen 0 (idealer weißer Körper) und 1 (idealer schwarzer Körper). Die folgende Formel definiert den Wärmeübergangskoeffizienten für Strahlung α_{Rad} .

$$\alpha_{Rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \frac{T_A^4 - T_B^4}{T_A - T_B} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_A + T_B) \cdot (T_A^2 + T_B^2) \quad (16)$$

Bezieht man mit Benutzung von α_{Rad} die übertragene Leistung auf die Temperaturdifferenz, ergibt sich daraus die Formel für den thermischen Strahlungsleitwert.

$$Y_{th, Rad} = \frac{P}{T_A - T_B} = \alpha_{Rad} \cdot A \quad (17)$$

2.4.4.2 Physikalische Einheit Strahlungsleitwert

Der Strahlungsleitwert wird in der Einheit Watt/Kelvin [W/K] angegeben.

2.4.4.3 Beispielwerte für den Emissionsgrad ε

Die Emissionsgrade, die zu berücksichtigen sind, weisen je nach Substrat starke Unterschiede und Temperaturabhängigkeiten auf (siehe Literaturverzeichnis [1], [2]):

Tab. 8: Exemplarische Werte für die Emissionskoeffizienten verschiedener, relevanter Materialien

Material	Emissionsgrad ε		Anmerkung
	bei T = 293 bis 300 K	bei T = 600 K	
Aluminium (poliert)	0,04	0,05	(h)
Aluminium (eloxiert)	0,82		(h)
Kupfer (poliert)	0,03	0,04	(h)
Silber (poliert)	0,02	0,03	(h)
Schwarze Farbe	0,98		(h)
Gummi	0,92		(n)

Die in der Spalte Anmerkung gelisteten Buchstaben geben die Art der Emissionskoeffizienten an – hier wird zwischen der Gesamtstrahlung (hemisphärisch = h) und der Strahlung zur Flächennormale (normale = n) unterschieden.

2.4.4.4 Physikalische Einheit Strahlungswiderstand

Der Strahlungswiderstand wird in der Einheit Kelvin/Watt [K/W] angegeben.

2.5 Anmerkungen zu den Leitungsscheiben

Die Parameter der Leitungsscheiben beschreiben einen Leitungsabschnitt mit der Einheitslänge $L_c = 1$ m bei einer Temperatur von 20 °C. Auch die Temperaturkoeffizienten für Widerstände, thermische und elektrische Leitfähigkeit sowie die spezifische Wärmekapazität beziehen sich jeweils auf die Basiswerte bei 20°C.

Für die Simulation des Temperaturabfalls der Leitung an einer Komponente ist es notwendig, mehrere Leitungsscheiben in kleineren Längen als einen Meter in einer Reihenanordnung zu simulieren.

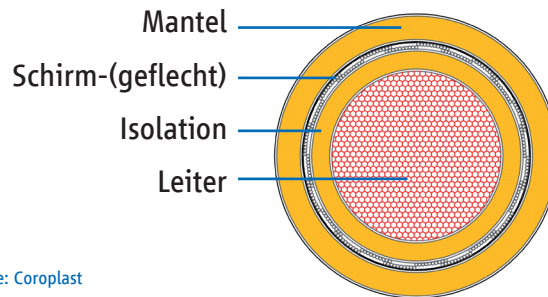
Es wird dabei die folgende Vereinfachung verwendet: Zwischen den einzelnen Leitungsscheiben werden nur Wärmeströme in metallischen Aufbauelementen (Leiter, Schirm) in axialer Richtung berücksichtigt, Wärmeströme in axialer Richtung in Isolation und Mantel werden **nicht** betrachtet.

Die thermischen Widerstände mehrerer Leitungsscheiben in axialer Richtung $R_{th,ax}$ sind in Serie geschaltet und addieren sich daher. Die thermischen Widerstände mehrerer Leitungsscheiben in radialer Richtung $R_{th,rd}$ sind parallel geschaltet, daher müssen nicht die thermischen Widerstände, sondern ihre thermischen Leitwerte $Y_{th,rd}$ addiert werden.

Auch bei der Strahlung und Konvektion handelt es sich um radiale thermische Widerstände, die daher auch als thermische Leitwerte behandelt werden müssen.

Bei der Umrechnung der längenbezogenen Leitungsparameter von einem Meter auf die tatsächliche, für die Simulation benötigte Länge muss berücksichtigt werden, ob es sich bei dem Parameter um eine axiale (Serienschaltung), radiale (Parallelschaltung) oder eine richtungsunabhängige Größe (thermische Kapazität, Temperaturkoeffizient) handelt.

Abb. 7: Aufbauelemente einer Leitung



Quelle: Coroplast

Tab. 9: Umrechnung der Leitungsparameter auf Leitungsscheiben

Bezeichnung	Formelzeichen	Phys. Einheit	Symbol	Umrechnung
Thermischer Widerstand in axialer Richtung	$R_{th,ax}$	K/W		$R_{th,ax,LS} = R_{th,ax,1m} \cdot L \text{ [m]}$
Thermischer Widerstand in radialer Richtung	$Y_{th,rd}$	W/K		$R_{th,rd} = \frac{R_{th,rd,1m}}{L \text{ [m]}}$
Thermische Kapazität, thermische Masse	C_{th}	W·s/K		$C_{th,LS} = C_{th,1m} \cdot L \text{ [m]}$
Elektrischer Widerstand	R_{el}	Ω		$R_{el,LS} = R_{el,1m} \cdot L \text{ [m]}$
Linearer Temperaturkoeffizient des thermischen Widerstands	α_{Rth}	1/K	–	keine Umrechnung erforderlich
Linearer Temperaturkoeffizient des thermischen Leitwerts	α_{Yth}	1/K	–	keine Umrechnung erforderlich
Linearer Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstands	α_{Rel}	1/K	–	keine Umrechnung erforderlich
Linearer Temperaturkoeffizient der thermischen Kapazität	α_{Cth}	1/K	–	keine Umrechnung erforderlich

Die Umgebungstemperatur T_a ist auch gleichzeitig die Temperatur der Elemente am Beginn der Simulation T_{Start} .

Die physikalische Einheit der Temperaturen wird vom Simulationsprogramm vorgegeben und ist entweder $^\circ\text{C}$ oder K.

2.6 Ableitung der Werte

Ein essenzieller Punkt liegt in der Vorgehensweise zur Bestimmung der Werte für die einzelnen Komponenten.

2.6.1 Elektrischer Widerstand

Der elektrische Widerstand lässt sich über mehrere Ansätze bestimmen:
Für einfache Volumenkörper kann man den elektrischen Widerstand über

$$R_{\text{el}} = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (18)$$

bestimmen, wobei l die Länge des Körpers und A die Querschnittsfläche beschreibt. ρ ist der spezifische Widerstand.

Im Gegensatz zu den einfachen ohmschen Widerständen treten in der Realität aber auch noch zusätzliche Widerstände auf, die in einem gesteckten Steckverbinder dominant sind. Diese sind zum einen der Kontaktwiderstand zwischen den beiden Steckpartnern und zum anderen der Widerstand, der im Bereich des Übergangs vom Stecker zur Leitung / zur Stromschiene herrscht. Hier treten Widerstände für Schraubverbindungen, Crimpwiderstände oder Schweißwiderstände auf, die für Hochleistungssteckverbinder dominant gegenüber den Leitwiderständen sein können.

Diese Widerstände lassen sich teilweise auch mathematisch bestimmen, jedoch ist es zielführend, die Widerstände zu vermessen. Hierzu muss der Steckverbinder bestromt werden und der Spannungsabfall muss an verschiedenen Stellen bestimmt werden. Idealerweise erfolgt die Messung an vier Messstellen, um dem Detaillierungsgrad des thermischen Modells zu genügen. Durch eine 3D-Simulation kann bei bekanntem ρ und genauer Geometrie ebenfalls ein genaues Ergebnis erzeugt werden.

Bei bekannter Stromstärke I kann der ohmsche Widerstand R anschließend über den Spannungsabfall U berechnet werden:

$$R_{\text{el}} = \frac{U}{I} \quad (19)$$

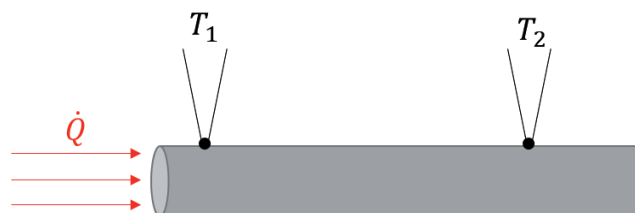
2.6.2 Thermischer Widerstand

Der thermische Widerstand lässt sich analog dem elektrischen Widerstand auf mehrere Arten bestimmen. Für einfache Komponenten bietet sich ein rechnerischer Ansatz an:

$$R_{\text{th,cond}} = \frac{l}{\lambda \cdot A} \quad (20)$$

So lässt sich (20) anwenden, um für einfache Geometrien den thermischen Leitwiderstand zu ermitteln, wobei l die Länge des Körpers, A die Querschnittsfläche und λ die Wärmeleitfähigkeit angibt. Bei komplexen Geometrien ist es vorteilhaft, auf FEM-Modelle zurückzugreifen. Hierzu wird in das Bauteil ein definierter Wärmestrom \dot{Q} oder P eingepreßt, und die Temperaturdifferenz $\Delta T = T_1 - T_2$ zwischen zwei Messpunkten kann genutzt werden, um den thermischen Widerstand über Gleichung (21) zu bestimmen.

Abb. 8: Thermischer Widerstand in FEM-Modellen



Quelle: ZVEI

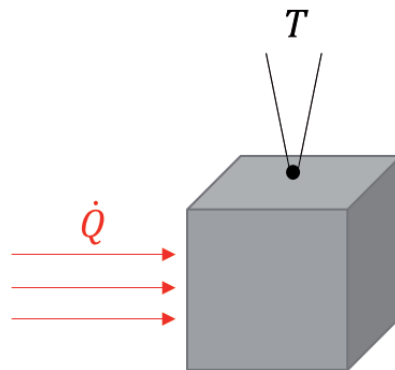
$$R_{\text{th,cond}} = \frac{\Delta T}{P} \quad (21)$$

2.6.3 Thermische Masse

Bei der thermischen Masse kann im ersten Schritt auf CAD-Daten zurückgegriffen werden. Dazu werden von den betroffenen Komponenten die Volumina V und die Dichte ρ der verwendeten Materialien ermittelt. Mit der spezifischen Wärmekapazität c lässt sich die thermische Masse C_{th} , wie in Gleichung (7) beschrieben, bestimmen.

Auch FEM lässt sich nutzen, um die thermischen Kapazitäten zu ermitteln. Dafür wird das Modell in Volumenelemente unterteilt und die zugeführte Wärmeenergie der Elemente und die damit einhergehende Erwärmung gemessen.

Abb. 9: Thermische Kapazität in FEM-Modellen



Quelle: ZVEI

Über (7) ergibt sich dann die thermische Kapazität zu:

$$C_{th} = \frac{dQ}{dT} \quad (22)$$

wobei Q die Wärmeenergie angibt, die in das Volumenelement eingeprägt wird:

$$Q = \int_{\tau=0}^t \dot{Q}(\tau) d\tau \quad (23)$$

3 Spezieller Teil / Subsysteme

3.1 Spezialfälle im Leitungssatz

3.1.1 Joulesche Wärmequelle für das Leitungselement

Der Leiter weist einen elektrischen Widerstand auf, sowie zwei Elemente für die axiale Wärmeleitung entlang des Leiters, außerdem eine thermische Kapazität, die die thermische Masse der Leitung repräsentiert.

Tab. 10: Ersatzschaltbild Leiter

Name	Symbol	Blockdarstellung
Leiter		

*) Der lineare Temperaturkoeffizient für die spezifische thermische Leitfähigkeit, α_{Rth} , und der lineare Temperaturkoeffizient für die spezifische Wärmekapazität, α_{Cth} , der Metalle und Polymere sind optional. Sie werden auf 0 gesetzt, wenn sie nicht verwendet werden. Sie beziehen sich jeweils auf die Basiswerte bei 20°C.

Beim Erstellen der Programmbibliotheken ist darauf zu achten, das hier dargestellte Modul als Leitungselement zu referenzieren. In der Verwendung als Leiter, Kontaktfeder, Buchse oder Stecker wird dann jeweils eine Instanz des Moduls erstellt.

3.1.2 Wärmeleitung durch die Isolation

Bei längenbezogenen Komponenten wie der Meterware Leitung verringern sich die thermischen Widerstände, wenn die Leitungsscheibe länger wird. Daher müssen die auf einen Meter bezogenen radialen thermischen Widerstände durch die tatsächliche Länge der Leiterscheibe in m dividiert werden.

Tab. 11: Ersatzschaltbild Leiterisolation

Name	Symbol	Blockdarstellung
Isolation Mantel		

*) Der lineare Temperaturkoeffizient für die spezifische thermische Leitfähigkeit, α_{Rth} , und der lineare Temperaturkoeffizient für die spezifische Wärmekapazität, α_{Cth} , der Metalle und Polymere sind optional. Sie werden auf 0 gesetzt, wenn sie nicht verwendet werden. Sie beziehen sich jeweils auf die Basiswerte bei 20°C.

3.1.3 Entwärmung über Strahlung und Konvektion

Das Leitungselement entwärmt sich über Konvektion und Strahlung an die Umgebung. Bei längenbezogenen Komponenten wie der Meterware Leitung verringern sich die thermischen Widerstände, wenn die Leitungsscheibe länger wird. Daher müssen die auf einen Meter bezogenen radialen thermischen Widerstände durch die tatsächliche Länge der Leiterscheibe in m dividiert werden.

Tab. 12: Ersatzschaltbild Entwärmung Leiter

Name	Symbol	Blockdarstellung
Entwärmung der Leitung über die Isolationsoberfläche		

3.2 Spezialfälle im Steckersystem: Buchse

3.2.1 Joulesche Wärmequelle für das Kontaktelement

Einen speziellen Fall bildet inhaltlich die Erwärmung über den Kontaktwiderstand. Dieser Widerstand soll im Schaltbild für die Buchse enthalten sein.

Da in der Regel die elektrische Kontaktierung über mehrere Federelemente erfolgt, ist es notwendig, auch den Kontaktwiderstand und die Wärmeleitung über Widerstände und die thermischen Kapazitäten abzubilden.

Tab. 13: Ersatzschaltbild Kontaktfedern

Name	Symbol	Blockdarstellung
Multiple Kontaktfeder		
Einfacher Übergangswiderstand		

Im Fall von geklemmten elektrischen Anschlüssen wie beispielsweise Crimpübergängen und Verschraubungen können in den Lastpfaden einfache Übergangswiderstände ohne thermische Kapazitäten benutzt werden. Eine Auswertung der Temperatur an dieser Stelle sollte nicht unterbleiben, da dies zu deutlichen Fehlern führen kann.

3.2.1.1 Joulesche Wärmequelle für den Leitungswiderstand der Buchse

Das Element der jouleschen Erwärmung besteht aus mehreren Einzelkomponenten. Im Falle der Kontaktierung über eine Feder mit zwei Auflagepunkten, eine an der Buchse, die andere in der Buchse, ergibt sich für den elektrischen Gesamtwiderstand des Kontaktsystems

$$R_{el} = 2 \cdot R_{el,K} + R_{el,L} \quad (24)$$

Hierbei wird der Kontaktwiderstand $R_{el,K,einzel}$ der einzelnen Federelemente durch die Anzahl der Kontaktelemente $N_{Kontakt}$ auf der zu kontaktierenden Seite dividiert, sodass sich der Kontaktwiderstand auf einer Seite ergibt zu:

$$R_{el,K} = R_{el,K,einzel} / N_{Kontakt} \quad (25)$$

Der Leitwiderstand der Kontaktfeder, oder auch Bahnwiderstand, wird entsprechend der parallel geschalteten Federelemente betrachtet zu:

$$R_{el,L} = R_{el,L,einzel} / N_{Kontakt} \quad (26)$$

Analog dem elektrischen Widerstand wird auch die thermische Kapazität C_{th} so berechnet, dass der geringen thermischen Massen der Einzelkontakte $C_{th,einzel}$ Rechnung getragen wird,

$$C_{th} = C_{th,einzel} \cdot N_{Kontakt} \quad (27)$$

Die thermischen Leitwiderstände werden analog angepasst und es ergibt sich:

$$R_{th,L} = R_{th,L,einzel} / N_{Kontakt} \quad (28)$$

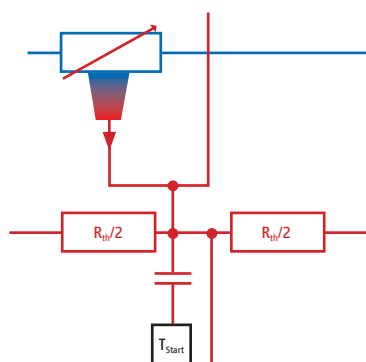
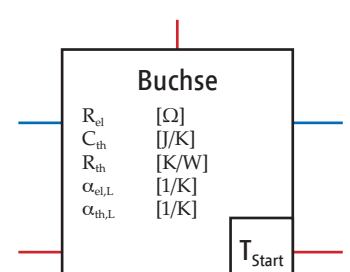
Die thermischen Kontaktwiderstände an jeder Seite ergeben sich aus den thermischen Einzelwiderständen der Einzelkontakte zu:

$$R_{th,K} = R_{th,K,einzel} / N_{Kontakt} \quad (29)$$

3.2.2 Joulesche Wärmequelle für den Leitungswiderstand der Buchse

Neben dem Kontaktwiderstand weisen die Kontaktpaare, in diesem Fall die Buchse, auch eine thermische Masse und einen thermischen Widerstand auf, der von der Geometrie und dem Material des Körpers bestimmt wird.

Tab. 14: Ersatzschaltbild Buchse

Name	Symbol	Blockdarstellung
Buchse		

3.2.3 Wärmeleitung vom Kontaktpfad zum Gehäuse

Die Beschreibung der Wärmeleitung durch die nicht metallischen Komponenten erfolgt über ein einfaches Y-Modell, bei dem der thermische Gesamtwiderstand der Komponente aufgeteilt wird und die Kapazität zwischen die beiden Teilwiderstände gegen ihre Starttemperatur angeschlossen wird.

Tab. 15: Ersatzschaltbild Gehäuse

Name	Symbol	Blockdarstellung
Wärmeleitung durch das Gehäuse		

3.2.4 Wärmeleitung vom Kontaktpfad zur Gehäuseoberfläche der Stiftwanne im Aggregat

Grundlegend ist es so, dass die Stiftwanne über eine Befestigung, zum Beispiel eine Schraubverbindung, mit dem Aggregat verbunden sein kann. In diesem Fall ist die Stiftwanne über einen thermischen Widerstand $R_{th,Aggr}$, der von der Verbindungsart und Qualität beeinflusst wird, mit der Aggregate-Temperatur T_{House} verbunden.

Tab. 16: Ersatzschaltbild Wärmeleitung Stiftwanne – Aggregategehäuse

Name	Symbol	Blockdarstellung
Direkte Wärmeleitung durch die Stiftwanne zum Aggregategehäuse		

3.2.5 Entwärmung über das Buchsengehäuse zur Umgebung

Sowohl das Buchsengehäuse als auch die Stiftwanne wechselwirken über Strahlung und Konvektion mit der jeweiligen Umgebung. Im Falle vom Aggregat betrifft diese Wechselwirkung die Aggregate-Temperatur T_{Aggr} im Inneren des Aggregats. Für das Buchsengehäuse betrifft diese Wechselwirkung die Umgebungstemperatur T_{Amb} um die Buchse selbst. Zur Vereinfachung kann von den komplexen Transfermechanismen über Konvektion und Strahlung auf einen einfachen Wärmetransfer mittels eines thermischen Widerstands geschaltet werden.

Tab. 17: Ersatzschaltbild Entwärmung Buchsengehäuse

Name	Symbol	Blockdarstellung												
Entwärmung über die Umgebung vom Buchsengehäuse		<table border="1"> <tr> <th colspan="2">Entwärmung über Gehäuse</th> </tr> <tr> <td>$R_{th,ini}$ [K/W]</td> <td>A_{OS} [m²]</td> </tr> <tr> <td></td> <td>ϵ [-]</td> </tr> <tr> <td></td> <td>or D [m]</td> </tr> <tr> <td></td> <td>l [m]</td> </tr> <tr> <td></td> <td>$T_{Amb.}$</td> </tr> </table>	Entwärmung über Gehäuse		$R_{th,ini}$ [K/W]	A_{OS} [m ²]		ϵ [-]		or D [m]		l [m]		$T_{Amb.}$
Entwärmung über Gehäuse														
$R_{th,ini}$ [K/W]	A_{OS} [m ²]													
	ϵ [-]													
	or D [m]													
	l [m]													
	$T_{Amb.}$													

3.2.5.1 Mathematische Beschreibung

Für die vereinfachte Darstellung über einen thermischen Widerstand $R_{th,ini}$ ist zu beachten, dass dieser Ansatz nur für eine näherungsweise Beschreibung der Entwärmung und auch nur für die Gleichgewichtssituation zutreffend sein kann, da der thermische Widerstand für den Strahlungsübergang durch ein Polynom 4. Grades beschrieben werden sollte.

Wird auf die Beschreibung über Konvektion und Strahlung zurückgegriffen, werden die freien Oberflächen der Komponenten A_O für die Stiftwanne und A_{OS} vom Buchsengehäuse genutzt. Der Parameter ϵ gibt den Emissionskoeffizienten für die Strahlung an und ist ein Materialparameter.

Bei der Entwärmung des Buchsengehäuses wird angenommen, dass dieses in seiner Form mit einem Zylinder angenähert werden kann. Für diesen Fall ergibt sich für die Berechnung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten α_K folgender Zusammenhang:

$$\alpha_K = \frac{Nu \cdot \lambda}{\tilde{L}} \quad (30)$$

Mit Nu der Nusselt-Zahl und der charakteristischen Länge L gibt λ die Wärmeleitfähigkeit der Umgebung (Luft) wieder. Als Literaturwert kann initial $\lambda_{20^\circ C} = 0,02587 \frac{W}{m \cdot K}$ angesetzt werden (siehe Literaturverzeichnis [2]). Für die Bestimmung der Nusselt-Zahl kann, je nach Art, auf die Grashof- bzw. Rayleigh-Zahl, die Prandtl-Zahl und die Reynolds-Zahl, die alle von der Strömungsgeschwindigkeit v abhängen, zurückgegriffen werden. Neben Stoffeigenschaften und Naturkonstanten bleiben in der Gleichung final nur die Strömungsgeschwindigkeit v der Luft (für erzwungene Konvektion) und die charakteristische Länge L als Einflussgrößen stehen. Für einen Zylinder der Länge l und mit dem Durchmesser D gilt

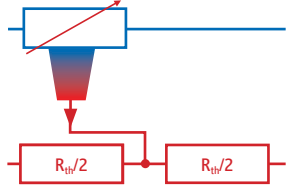
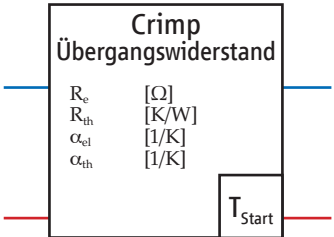
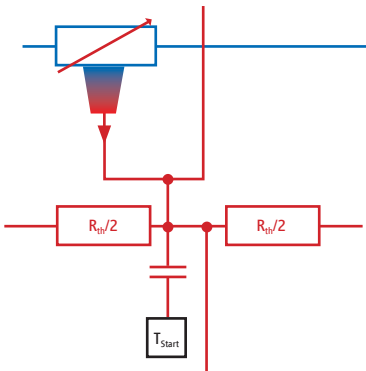
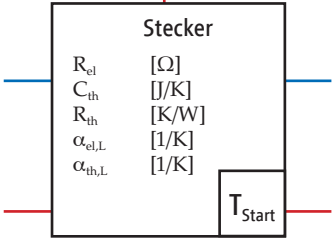
$$\tilde{L} = \frac{l \cdot \pi \cdot D^2}{4 \cdot A_{OS}} \quad (31)$$

3.3 Spezialfälle im Steckersystem: Stiftwanne

3.3.1 Joulesche Wärmequelle für den Stift

Der Leitungspfad repräsentiert eine einfache Strom-/Wärmeleitung, bestehend aus einem Element, das die joulesche Wärme beschreibt, den thermischen Widerständen und einer thermischen Kapazität.

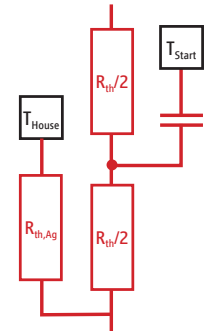
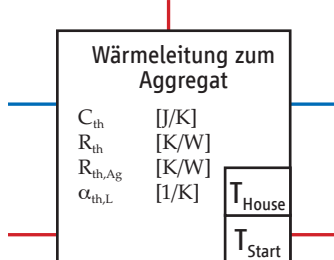
Tab. 18: Ersatzschaltbild thermischer Widerstand und Kapazität Stift

Name	Symbol	Blockdarstellung
Einfacher Übergangswiderstand		
Leitwiderstand Stecker		

3.3.2 Entwärmung von Stiftwanne zum Aggregateinneren

Konkurrierend zu der einfachen Wärmeleitung zum Aggregat findet auch eine Wechselwirkung der Stiftwanne mit der Umgebung im Inneren des Aggregats statt. In diesem Fall gibt es neben der Wärmeleitung zum Aggregat noch die Wärmeleitung zur Oberfläche der Stiftwanne. An diesen thermischen Pfad wird ein Element zur Entwärmung über Konvektion, Strahlung oder einen vereinfachten Wärmeaustausch angeschlossen.

Tab. 19: Ersatzschaltbild Wärmeleitung Stiftwanne – Aggregatinneres

Name	Symbol	Blockdarstellung
Wärmeleitung durch die Stiftwanne zum Aggregat		

3.3.3 Entwärmung über die Stiftnanne ins Innere des Aggregats

Auch die Stiftnanne wechselwirkt über Strahlung und Konvektion mit der Umgebung. Im Falle vom Aggregat betrifft diese Wechselwirkung die Aggregate-Temperatur T_{Aggr} im Inneren des Aggregats. Zur Vereinfachung kann von den komplexen Transfermechanismen über Konvektion und Strahlung auf einen einfachen Wärmetransfer mittels eines thermischen Widerstands geschaltet werden.

Tab. 20: Ersatzschaltbild Entwärmung über Stiftnanne im Aggregat

Name	Symbol	Blockdarstellung
Entwärmung im Aggregat über die Stiftnanne		

3.4 Austausch der Parameter

Neben der Beschreibung der einzelnen Bausteine für die Simulation auf Basis von thermischen Ersatzschaltbildern sowie der zugrunde liegenden Physik soll auch ein Vorschlag für den Austausch der Parameter unterbreitet werden.

Um Fehler zu vermeiden, die aufgrund von großen Textdokumenten und Unklarheiten bei der Nomenklatur entstehen können, ist es zweckdienlich, auf eine Struktur zurückzugreifen, die auch den Aufbau des Ersatzschaltbilds repräsentiert. Dazu wird eine Tabelle vorgeschlagen, die in ihren Zeilen die Konduktion entlang des primären Strompfads und in ihren Spalten den Wärmestrom zur Umgebung hin wiedergibt.

Tab. 21: Austauschabelle des Parametersatzes Leitung

Parametersatz Geschirmte Leitung	Leitungssegment
Wärmeaustausch mit Umgebung	
Mantel	
Schirm	
Isolation	
Leiter	

Tab. 22: Austauschabelle Parametersatz Steckverbinder

Parametersatz Steckverbinder		Aggregate Terminierung	Stift	Kontaktwiderstand	Buchse	Leitung Terminierung
Wärmeaustausch mit Umgebung						
Kontakt 1	Äußere Isolation					
	Schirm					
	Innere Isolation					
	Primärleiter					
Kontakt 2	Äußere Isolation					
	Schirm					
	Innere Isolation					
	Primärleiter					

3.5 Verifikation des übergebenen Modells

Werden Parameter übergeben, ist es nach unserem Verständnis in der Verantwortung der austauschenden Parteien die Modelle in der eigenen Simulationsumgebung zu verifizieren. Es ist empfehlenswert, die in die anwenderseitige Simulationsumgebung eingegebenen Parameter durch einen Vergleich mit Ergebnissen unter Verwendung der Originaldaten zu prüfen. Dieser Vergleich setzt gleiche Umgebungsbedingungen und Anregung voraus. Beides sollte daher so einfach wie möglich definiert werden, um die „manuelle“ Weitergabe zu ermöglichen.

Ein mögliches Simulationsmodell zur Verifikation ist, dass auf Stift- und Buchsenseite eine ausreichend lange Leitung (Richtwert 1.5 m) angeschlossen wird. Das Leitungsmodell sollte natürlich ebenfalls abgeglichen sein, doch ist davon auszugehen, dass im Laufe der Zeit beiderseits geprüfte Modelle der gängigen Leitungs-Typen vorhanden sind. Unter diesen Voraussetzungen wird die Kühlung des Steckers durch die Leitungen miterfasst und eine praxisnahe Antwort erzielt.

Der Vergleich mit dem Derating ist einfach und bedarf keiner weiteren Erläuterung. Um eine Aussage über das dynamische Verhalten treffen zu können, sollte jedoch ein Kurzzeitvorgang simuliert werden. Falls eine Zeittafel für Kurzzeitbelastungen vorhanden ist, können diese Werte herangezogen werden.

In kompakter Form eignet sich eine Kombination beider Belastungen. Am anschaulichsten ist eine Kurz-Lang-Kurz-Impulsform nachfolgender Form: - 2,5 x Nennstrom, bis 160 °C erreicht sind (1 min) - 0,8 x Nennstrom bis 1 h - 2,5 x Nennstrom bis 160 °C (10 s) Abkühlung bis 5000 s

Die genannten Zeiten sind Orientierungswerte. Sie sollten so gewählt werden, dass ein ausreichender Temperaturhub erreicht, aber der Definitionsbereich nicht überschritten wird. Das Ergebnis kann als Diagramm, ggf. Screenshot, in Verbindung mit den Temperaturwerten nach den drei Phasen relativ einfach weitergegeben werden. Ergänzend kann man eine Tabelle des Verlaufes erzeugen.

Wichtig ist, dass neben den Randbedingungen auch gleiche Messstellen vereinbart werden. Zur Sicherheit sollte die Temperatur der ungestörten Leitung mit übermittelt werden.

Fahrprofile eignen sich weniger für eine Verifikation der übergebenen Parameter, da die unregelmäßigen Verläufe ggf. die Fehlersuche erschweren, außerdem können Abweichungen bei kleinen Spitzen u. U. durch numerische Effekte verursacht werden.

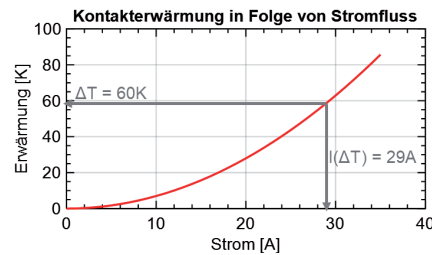
Will man Fehler durch die Peripherie ausschließen, so kann man den Steckverbinder auch ohne angeschlossene Leitungen simulieren. Fehler im Längs-Wärmewiderstand der Leiter sind dann allerdings weniger gut sichtbar. Aufgrund der fehlenden Kühlung durch die Leitungen muss der zugehörige Dauerstrom gesondert ermittelt werden, er kann bis zu 25 Prozent niedriger sein als nach diesem Verfahren ermittelt wird. Der höhere thermische Widerstand ergibt außerdem eine deutlich größere Zeitkonstante, wodurch bei der Impulsbelastung niedrigere Temperaturen zustande kommen und sich die Erwärmung von den kurzen Pulsen auf die längere Belastung verlagert.

Es sei noch besonders darauf hingewiesen, dass der hier beschriebene Testimpuls ausschließlich zum Verifizieren der korrekten Übertragung des Parametersets gilt. Die Simulationsbedingungen für die Verifikation sollten direkt zwischen den austauschenden Parteien abgestimmt werden, da das Vorgehen sowie die Randbedingungen je nach Anwendungsfall variieren können. Für den Abgleich des realen Steckers mit der Simulation wird der hier beschriebene Testimpuls nicht empfohlen.

3.6 Sicherheitstoleranzen für Steckverbinder

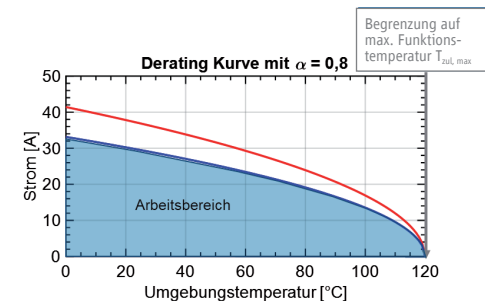
Für Steckverbinder ist es üblich, in Derating-Kurven einen Sicherheitsfaktor zu hinterlegen, der Effekte von Umgebungseinflüssen kompensiert und somit die Zuverlässigkeit über die garantierte Applikationsdauer gewährleistet.

Abb. 10: Kontakterwärmung infolge von Stromfluss



Quelle: ZVEI

Abb. 11: Derating-Kurve Steckverbinder



Quelle: ZVEI

Die Kontakterwärmung erfolgt nach dem Stromwärmegesetz zu:

$$\Delta T = k \cdot I_{\text{Qual}}^2 \quad (32)$$

Wobei k einen Koeffizienten angibt, der sich aus der Stromerwärmungskurve ableiten lässt. Unter Berücksichtigung einer maximal zulässigen Kontakttemperatur T_{max} ergibt sich eine Formulierung, die die Umgebungstemperatur T_{Amb} und eine daraus resultierende zulässige Temperaturerhöhung ΔT_{zul} berücksichtigt.

$$T_{\text{Amb}} + \Delta T_{\text{zul}} \leq T_{\text{max}} \quad (33)$$

Die Strombelastbarkeit berechnet sich unter Berücksichtigung der beiden obigen Formeln zu

$$I_{\text{zul,max}} \leq \sqrt{\frac{T_{\text{max}} - T_{\text{Amb}}}{k}} \quad (34)$$

In diesem Formalismus wird ein Sicherheitsfaktor α_{SF} eingeführt:

$$I_{\text{zul,max}} \leq \alpha_{\text{SF}} \cdot \sqrt{\frac{T_{\text{max}} - T_{\text{Amb}}}{k}} \quad (35)$$

Dieser Sicherheitsfaktor oder auch Korrekturfaktor wird nach LV214 auf einen Wert von $\alpha_{\text{SF}} = 0,8$ bzw. für USCAR auf einen Wert von $\alpha_{\text{SF}} = 0,9$ gesetzt. Um analog einen entsprechenden Sicherheitsfaktor für die elektrischen Widerstände in dem hier vorgestellten Ansatz im System zu hinterlegen, wird das im Folgenden vorgestellte Vorgehen propagiert:

Die joulesche Erwärmung erfolgt nach (1) und unter Berücksichtigung von $\alpha_{SF} = \frac{I_{zul}}{I_{Qual}}$. Diese Erwärmung darf aber die zulässige Erwärmung T_{max} nicht überschreiten.

$$P_{V,Qual} = R_0 \cdot I_{Qual}^2 \quad (36)$$

$$P_{V,zul} = R_{zul} \cdot \alpha_{SF}^2 \cdot I_{Qual}^2 \quad (37)$$

Durch Gleichsetzen von $P_{V,Qual} = P_{V,zul}$ und Umformung folgt

$$R_0 = R_{zul} \cdot \alpha_{SF}^2 \quad (38)$$

Dabei setzt sich der Widerstand aus Leitwiderständen von Buchse und Stift, dem Leitwiderstand der Kontaktfeder, dem Kontaktwiderstand / den Kontaktwiderständen und den Anschlusswiderständen (Schraubverbindung, Schweißverbindung, Crimpverbindung) zusammen. Da zu erwarten ist, dass lediglich die Anschlusswiderstände zeitlich degradieren, folgt

$$R(t) = \sum R_L + \sum R_{K,Anschluss}(t) \quad (39)$$

Da der zulässige Gesamtwiderstand im System von α_{SF} abhängt, aber nicht direkt mit dem Wert skaliert wird, wird ein neuer Skalierungsfaktor ξ für die Widerstände definiert:

$$R_{zul} = \sum R_L + \xi \sum R_{K,Anschluss} \quad (40)$$

Es folgt mit $R_{const} = \sum R_L$

$$R_0 = R_{const} + \sum R_{K,Anschluss} = \alpha_{SF}^2 \cdot \left(R_{const} + \xi \sum R_{K,Anschluss} \right) \quad (41)$$

$$\Leftrightarrow \xi = \frac{R_{const} \cdot (1 - \alpha_{SF}^2) + \sum R_{K,Anschluss}}{\sum R_{K,Anschluss} \cdot \alpha_{SF}^2} \quad (42)$$

Aus der obigen Formel lässt sich bei bekannten Widerständen und unter Berücksichtigung von α_{SF} ein Wert für ξ ableiten. In einem Steckverbinder unterliegen o. B. d. A. unterschiedliche Anschlüsse unterschiedlichen Alterungsmechanismen, sodass für jeden Übergangswiderstand ein unterschiedlicher Alterungsfaktor ξ_i zu berücksichtigen ist.

$$\xi \cdot \sum R_{K,Anschluss} = \sum_i \xi_i \cdot R_{K,Anschluss,i} \quad (43)$$

Da die einzelnen ξ_i voneinander und auch vom Gesamtwert ξ abhängen, müssen die Werte mit Bedacht gewählt werden und es muss auf die Einhaltung von Gleichung (43) geachtet werden. Es ist zu erwähnen, dass bei der Berechnung von ξ auch die konstanten Widerstände im Gesamtsystem eine Rolle spielen. Bei der vorgestellten Methode wird von einem punktförmigen, adiabaten Modell ausgegangen, sodass keine Komponenten außerhalb des Steckverbinders berücksichtigt werden.

Die Berücksichtigung der Faktoren ξ_i im Modell erfolgt nicht in den Masken, sondern wird bei der Eingabe der einzelnen elektrischen Widerstände im Modell ($R_{el,K}, R_{el,Anschluss,i}, \dots$) berücksichtigt:

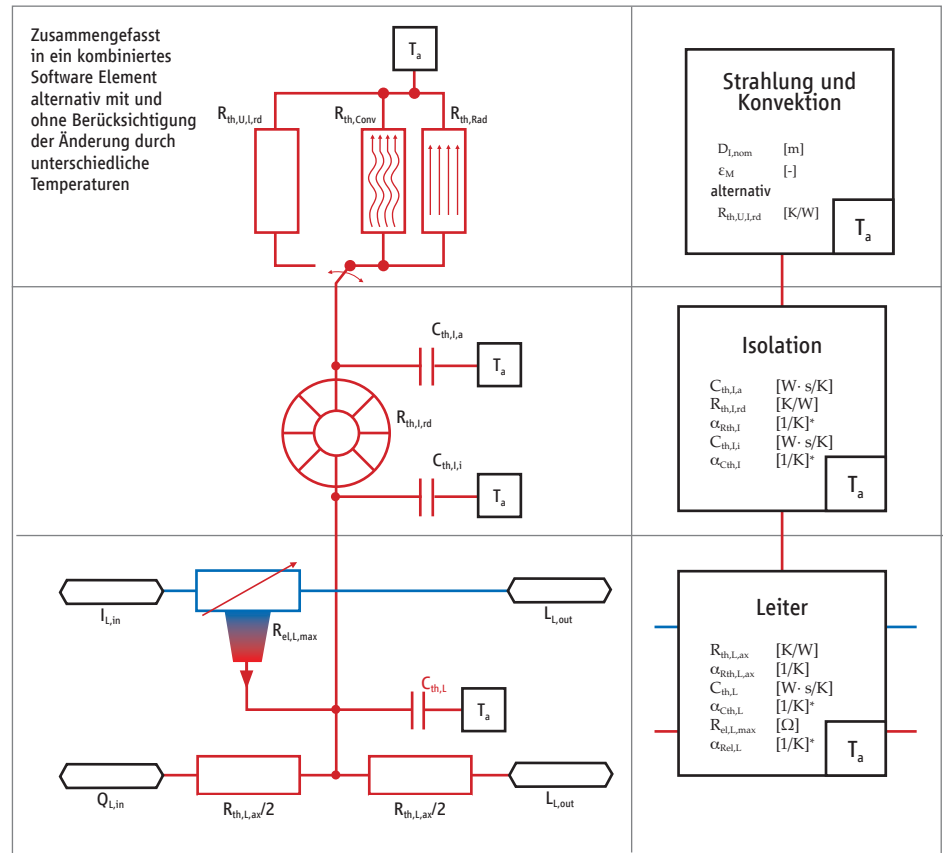
$$R_{el,K,SF,i} = \xi_i \cdot R_{el,K,i}$$

$$R_{el,Anschluss,SF,i} = \xi_i \cdot R_{el,Anschluss,i} \quad (44)$$

4 Leitungen

Parameter für einen Meter Leitung

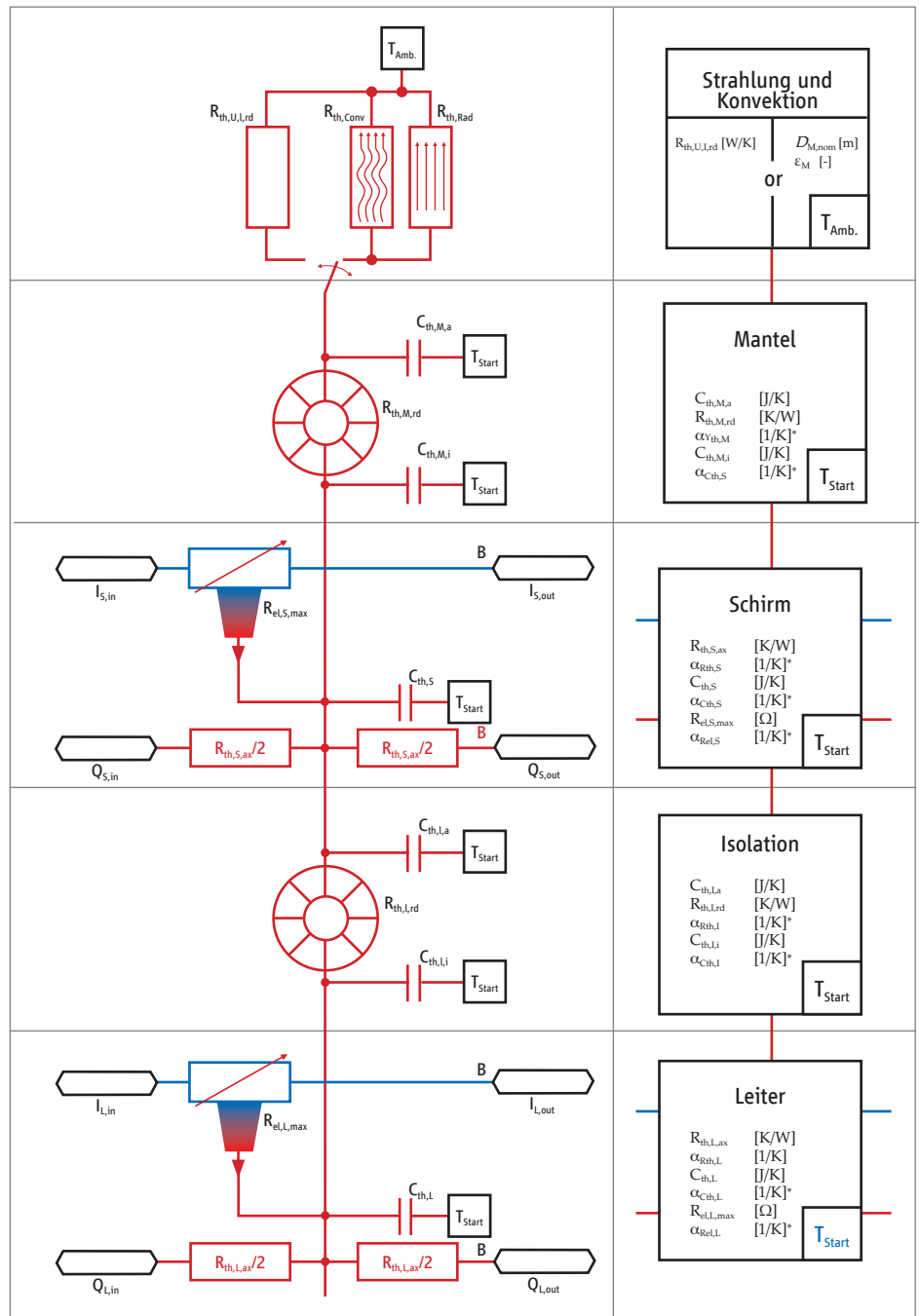
Abb. 12: Ersatzschaltbild für einen Meter ungeschirmte Leitung



*) Der lineare Temperaturkoeffizient für die spezifische thermische Leitfähigkeit, α_{Rth} , und der lineare Temperaturkoeffizient für die spezifische Wärmekapazität, α_{Cth} , der Metalle und Polymere sind optional. Sie werden auf 0 gesetzt, wenn sie nicht verwendet werden. Sie beziehen sich jeweils auf die Basiswerte bei 20°C.

Quelle: Gebauer und Griller

Abb. 13: Ersatzschaltbild geschirmte Leitung.



*) Der lineare Temperaturkoeffizient für die spezifische thermische Leitfähigkeit, α_{Rth} , und der lineare Temperaturkoeffizient für die spezifische Wärmekapazität, α_{Cth} , der Metalle und Polymere sind optional. Sie werden auf 0 gesetzt, wenn sie nicht verwendet werden. Sie beziehen sich jeweils auf die Basiswerte bei 20°C.

Quelle: Gebauer und Grillner

Für das Beispiel einer ungeschirmten Leitung ergibt sich auf dieser Basis ein Parametersatz folgender Form:

Tab. 23: Parametersatz einer ungeschirmten Leitung

Parametersatz Ungeschirmte Leitung	Leitungssegment	
Wärmeaustausch mit Umgebung	$D_{L,nom}$ [m] ε_M [-] alternativ $R_{th,U,L,rd}$ [K/W]	
Isolation	$C_{th,I,a}$ [W·s /K] $R_{th,I,rd}$ [K/W] $\alpha_{Yth,I}$ [1/K]* $C_{th,I,i}$ [W·s /K] $\alpha_{Cth,I}$ [1/K]*	
Leiter	$R_{th,L,ax}$ [K/W] $\alpha_{Rth,L}$ [1/K]* $C_{th,L}$ [W·s /K] $\alpha_{Cth,L}$ [1/K]* $R_{el,L,max}$ [Ω] $\alpha_{Rel,L}$ [1/K]	

*) Der lineare Temperaturkoeffizient für die spezifische thermische Leitfähigkeit, α_{Rth} , und der lineare Temperaturkoeffizient für die spezifische Wärmekapazität, α_{Cth} , der Metalle und Polymere sind optional. Sie werden auf 0 gesetzt, wenn sie nicht verwendet werden. Sie beziehen sich jeweils auf die Basiswerte bei 20°C.

Für die geschirmte Leitung ergibt sich folgende Repräsentation für den Parametersatz:

Tab. 24: Parametersatz einer geschirmten Leitung

Parametersatz Geschirmte Leitung	Leitungssegment	
Wärmeaustausch mit Umgebung	$D_{M,nom}$ [m] ε_M [-] alternativ $R_{th,U,M,rd}$ [K/W]	
Mantel	$C_{th,I,a}$ [W·s /K] $R_{th,I,rd}$ [K/W] $\alpha_{Yth,I}$ [1/K] *) $C_{th,I,i}$ [W·s /K] $\alpha_{Cth,I}$ [1/K]*	
Schirm	$R_{th,L,ax}$ [K/W] $\alpha_{Rth,L}$ [1/K]* $C_{th,L}$ [W·s /K] $\alpha_{Cth,L}$ [1/K]* $R_{el,L,max}$ [Ω] $\alpha_{Rel,L}$ [1/K]	
Isolation	$C_{th,I,a}$ [W·s /K] $R_{th,I,rd}$ [K/W] $\alpha_{Yth,I}$ [1/K]* $C_{th,I,i}$ [W·s /K] $\alpha_{Cth,I}$ [1/K]*	
Leiter	$R_{th,L,ax}$ [K/W] $\alpha_{Rth,L}$ [1/K] *) $C_{th,L}$ [W·s /K] $\alpha_{Cth,L}$ [1/K]* $R_{el,L,max}$ [Ω] $\alpha_{Rel,L}$ [1/K]	

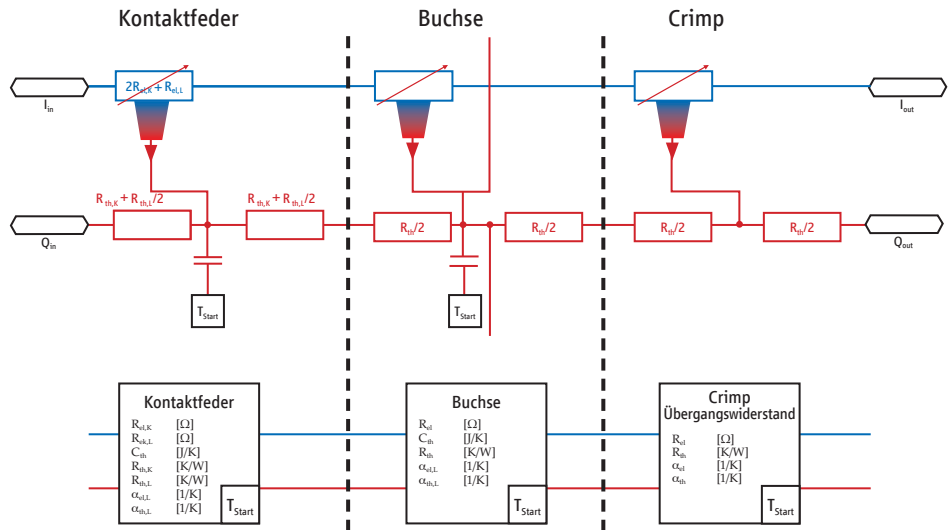
*) Der lineare Temperaturkoeffizient für die spezifische thermische Leitfähigkeit, α_{Rth} , und der lineare Temperaturkoeffizient für die spezifische Wärmekapazität, α_{Cth} , der Metalle und Polymere sind optional. Sie werden auf 0 gesetzt, wenn sie nicht verwendet werden. Sie beziehen sich jeweils auf die Basiswerte bei 20°C.

5 Stecker

5.1 Anwendungsbeispiel

Als einfachstes Anwendungsbeispiel bietet sich eine einfache, ungeschirmte Kontaktbuchse mit multipler Kontaktfeder an. Hier gibt es drei Wärmequellen: Von links nach rechts sind dies der Verbindungswiderstand der Kontaktfeder, der Widerstand der Kontaktbuchse und der Crimpwiderstand zur Leitung. Dabei ist die Strom- und Wärmeleitung entlang des Strompfads dargestellt. Eine Wärmeleitung über das Gehäuse nach außen ist hier noch nicht enthalten.

Abb. 14: Anwendungsbeispiel Stecker

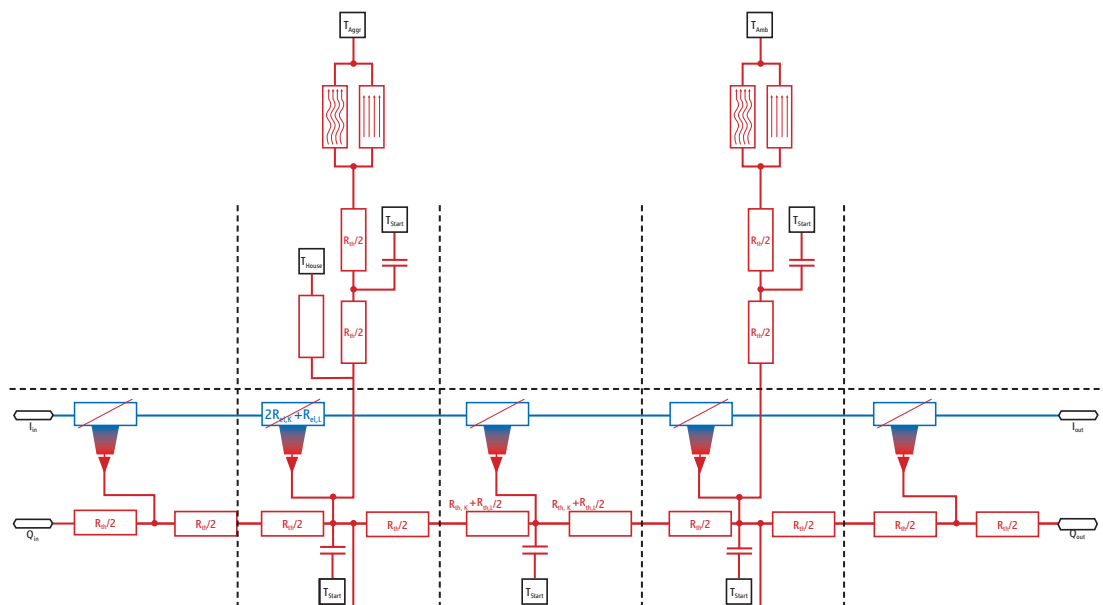


Quelle: ZVEI

5.1.1 Einpoliger ungeschirmter Steckverbinder

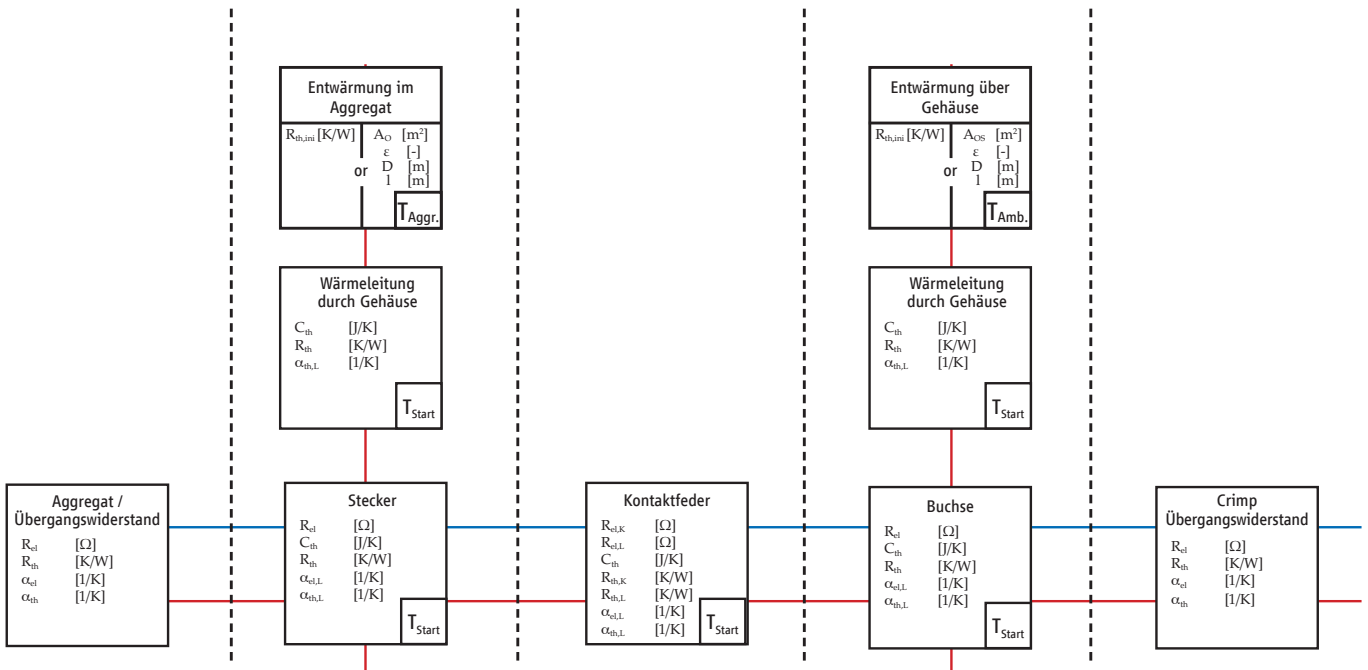
Im Weiteren soll ein vollständiger Kontaktpfad über Stecker und Buchse mit zusätzlicher Entwärmung über das Gehäuse nach außen veranschaulicht werden. Hierbei gibt es mehrere Schnittstellen: Die Starttemperatur, die in der Regel gleich der Umgebungstemperatur zum Zeitpunkt des Beginns der Simulation ist, dient als Bezug für die thermischen Kapazitäten oder Massen. Die Gehäusetemperaturschnittstelle wird in erster Linie durch Konvektion im Inneren des Aggregats (Steuergerät) bestimmt. Die Temperaturschnittstelle zum Modul beschreibt den Wärmetransfer zu einem Modell eines Aggregategehäuses, an dem der Steckverbinder befestigt ist. Die Temperaturschnittstelle nach außen wird über Konvektion und Strahlung an die Umgebung (Ambiente) angeschlossen.

Abb. 15: Ersatzschaltbild ungeschirmter einpoliger Steckverbinder



Quelle: ZVEI

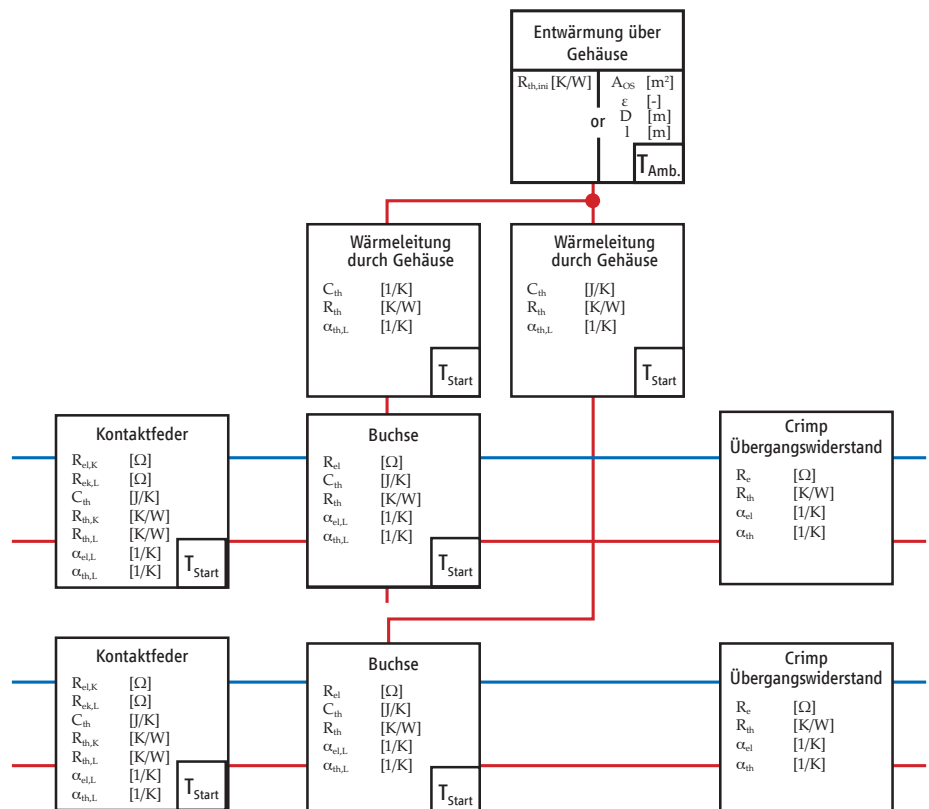
Abb. 16: Vereinfachtes Ersatzschaltbild ungeschirmter einpoliger Steckverbinder



Quelle: ZVEI

5.1.2 Zweipoliger ungeschirmter Buchsenstecker mit Wärmeaustausch über Gehäuse

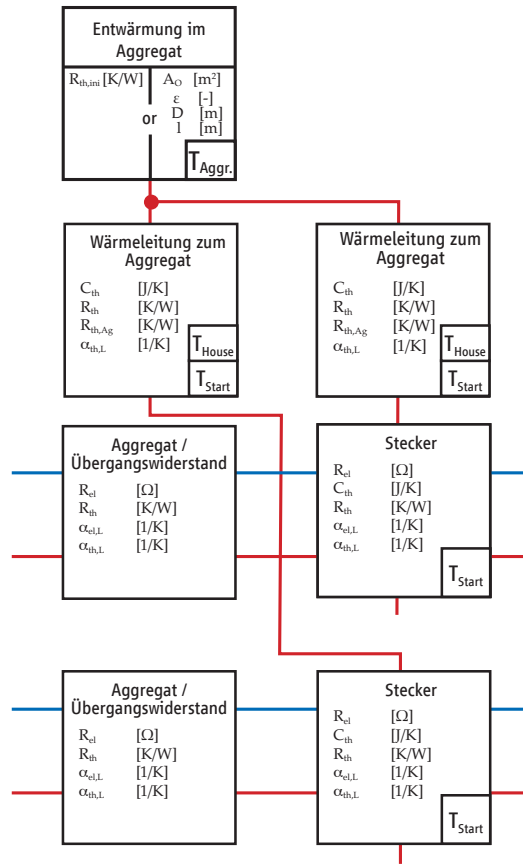
Abb. 17: Ersatzschaltbild zweipoliger ungeschirmter Buchsenstecker mit Wärmeaustausch über Gehäuse



Quelle: ZVEI

5.1.3 Zweipolige ungeschirmte Stiftwanne mit Wärmeaustausch über Aggregat

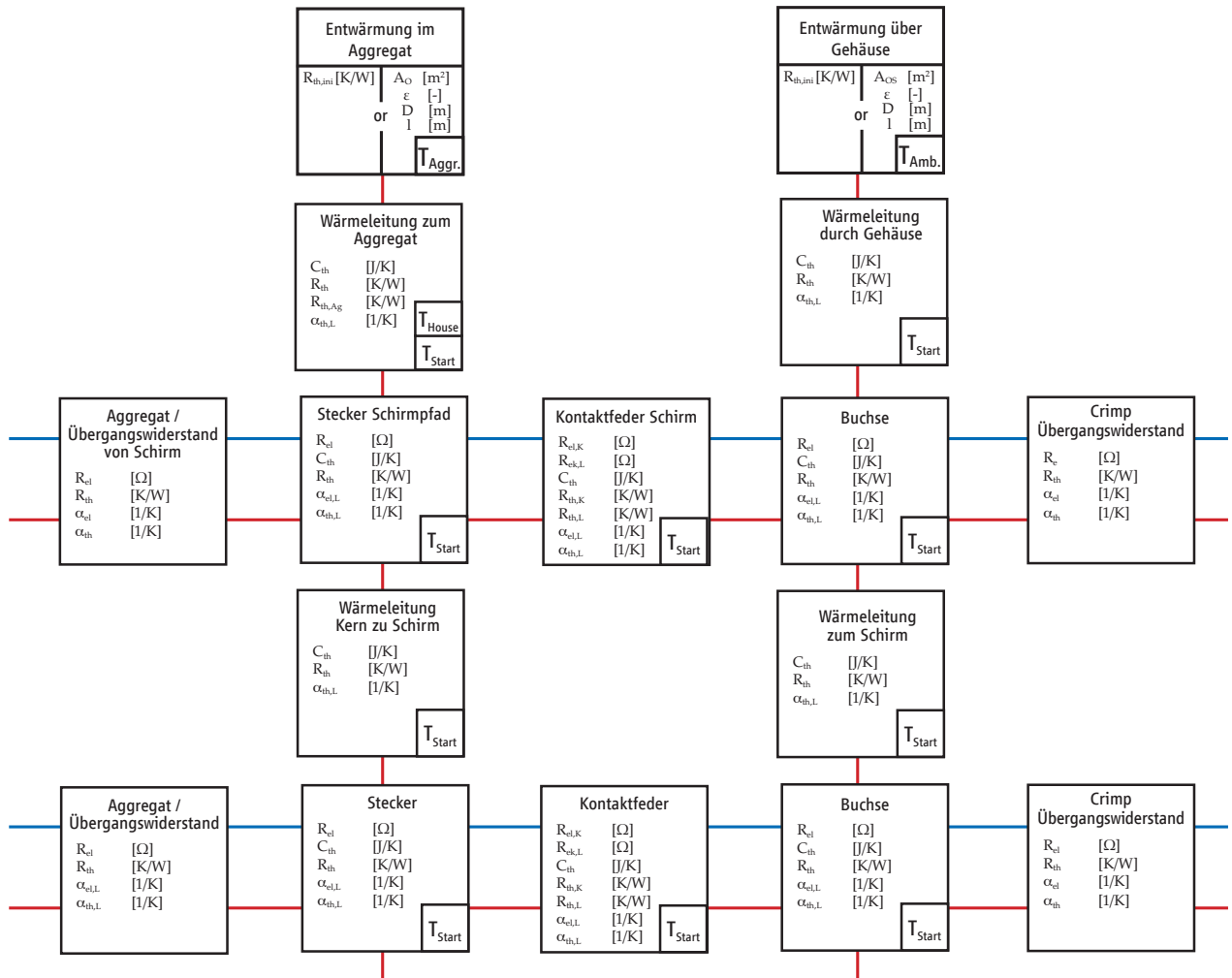
Abb. 18: Ersatzschaltbild zweipolige ungeschirmte Stiftwanne mit Wärmeaustausch über Aggregat



Quelle: ZVEI

5.1.4 Einpoliger geschirmter Steckverbinder

Abb. 19: Ersatzschaltbild einpolig geschirmter Steckverbinder



Quelle: ZVEI

Für das Beispiel eines ungeschirmten Steckverbinders ergibt sich auf dieser Basis ein Parametersatz folgender Form:

Tab. 25: Parametersatz ungeschirmter Steckverbinder

Parametersatz 2-poliger ungeschirmter Steckverbinder		Aggregate Terminierung	Stift	Kontakt- widerstand	Buchse	Leitung Terminierung
Wärmeaustausch mit Umgebung			$R_{th,ini}$ A_O ε D l		$R_{th,ini}$ A_{OS} ε D l	
Kontakt 1	Äußere Isolation		C_{th} R_{th} $R_{th,Ag}$ α_{th}		C_{th} R_{th} α_{th}	
	Primärleiter	R_{el} α_{el} R_{th} α_{th} ξ_{el}	R_{el} α_{el} C_{th} R_{th} α_{th}	$R_{el,K}$ $R_{el,L}$ α_{el} C_{th} $R_{th,K}$ $R_{th,L}$ α_{th} N^* $\xi_{el,K}$	R_{el} α_{el} C_{th} R_{th} α_{th}	R_{el} α_{el} R_{th} α_{th} ξ_{el}
Kontakt 2	Äußere Isolation		C_{th} R_{th} $R_{th,Ag}$ α_{th}		C_{th} R_{th} α_{th}	
	Primärleiter	R_{el} α_{el} R_{th} α_{th} ξ_{el}	R_{el} α_{el} C_{th} R_{th} α_{th}	$R_{el,K}$ $R_{el,L}$ α_{el} C_{th} $R_{th,K}$ $R_{th,L}$ α_{th} N^* $\xi_{el,K}$	R_{el} α_{el} C_{th} R_{th} α_{th}	R_{el} α_{el} R_{th} α_{th} ξ_{el}

*) Die gekennzeichneten Parameter sind optional und werden nur für einige der Ersatzschaltbilder benötigt.

Für den geschirmten Steckverbinder folgt analog:

Tab. 26: Parametersatz zweipoliger geschirmter Steckverbinder erster Kontakt

Parametersatz 2-poliger geschirmter Steckverbinder		Aggregate Terminierung	Stift	Kontakt- widerstand	Buchse	Leitung Terminierung
Wärmeaustausch mit Umgebung			$R_{th,ini}$ A_O ε D l		$R_{th,ini}$ A_{OS} ε D l	
Kontakt 1	Äußere Isolation		C_{th} R_{th} $R_{th,Ag}$ α_{th}		C_{th} R_{th} α_{th}	
	Schirmpfad	R_{el} α_{el} R_{th} α_{th} ξ_{el}	R_{el} α_{el} C_{th} R_{th} α_{th}	$R_{el,K}$ $R_{el,L}$ α_{el} C_{th} $R_{th,K}^*$ $R_{th,L}^*$ α_{th} N^* $\xi_{el,K}$	R_{el} α_{el} C_{th} R_{th} α_{th}	R_{el} α_{el} R_{th} α_{th} ξ_{el}
	Innere Isolation		C_{th} R_{th} α_{th}		C_{th} R_{th} α_{th}	
	Primärleiter	R_{el} α_{el} R_{th} α_{th} ξ_{el}	R_{el} α_{el} C_{th} R_{th} α_{th}	$R_{el,K}$ $R_{el,L}$ α_{el} C_{th} $R_{th,K}^*$ $R_{th,L}^*$ α_{th} N^* $\xi_{el,K}$	R_{el} α_{el} C_{th} R_{th} α_{th}	R_{el} α_{el} R_{th} α_{th} ξ_{el}

*) Die gekennzeichneten Parameter sind optional und werden nur für einige der Ersatzschaltbilder benötigt.

Tab. 27: Parametersatz zweipoliger geschirmter Steckverbinder zweiter Kontakt

Parametersatz 2-poliger geschirmter Steckverbinder		Aggregate Terminierung	Stift	Kontakt- widerstand	Buchse	Leitung Terminierung
Kontakt 2	Äußere Isolation		C_{th} R_{th} $R_{th,Ag}$ α_{th}		C_{th} R_{th} α_{th}	
	Schirmpfad	R_{el} α_{el} R_{th} α_{th} ξ_{el}	R_{el} α_{el} C_{th} R_{th} α_{th}	$R_{el,K}$ $R_{el,L}$ α_{el} C_{th} $R_{th,K}$ $R_{th,L}^*$ α_{th} N^* $\xi_{el,K}$	R_{el} α_{el} C_{th} R_{th} α_{th}	R_{el} α_{el} R_{th} α_{th} ξ_{el}
	Innere Isolation		C_{th} R_{th} α_{th}		C_{th} R_{th} α_{th}	
	Primärleiter	R_{el} α_{el} R_{th} α_{th} ξ_{el}	R_{el} α_{el} C_{th} R_{th} α_{th}	$R_{el,K}$ $R_{el,L}$ α_{el} C_{th} $R_{th,K}$ $R_{th,L}^*$ α_{th} N^* $\xi_{el,K}$	R_{el} α_{el} C_{th} R_{th} α_{th}	R_{el} α_{el} R_{th} α_{th} ξ_{el}

*) Die gekennzeichneten Parameter sind optional und werden nur für einige der Ersatzschaltbilder benötigt.

5.2 Validierung

Eine Validierung kann nicht auf Komponentenebene erfolgen, da die einzelnen Volumenkörper miteinander interagieren und somit jedes zu simulierende Element Quellen und Senken hat. Daher muss die Validierung auf einer Ebene erfolgen, bei der das Gesamtsystem abgebildet werden kann. Eine Einschränkung ergibt sich aus der Tatsache, dass einige Komponenten, die nicht dem Lieferumfang unterliegen, notwendig sind – etwa Leitung, um einen Steckverbinder anzubinden. Daher muss die Validierung so ausgelegt sein, dass der Einfluss dieser Komponenten möglichst gering gehalten wird (z. B. kurze Leitungen) und es definierte bekannte Randbedingungen gibt, die auch in der Simulation hinterlegt werden.

Diese Randbedingungen umfassen:

- eine thermische Kopplung an eine bekannte „unendliche“ Senke – beispielsweise eine Kühlstelle mit definierter Temperatur,
- eine bekannte Umgebungstemperatur und eine bekannte/regulierte Luftströmung, um Wärmestrahlung und Konvektion simulieren zu können.
- Optional: Die Konvektion lässt sich durch Umwickeln des DUT (device under test) stark verringern. Dies lässt sich im Modell durch einen geringen Konvektionskoeffizienten $\alpha \approx 0$ berücksichtigen.
- Es muss beachtet werden, dass das DUT freischwebend ist bzw. die Auflageflächen minimiert sind, um Wärmeleitung an die Umgebung zu vermeiden.
- Es sollte keine Luftzirkulation (erzwungene Konvektion) herrschen, ansonsten muss dies im Konvektionskoeffizienten berücksichtigt werden.
- Messungen und Simulation sollten bei verschiedenen Stromstärken durchgeführt werden, um temperaturabhängige Größen abzubilden, wie etwa die linearen Temperaturkoeffizienten für den elektrischen Widerstand und den thermischen Widerstand.

5.3 Umgebungsbedingungen

Die Validierung der im Dokument beschriebenen Methode unterliegt folgenden Umgebungsbedingungen:

- Horizontal und nicht im Bündel angeordnete zylindrische Leitungen
- Leitung und Steckverbinder mit freier Konvektion

Die zuvor genannten Einschränkungen folgen der Logik, dass Hochstromleitungen mit ihren großen Querschnitten in der Regel einzel- oder parallelverlegt und symmetrisch betrieben werden. Das heißt, dass Hin- und Rückleiter identisch bestromt werden und sich in erster Näherung somit gleichmäßig erwärmen. Daher bilden parallel verlegte Leitungen untereinander keine Wärmesenken aus und stehen nicht in einer thermischen Wechselbeziehung. Die Entwärmung dieser Leitungen erfolgt über Konvektion und Strahlung, was in einer zugluftfreien Umgebung einen Worst-Case-Fall darstellt. Über die Konvektionsschnittstellen des Modells kann eine Zwangskonvektion eingebracht werden.

Das gilt gleichermaßen für die Kontakte des Stecksystems, wobei die Steckverbinder auf der einen Seite eine thermische Anbindung an eine Leitung und andererseits an ein Aggregat/Komponente aufweisen können und somit der Anschlussleiter an der Übergangsstelle (Leiterplatte, Busbar etc.) über die Betriebstemperatur und den Wärmestrom definiert werden muss. Weiterführende Modelle, die die Aggregateseite thermisch und elektrisch beschreiben, sind nicht Bestandteil dieser Anwendungsregel.

Es wird auf den Geltungsbereich für dieses Dokument verwiesen.

6 Ermittlung der Parametersets

6.1 Leitungen

Für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse thermischer Simulationen von elektrischen Komponenten zwischen verschiedenen Anwendern ist ein einheitliches Format an Eingabedaten wesentlich. In diesem Dokument wird ein einheitliches Format an Eingabedaten für elektrische Leitungen vorgeschlagen. Dabei wird auf eine minimale Anzahl an Eingabeparametern geachtet, das heißt, es werden nur die Eingabeparameter genutzt, die für die thermische Simulation elektrischer Leitungen unabdingbar sind.

Basierend auf der in [3] und [4] (siehe Literaturverzeichnis) eingeführten Notation, werden die für die Beschreibung von Meterwaren benötigten Parameter benannt. Im Gegensatz zur Beschreibung eines Lastfalls im zusammengesetzten Leitungsstrang mit Kontakten fällt die Zahl der benötigten Parameter zur reinen Beschreibung der Meterware geringer aus. Das Austauschformat zur Beschreibung von Meterware kann auf diese Parameter reduziert werden. Es werden dabei zunächst ungeschirmte Einzelleitungen erfasst.

6.1.1 Basisparameter für ungeschirmte Einzelleitungen

Tab. 28: Basisparameter ungeschirmte Einzelleitungen

Aufbauelement	Parameter	Einheit	Bezeichnung
Isolation	$D_{I,nom}$	m	nominaler Außendurchmesser der Isolation
Isolation	λ_I	W/(K·m)	Wärmeleitfähigkeit des Isolationsmaterials
Isolation	γ_I	J/(K·m³)	Wärmespeicherzahl des Isolationsmaterials
Isolation	ϵ	-	Emissionsgrad der Isolation
Leiter	$D_{L,nom}$	m	nominaler Durchmesser des Leiters
Leiter	$R'_{L,max}$	Ω/m	maximaler elektrischer Leiterwiderstand pro m bei 20 °C
Leiter	α_L	1/K	linearer Temperaturkoeffizient von $R'_{L,max}$
Leiter	κ_L	S/m	elektrische Leitfähigkeit bei 20 °C
Leiter	λ_L	W/(K·m)	Wärmeleitfähigkeit des Leitermaterials
Leiter	γ_L	J/(K·m³)	Wärmespeicherzahl des Leitermaterials

Bemerkungen:

- Für eine eindeutige Form der Basiseinheiten wird empfohlen, mit SI-Einheiten zu arbeiten.
- Die Basisparameter sind nur zum internen Gebrauch und werden üblicherweise nicht übergeben.
- Es werden die Parameter übergeben, die Worst-Case-Ergebnisse in der thermischen Simulation liefern, wie zum Beispiel der maximale elektrische Widerstand bei 20 °C.
- Statt der Angabe des Leiterquerschnitts genügt es, die elektrische Leitfähigkeit des Leitermaterials und den Leiterwiderstand pro Meter bei 20 °C anzugeben.
- Die elektrische Leitfähigkeit des Leitermaterials ist kein kompakter Parameter und wird daher nicht übergeben.
- Der maximale Leiterwiderstand wird jedoch als kompakter Parameter übergeben.

6.1.2 Kompakte Parameter für ungeschirmte Einzelleitungen

Die kompakten Parameter definieren das eigentliche Austauschformat von Eingabedaten für die Berechnung thermischer Netzwerke. Sie setzen sich aus den Basisparametern anhand der in Abschnitt 5 genannten Formeln zusammen. Die kompakten Parameter sind bezüglich ihrer Anzahl minimal gehalten, das heißt, es handelt sich ausschließlich um simulationsrelevante Parameter. Die kompakten Parameter entfremden die ursprünglichen Materialparameter so weit es geht und ermöglichen so einen Austausch simulationsrelevanter Parameter, ohne die Details des Leitungsaufbaus bekanntzugeben.

Tab. 29: Kompakte Parameter für ungeschirmte Einzelleitungen

Aufbauelement	Parameter	Einheit	Bezeichnung
Isolation	$D_{I,nom}$	m	nominaler Außendurchmesser der Isolation*)
Isolation	ε	-	Emissionsgrad der Isolation*)
Umgebung	$R_{th,U,I,rd}$	W/K	alternativ zu*): zusammengefasster radialer Wärmewiderstand von Strahlung und Konvektion (für die Isolation)
Isolation	$C_{th,I,s}$	J/K	äußerer Teil der Wärmekapazität der Isolation
Isolation	$R_{th,I,rd}$	W/K	radialer Wärmewiderstand der Isolation
Isolation	$C_{th,I,i}$	J/K	innerer Teil der Wärmekapazität der Isolation
Leiter	$R_{el,L,max}$	Ω	maximaler elektrischer Leiterwiderstand bei 20 °C
Leiter	$\alpha_{el,L}$	1/K	linearer Temperaturkoeffizient von $R_{el,L,max}$
Leiter	$R_{th,L,ax}$	K/W	axialer Wärmewiderstand des Leiters
Leiter	$C_{th,L}$	J/K	Wärmekapazität des Leiters
-	χ	m	Längenkonstante der ungeschirmten Leitung

Bemerkungen:

- Um die erzeugte Wärmeleistung im Leiter *lastfallunabhängig* zu erfassen, werden Werte $R_{el,L,max}$ und $\alpha_{el,L}$ auch für die kompakten Parameter benötigt.

6.1.3 Basisparameter für geschirmte Einzelleitungen

Für geschirmte Leitungen werden zusätzlich zu den Basisparametern für ungeschirmte Leitungen die folgenden Größen benötigt:

Tab. 30: Basisparameter geschirmte Einzelleitungen

Aufbau- element	Parameter	Einheit	Bezeichnung
Mantel	$D_{M,nom}$	m	nominaler Außendurchmesser des Mantels
Mantel	λ_M	W/(K·m)	Wärmeleitfähigkeit des Mantelmaterials
Mantel	γ_M	J/(K·m ³)	Wärmespeicherzahl des Mantelmaterials
Mantel	ϵ_M	-	Emissionsgrad des Mantels
Schirm	$D_{S,nom}$	m	nominaler Durchmesser des Schirms
Schirm	$R'_{el,S,max}$	Ω/m	maximaler elektrischer Schirmwiderstand pro m bei 20 °C
Schirm	α_S	1/K	linearer Temperaturkoeffizient von $R'_{el,S,max}$
Schirm	K_S	S/m	elektrische Leitfähigkeit bei 20 °C
Schirm	λ_S	W/(K·m)	Wärmeleitfähigkeit des Schirmmaterials
Schirm	γ_S	J/(K·m ³)	Wärmespeicherzahl des Schirmmaterials

Bei geschirmten Einzelleitungen wird der Basisparameter ϵ (Emissionsgrad der Isolation) nicht benötigt.

6.1.4 Kompakte Parameter für geschirmte Einzelleitungen

Für geschirmte Leitungen werden zusätzlich zu den kompakten Parametern für ungeschirmte Leitungen die folgenden Größen benötigt:

Tab. 31: Zusätzliche kompakte Parameter für geschirmte Einzelleitungen

Aufbauelement	Parameter	Einheit	Bezeichnung
Mantel	$D_{M,nom}$	m	nominaler Außendurchmesser des Mantels*)
Mantel	ϵ_M	-	Emissionsgrad des Mantels*)
Umgebung	$R_{th,U,M,rd}$	W/K	alternativ zu*): zusammengefasster radialer Wärmewiderstand von Strahlung und Konvektion (für den Mantel)
Mantel	$C_{th,M,a}$	J/K	äußerer Teil der Wärmekapazität der Mantel
Mantel	$R_{th,M,rd}$	W/K	radialer Wärmewiderstand der Mantel
Mantel	$C_{th,M,i}$	J/K	innerer Teil der Wärmekapazität der Mantel
Schirm	$R_{el,S,max}$	Ω	maximaler elektrischer Schirmwiderstand bei 20 °C
Schirm	$\alpha_{el,S}$	1/K	linearer Temperaturkoeffizient von $R_{el,S,max}$
Schirm	$R_{th,S,ax}$	K/W	axialer Wärmewiderstand des Schirms
Schirm	$C_{th,S}$	J/K	Wärmekapazität des Schirms
-	X	m	Längenkonstante der geschirmten Leitung

Bei geschirmten Einzelleitungen wird der kompakte Parameter $R_{th,U,I,rd}$ (zusammengefasster radialer Wärmewiderstand der Isolationsoberfläche) *nicht* benötigt.

6.1.5 Formeln zur Bestimmung der kompakten Parameter

Im Folgenden werden die Berechnungswege zur Bestimmung der kompakten Parameter angegeben. Die kompakten Parameter sind dabei **fett** hervorgehoben.

6.1.5.1 Elektrische Widerstände von Schirm und Leiter

Als Basisparameter sind die elektrischen Widerstände bei Meterwarendaten typischerweise längenunabhängig gegeben. Bei gegebener Leitungslänge L erhält man die benötigten kompakten Parameter als Absolutwerte des Schirm- und Leiterwiderstands [Ω]:

$$\mathbf{R_{el,S,max}} = R'_{el,S,max} \cdot L \quad (45)$$

$$\mathbf{R_{el,L,max}} = R'_{el,L,max} \cdot L$$

Bemerkungen

- Die Leitungslänge L zur Bestimmung des Leiterwiderstands ist auf **einen Meter** normiert.
- Die Temperaturabhängigkeit des Schirm- und Leiterwiderstands ist über die Formel

$$R_{el,max}(T) = R_{el,max} \cdot (1 + \alpha_{el} \cdot (T - T_0)) \quad (46)$$

gegeben. T bezeichnet dabei die Leiter- bzw. die Schirmtemperatur und T_0 die Referenztemperatur von $R_{el,max}$. Diese liegt typischerweise bei 20 °C.

6.1.5.2 Radiale Wärmewiderstände der Kunststoffe

Es wird zunächst der Wärmewiderstand pro Meter Länge bestimmt:

Radialer Wärmeleitwert des Mantels pro m, [W/(K·m)]:

$$R'_{th,M,rd} = \frac{\ln\left(\frac{D_{M,nom}}{D_{S,nom}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_M} \quad (47)$$

Radialer Wärmeleitwert der Isolation pro m, [W/(K·m)]:

$$R'_{th,I,rd} = \frac{\ln\left(\frac{D_{I,nom}}{D_{L,nom}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_I} \quad (48)$$

Radialer Wärmeleitwert $R_{th,rd}$ in [W/K] des Mantels und der Isolation bei gegebener Leitungslänge L :

$$R_{th,M,rd} = \frac{R'_{th,M,rd}}{L} = \frac{\ln\left(\frac{D_{M,nom}}{D_{S,nom}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_M \cdot L} \quad (49)$$

$$R_{th,I,rd} = \frac{R'_{th,I,rd}}{L} = \frac{\ln\left(\frac{D_{I,nom}}{D_{L,nom}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_I \cdot L}$$

Bemerkungen

- Die Leitungslänge L zur Bestimmung des Wärmewiderstands ist auf **einen Meter** normiert.
- Die Temperaturabhängigkeit von thermischen Widerständen von Kunststoffen kann, analog zum elektrischen Widerstand, über einen Temperaturkoeffizienten gesteuert werden. Dieser ist üblicherweise auf 0 gesetzt, d. h. es werden üblicherweise konstante Wärmewiderstände betrachtet.

6.1.5.3 Radiale Wärmewiderstände der Strahlung und Konvektion für Rundleitungen

Es werden zunächst die Wärmeleitwerte pro Meter Länge bestimmt:

Wärmeleitwert Manteloberfläche, [W/(K·m)]:

$$Y'_{th,U,M,rd} = \pi \cdot D_{M,nom} \cdot \alpha_M \quad (50)$$

Zusammengefasster Wärmeleitwert Isolatoroberfläche, [W/(K·m)]:

$$Y'_{th,U,I,rd} = \pi \cdot D_{I,nom} \cdot \alpha_I \quad (51)$$

Zusammengefasster Wärmeleitwert $Y_{th,U,rd}$ in [W/K] der Mantel- und Isolatoroberfläche bei gegebener Leitungslänge L :

$$Y_{th,U,M,rd} = Y'_{th,U,M,rd} \cdot L = \pi \cdot D_{M,nom} \cdot \alpha_M \cdot L \quad (52)$$

$$Y_{th,U,I,rd} = Y'_{th,U,I,rd} \cdot L = \pi \cdot D_{I,nom} \cdot \alpha_I \cdot L$$

Bemerkung

- Die Leitungslänge L zur Bestimmung des Wärmeleitwerts ist auf **einen Meter** normiert.
- In vielen Softwareanwendungen zur Simulation thermischer Netze werden *Wärmewiderstände* in der Eingabe gefordert. Diese lassen sich direkt aus dem Kehrwert der Leitwerte berechnen.

Zusammengefasster radialer Wärmewiderstand $R_{th,U,rd}$ in [K/W] des Mantels und der Isolation:

$$R_{th,U,M,rd} = 1/Y_{th,U,M,rd} \quad (53)$$

$$R_{th,U,I,rd} = 1/Y_{th,U,I,rd}$$

6.1.5.4 Strahlung

Die Wärmeübergangskoeffizienten $\alpha_{M,I} = \alpha_{\text{konv}} + \alpha_{\text{str}}$ zur Strahlung und Konvektion sind von den Abmessungen der wärmeabgebenden Oberfläche und der Oberflächentemperatur abhängig. Bei Meterwaren für geschirmte und ungeschirmte Leitungen werden Zylinderoberflächen betrachtet. Für Zylinderoberflächen gilt die folgende Formel für den Strahlungsterm:

$$\alpha_{\text{str}} = \varepsilon_{M,I} \cdot \sigma \cdot (T_U + T_{M,I}) \cdot (T_U^2 + T_{M,I}^2) \quad (54)$$

Die in der Formel enthaltenen Elemente: Stefan-Boltzmann-Konstante $\sigma = 5,671 \cdot 10^{-8} \text{ W / (m}^2\text{K}^4\text{)}$, Umgebungstemperatur T_U , Oberflächentemperatur des Mantels bzw. der Isolation $T_{M,I}$ und der Emissionsgrad des Mantels bzw. der Isolation $\varepsilon_{M,I}$. T_U und $T_{M,I}$ sind in Kelvin angegeben.

6.1.5.5 Konvektion

Der Konvektionsterm α_{konv} kann für definierte Temperaturbereiche ΔT und Leiterabmessungen mit Außendurchmesser D fest vorgegeben werden. α_{konv} beschreibt dabei die Wärmeabgabe für Rundleiter bei freier Konvektion.

α_{konv} für variierte Temperaturdifferenzen und Durchmesser

Tab. 32: Konvektion von Leitungen

	D = 1 mm	D = 5 mm	D = 20 mm
$\Delta T = 10 \text{ K}$	$\alpha_{\text{konv}} = 22 \text{ W / (K m}^2\text{)}$	$\alpha_{\text{konv}} = 9 \text{ W / (K m}^2\text{)}$	$\alpha_{\text{konv}} = 5 \text{ W / (K m}^2\text{)}$
$\Delta T = 50 \text{ K}$	$\alpha_{\text{konv}} = 27 \text{ W / (K m}^2\text{)}$	$\alpha_{\text{konv}} = 12 \text{ W / (K m}^2\text{)}$	$\alpha_{\text{konv}} = 7 \text{ W / (K m}^2\text{)}$
$\Delta T = 150 \text{ K}$	$\alpha_{\text{konv}} = 32 \text{ W / (K m}^2\text{)}$	$\alpha_{\text{konv}} = 15 \text{ W / (K m}^2\text{)}$	$\alpha_{\text{konv}} = 10 \text{ W / (K m}^2\text{)}$

ΔT beschreibt die Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Umgebung. Im Gegensatz zum Strahlungsterm ist der Konvektionsterm annähernd unabhängig vom konkreten Wert der Umgebungstemperatur. Die blau markierte Zeile umfasst die Werte des Konvektionsterms bei einer Temperaturdifferenz von 50 K. Diese Werte des Konvektionsterms können bei der Verrechnung für leitungscharakteristische Konstanten – wie die Längenkongstante – verwendet werden.

6.1.5.6 Wärmewiderstände der Metalle, axial

Bei bekannten Werten für die Wärmeleitfähigkeiten der Metalle werden zunächst die Wärmewiderstände pro Meter Länge bestimmt:

Axialer Wärmewiderstand Schirm [K/(W·m)]:

$$R'_{th,S,ax} = \frac{1}{A_S \cdot \lambda_S} \quad (55)$$

Axialer Wärmewiderstand Leiter [K/(W·m)]:

$$R'_{th,L,ax} = \frac{1}{A_L \cdot \lambda_L} \quad (56)$$

Ist die Wärmeleitfähigkeit der Metalle unbekannt, kann ein guter Näherungswert für 20 °C durch Benutzung des Wiedemann-Franz'schen Gesetzes erhalten werden. Dieses Gesetz stellt eine Beziehung zwischen elektrischer und thermischer Leitfähigkeit eines Metalls her und lautet:

$$\frac{\lambda}{\kappa} = T \cdot Lr = cLr$$

mit λ ... Wärmeleitfähigkeit in W/(K·m)

κ ... elektrische Leitfähigkeit in 1/(Ω ·m)

T ... absolute Temperatur in K

$Lr \approx 2,3 \cdot 10^{-8}$... Lorenz Zahl V^2/K^2

cLr ... temperaturabhängige Lorenz Zahl in V^2/K

Bei 20°C ergibt sich eine temperaturabhängige Lorenz Zahl von $\kappa_{Lr} \approx 6,74 \cdot 10^{-6} \text{ V}^2/\text{K}$.

Mit den Leiterquerschnittsflächen $A_S = \frac{1}{\kappa_S \cdot R_{el,S,max}}$, $A_L = \frac{1}{\kappa_L \cdot R_{el,L,max}}$ des Schirms

bzw. des Leiters ergeben sich daraus folgende Beziehungen:

Axialer Wärmewiderstand Schirm [K/(W·m)]:

$$R'_{th,S,ax} = \frac{1}{A_S \cdot \lambda_S} = \frac{\kappa_S \cdot R_{el,S,max}}{\lambda_S} = \frac{R_{el,S,max}}{c_{Lr}} \quad (55a)$$

Axialer Wärmewiderstand Leiter [K/(W·m)]:

$$R'_{th,L,ax} = \frac{1}{A_L \cdot \lambda_L} = \frac{\kappa_L \cdot R_{el,L,max}}{\lambda_L} = \frac{R_{el,L,max}}{c_{Lr}} \quad (56a)$$

Die in den Tabellen für Basisparameter bereits grau hinterlegten Wärmeleitfähigkeiten λ_S und λ_L werden in diesem Falle *nicht* benötigt.

Axialer Wärmewiderstand $R_{th,ax}$ in [K/W] des Schirms und des Leiters bei gegebener Leitungslänge L :

$$R_{th,S,ax} = R'_{th,S,ax} \cdot L = \frac{R_{el,S,max}}{c_{Lr}} \cdot L \quad (57)$$

$$R_{th,L,ax} = R'_{th,L,ax} \cdot L = \frac{R_{el,L,max}}{c_{Lr}} \cdot L$$

Bemerkung

Die Leitungslänge zur Bestimmung des Wärmewiderstands ist auf [einen Meter](#) normiert.

6.1.5.7 Wärmekapazitäten der Kunststoffe

Es werden zunächst die Wärmekapazitäten pro Meter Länge bestimmt.

Van Wormer Koeffizient Mantel, dimensionslos:

$$p = \frac{1}{2 \cdot \ln\left(\frac{D_{M,nom}}{D_{S,nom}}\right)} - \frac{1}{\left(\frac{D_{M,nom}}{D_{S,nom}}\right)^2 - 1} \quad (58)$$

Innere Wärmekapazität Mantel [J/(K·m)]:

$$C'_{th,M,a} = (1 - p) \cdot \gamma_M \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_{M,nom}^2 - D_{S,nom}^2) \quad (59)$$

Äußere Wärmekapazität Mantel [J/(K·m)]:

$$C'_{th,M,i} = (1 - p) \cdot \gamma_M \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_{M,nom}^2 - D_{S,nom}^2) \quad (60)$$

Van Wormer Koeffizient Isolation, dimensionslos:

$$p = \frac{1}{2 \cdot \ln\left(\frac{D_{I,nom}}{D_{L,nom}}\right)} - \frac{1}{\left(\frac{D_{I,nom}}{D_{L,nom}}\right)^2 - 1} \quad (61)$$

Innere Wärmekapazität Isolation [J/(K·m)]:

$$C'_{th,I,i} = p \cdot \gamma_I \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_{I,nom}^2 - D_{L,nom}^2) \quad (62)$$

Äußere Wärmekapazität Isolation [J/(K·m)]:

$$C'_{th,I,a} = (1 - p) \cdot \gamma_I \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_{I,nom}^2 - D_{L,nom}^2) \quad (63)$$

Nun werden die Wärmekapazitäten C_{th} in [J/K] der Kunststoffe bei gegebener Leitungslänge L berechnet:

$$C_{th,M,i} = C'_{th,M,i} \cdot L \quad (64)$$

$$C_{th,M,a} = C'_{th,I,i} \cdot L$$

$$C_{th,I,i} = C'_{th,M,i} \cdot L$$

$$C_{th,I,a} = C'_{th,I,i} \cdot L$$

Bemerkungen:

- Die Leitungslänge L zur Bestimmung der Wärmekapazität ist auf **einen Meter** normiert.
- Die Temperaturabhängigkeit von Wärmekapazitäten von Kunststoffen kann, analog dem elektrischen Widerstand, über einen Temperaturkoeffizienten gesteuert werden. Dieser ist üblicherweise auf 0 gesetzt, das heißt, es werden üblicherweise konstante Wärmekapazitäten betrachtet.

6.1.5.8 Wärmekapazitäten der Metalle

Wärmekapazität Schirm [J/(K·m)]:

$$C'_{th,S} = A_S \cdot c_S \quad (65)$$

Wärmekapazität Leiter [J/(K·m)]:

$$C'_{th,L} = A_L \cdot c_L \quad (66)$$

Mit den Leiterquerschnittsflächen $A_S = \frac{1}{\kappa_S \cdot R_{el,S,max}}$, $A_L = \frac{1}{\kappa_L \cdot R_{el,L,max}}$ zum Schirm bzw. zum Leiter.

Es werden die Wärmekapazität C_{th} in [J/K] der Metalle bei gegebener Leitungslänge L berechnet.

$$C_{th,S} = C'_{th,S} \cdot L = A_S \cdot c_S \cdot L \quad (67)$$

$$C_{th,L} = C'_{th,L} \cdot L = A_L \cdot c_L \cdot L$$

Bemerkung

Die Leitungslänge L zur Bestimmung der Wärmekapazität ist auf **einen Meter** normiert.

6.1.5.9 Längenkonstante

Die Längenkonstante χ beschreibt das axiale Einschwingverhalten der Leitungstemperatur. Eine untere Grenze kann direkt aus den axialen und radialen Wärmewiderständen geschirmter bzw. ungeschirmter Leitungen bestimmt werden. Es gilt:

χ einer ungeschirmten Leitung [m]:

$$\chi = \sqrt{\frac{R'_{th,I,rd} + R'_{th,U,rd}}{R'_{th,L,ax}}} \quad (68)$$

χ einer geschirmten Leitung [m]:

$$\chi = \sqrt{\frac{R'_{th,I,rd} + R'_{th,M,rd} + R'_{th,U,rd}}{R'_{th,L,ax} + R'_{th,S,ax}}} \quad (69)$$

Zur Bestimmung der thermischen Widerstände zur Umgebung (zusammengefasster radialer thermischer Widerstand $R'_{th,U,rd}$ bzw. $R'_{th,U,rd}$) wird eine Oberflächentemperatur von 110 °C und eine Umgebungstemperatur von 60 °C angesetzt.

Diese Konstante kann als *Standardlänge* bei der Wahl der Länge L einer Leitungsscheibe genutzt werden. Details hierzu werden in [5] beschrieben (siehe Literaturverzeichnis).

6.2 Stecker

6.2.1 Vorgeschlagener Testaufbau zur Bestimmung der thermischen Eigenschaften von HV-Steckverbindern

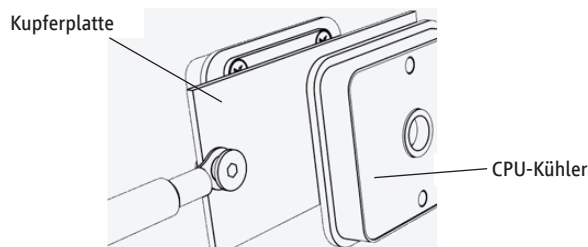
Ziel ist es, einen Messaufbau so zu definieren, dass der zu untersuchende Steckverbinder unabhängig von anderen Einflussfaktoren hinsichtlich dessen thermischen Verhaltens geprüft wird und die Parameter für das thermische Ersatzschaltbild ermittelt werden können. Für eine Charakterisierung des Stromerwärmungsverhaltens ist es notwendig, dass der Steckverbinder über Leitungen bestromt wird und die Wärmeenergie über Konvektion, Strahlung und Kontaktwärme mit der Umgebung abgegeben werden kann. Während bei vergleichsweise kleinen Steckverbindern mit niedrigen Strömen die Derating-Messung genügt, um sie ausreichend zu charakterisieren, steigt mit hohen Strömen der Einfluss der Leitungszuleitungen und der Konvektion auf das Gesamtsystem. Ein weiterer essenzieller Punkt ist, dass Maßnahmen zur Kühlung (aktiv oder passiv), die im System getroffen werden, nicht berücksichtigt werden.

Um dem entgegenzuwirken, sollte der Messaufbau die folgenden Anforderungen erfüllen:

- Flexibilität: Adaptierbar für verschiedene Steckverbinder, Leitungsquerschnitte und anwendbar auf geschirmte und ungeschirmte Systeme.
- Minimale Umgebungseinflüsse: Die Zuleitungen müssen so kurz wie möglich gehalten werden, um den Einfluss der Leitung zu minimieren. Die Wärmeabgabe durch Konvektion und Strahlung vom Gehäuse muss so gut wie möglich kontrolliert werden.
- Hochstrom: Der Steckverbinder soll auch über aktuelle Forderungen hinaus geprüft werden können, um Kühlungsmaßnahmen im System Rechnung zu tragen. Dazu bietet es sich an, auch im Testaufbau Kühlungsmechanismen und definierte Wärmesenken zu integrieren.
- Kontrolle: Die Randbedingungen des Testaufbaus müssen bekannt sein. Das bedeutet, dass neben den konstruktiven Parametern (Leitungsquerschnitt, Leitungslänge, Umgebungstemperatur, ...) auch die Kühlleistung bzw. die Temperatur an den Kühlstellen bekannt/messbar sein muss. Zur Kontrolle müssen auch Parameter redundant gemessen werden, um möglich Messfehler dedektieren zu können. Zum Beispiel sollte die Temperatur durch den Spannungsabfall im System geprüft werden, damit hier über eine Plausibilitätsprüfung die Richtigkeit der Temperaturmessung bestätigt werden kann.

Diese Anforderungen können folgendermaßen umgesetzt werden: Die Leitungen an dem Steckverbinder werden zur Anbindung an die Wärmesenken auf eine Länge von 15 cm limitiert, um die Eigenerwärmung der Leitungen zu definieren und Wärmeabgabe über die Oberfläche zu minimieren. Nach diesen 15 cm werden die Leitungen über Kabelschuhe terminiert. Um eine möglichst effektive Kühlung zu generieren, hat es sich etabliert, eine Kupferplatte mit dem Querschnitt der Leitung an jeden der vier Kabelschuhe zu schrauben (Abbildung 20).

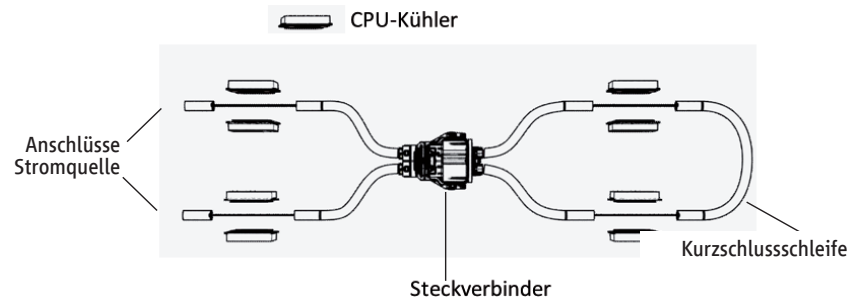
Abb. 20: Kupferplatte mit Kühler



Quelle: TE

Diese Kupferplatten haben eine zweckmäßige Breite und Länge, sodass sie zwischen zwei Kühlkörper eingespannt werden können. Die Kühlung sollte idealerweise über einen Wasserkreislauf mit bekannten Durchlaufmengen sowie Vor- und Nachlauftemperatur erfolgen, womit die entsprechende Kühlleistung ermittelt werden kann. Dabei ist zu beachten, dass der Querschnitt der verwendeten Kupferplatte größer gleich dem Leitungsquerschnitt ist, um keine zusätzliche thermische Quelle zu erzeugen. Nach den Kupferplatten wird dann der Messaufbau über eine Rückverkabelung als Kurzschlusschleife an eine regelbare Stromquelle angeschlossen (Abbildung 21).

Abb. 21: Vorgeschlagener Messaufbau zur Bestimmung der thermischen Eigenschaften von HV-Steckverbindern



Quelle: TE

Die Kühlerplatten können in Reihe an eine Wasserkühlung angeschlossen werden, die auf eine konstante Vorlauftemperatur regelt. Da die Kühlleistung über die Länge des Kühlkreislaufs abnimmt und auch die thermische Anbindung der Kühlkörper an die Kupferplatten einer statistischen Schwankung unterliegt, sollte mindestens ein Temperaturfühler an die Kupferplatten angebracht werden, um die Materialtemperatur an der Kühlstelle zu bestimmen. Dieser Wert wird in der thermischen Simulation als Randbedingung verwendet.

6.2.2 Herleitung der Modellparameter

Für die Modellierung des Steckverbinders im elektrischen Ersatzschaltbild werden verschiedene Parameter benötigt, die aus geometrischen Überlegungen, Materialdaten, FEM-Simulationen und auch Messungen abgeleitet werden können. Im Folgenden soll auf diese einzelnen Parameter eingegangen werden:

Bestimmung des thermischen Leitwiderstands

Der thermische Leitwiderstand lässt sich auf mehrere Weisen bestimmen. Welche Methode zu bevorzugen ist, ergibt sich aus der Geometrie und Zugänglichkeit des zu charakterisierenden Bauteils. Bei der Bestimmung des thermischen Widerstands entlang des Leitungspfads kann auf das Wiedemann-Franz-Gesetz zurückgegriffen werden:

$$\frac{\lambda}{\sigma} = L \cdot T \quad (70)$$

λ beschreibt hierbei die thermische Leitfähigkeit des Metalls, σ die elektrische Leitfähigkeit, T die Temperatur und L ist die Lorenz-Zahl. Der thermische Widerstand eines metallischen Körpers der Länge l und mit Querschnitt A ergibt sich zu $R_{th} = \frac{l}{\lambda \cdot A}$. Analog berechnet sich der elektrische Widerstand zu $R_{el} = \frac{l}{\sigma \cdot A}$. Durch Umformungen und Einsetzen lässt sich der thermische Widerstand berechnen zu:

$$R_{th} = \frac{R_{el}}{L \cdot T} \quad (71)$$

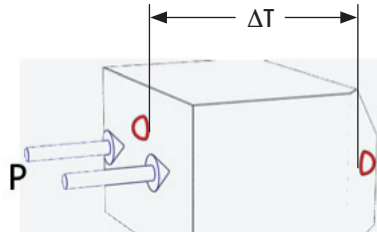
Hierbei sei angemerkt, dass der lineare Temperatur-Beikoeffizient mangels gegebener Werte aus der Literatur nicht berücksichtigt wird. Weiterhin sollte die Lorenzzahl für die unterschiedlichen Legierungen aus den jeweiligen Datenblättern ermittelt werden.

Im Gegensatz zum thermischen Widerstand lässt sich der elektrische Widerstand einfach und genau über den Spannungsabfall U zwischen den Messpunkten bestimmen: $R_{el} = \frac{U}{I}$. Dabei ist der elektrische Strom I hinreichend genau bekannt – entweder über die Einstellung der Stromquelle oder er kann über einen Shunt gemessen werden. Grundvoraussetzung für diese Methode ist die Zugänglichkeit der Bauteile, über die der Spannungsabfall / elektrische Widerstand gemessen werden soll. Des Weiteren beschränkt sich die Anwendung auf metallische Grundkörper.

Alternativ bietet sich die Möglichkeit, auf Simulationen mittels FEM zurückzugreifen. Diese Methodik bietet die größten Stärken bei der Bestimmung des thermischen Widerstands von nicht metallischen Körpern bei der Wärmeleitung in verschiedene Raumrichtungen. Dazu wird ein thermischer Stimulus in Form eines Wärmestroms P an eine Oberfläche (Abbildung 22) eingespeist und die Temperatur

differenz ΔT zwischen den Kontaktflächen bestimmt. Der thermische Widerstand lässt sich dann zu $R_{th} = \frac{\Delta T}{P}$ bestimmen. Diese Methode stößt bei komplexen Bauteilen durch ihren Rechenaufwand und bei Schnittstellen zwischen Bauteilen an ihre Grenzen.

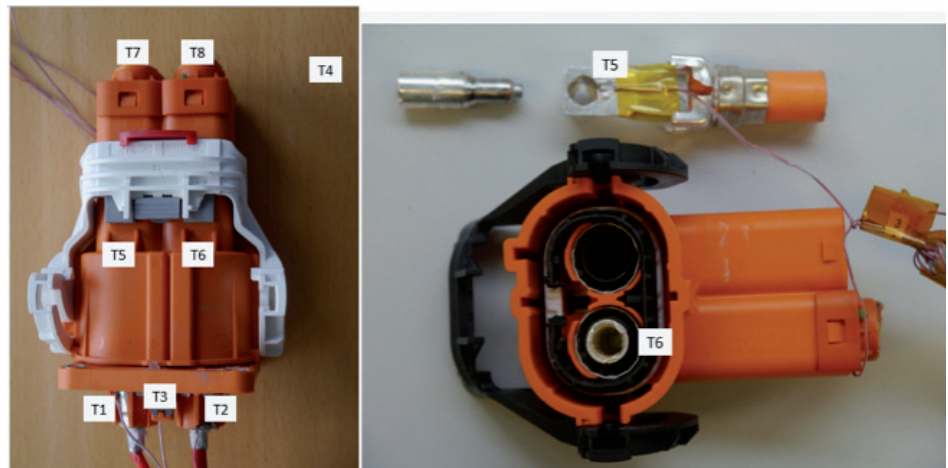
Abb. 22: FEM-Methode zur Berechnung der thermischen Widerstände



Quelle: TE

Um diese Lücken zu schließen, kann eine dritte Methode Anwendung finden: die Temperaturmessung. Die Temperaturmessung bietet die Möglichkeit, sowohl die beiden vorgenannten Ansätze zu validieren als auch komplexe Bauteile und Bauteilgruppen bezüglich des thermischen Widerstands zu quantifizieren. Analog zu den FEM-Simulationen wird dazu an einer Stelle ein Wärmestrom in das System eingeprägt und die Temperaturdifferenz zu den relevanten Stellen bestimmt. Hierbei ist es wichtig, dass die Konvektion so gut wie möglich unterdrückt wird. Die Einprägung des Wärmestroms kann dabei über eine Heizpatrone mit definierter Heizleistung erfolgen (siehe auch Abbildung 23).

Abb. 23: Definierter Wärmeeintrag über Heizpatronen



Quelle: TE

Bestimmung der thermischen Kapazitäten / Wärmekapazitäten

Die Bestimmung der Wärmekapazität ist deutlich schwieriger. Hier hat es sich etabliert, die Volumina V der Körper auf Basis geometrischer Daten zu berechnen und über die Dichte ρ_b und die spezifische Wärmekapazität c die thermische Masse oder Kapazität C zu berechnen: $C = c \cdot V \cdot \rho_b$. Eine empirische Bestimmung der thermischen Masse über beispielsweise ein Kalorimeter ist wenig zielführend, da in einem thermischen Ersatzschaltbild nur Anteile von Bauteilen oder aber mehrere Bauteile in einer einzigen thermischen Masse zusammengefasst werden. Für einfache Geometrien ist es möglich, den Versuchsaufbau, der auch für die Widerstandsbestimmung verwendet wird, zu nutzen. Hier wird mithilfe eines Widerstandsdrahts oder einer Heizpatrone ein Wärmestrom P (elektrische Wärmeleistung) in das System eingepreßt und die Temperaturerhöhung gemessen. Durch die zeitliche Betrachtung lässt sich so eine thermische Kapazität bestimmen, solange das Erwärmungsverhalten über die Zeit weitestgehend linear verläuft:

$$C = \frac{\int_{t=0}^{\tau} P \, dt}{T(t = \tau) - T(t = 0)} \quad (72)$$

Die beschriebenen Methoden liefern eine Datenbasis, die als Startpunkt für das thermische Ersatzschaltbild gewählt werden können.

Bestimmung der Konvektions- und Strahlungswiderstände

Die Konvektion und auch die Wärmestrahlung spielen im Messaufbau eine Rolle, werden im finalen System aber deutlich abweichen und sind deswegen nicht Teil des Steckverbindermodells – sie müssen aber bei der Modellbildung berücksichtigt werden.

Hierbei kann initial rein geometrisch auf die Oberfläche A zurückgegriffen werden. Für den Konvektionsparameter α dienen zunächst Erfahrungswerte. Mithilfe dieser beiden Parameter lässt sich die Konvektion über $P = \alpha \cdot A \cdot \Delta T$ beschreiben, wobei ΔT die Temperaturdifferenz zwischen dem Körper und der Umgebung angibt.

Für die Wärmestrahlung gilt $P = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_A^4 - T_B^4)$, wobei σ die Stefan-Boltzmann-Konstante ist, T_A und T_B geben die Temperaturen der am Wärmeaustausch beteiligten Partner an und ε ist der Emissionsgrad, eine Materialkonstante für die Oberfläche des strahlenden Körpers.

Der erste Näherungswert für einen groben Bemessungswiderstand lässt sich im statischen Erwärmungsfall aus der steckverbinderrelevanten Verlustleistung und der Temperaturerhöhung ableiten.

Optimierung der Modellparameter

Um zu finalen Modellparametern zu gelangen, muss das Grundmodell (also der komplette Messaufbau) mit den gemessenen Werten abgeglichen werden. Dies kann entweder mittels spezieller Software oder „manuell“ geschehen. Hierbei sind die Kapazitäten so anzupassen, dass das Zeitverhalten angeglichen wird. Bei unterdrückter Konvektion und Strahlung bestimmen elektrische Widerstände letztendlich die Temperatur des stationären Falls.

Logik für die Benennung der Parameter

A) Tab. 33: Der Bezug auf thermische oder elektrische physikalische Größe wird tiefgestellt

th	wärmebezogene Größe	el	elektrische Größe
----	---------------------	----	-------------------

B) Tab. 34: Beschreibung der physikalischen Größen im Schaltungsmodell

Symbol	Physikalische Größe	Einheit	Anmerkung
P, \dot{Q}	Wärmestrom oder ohmsche Verlustleistung	W	Wird im Allgemeinen mit \dot{Q} bezeichnet
I	Elektrischer Strom	A	
C_{th}	Wärmekapazität	J/K	Wird auch als thermische Masse bezeichnet. Muss immer gegen die „Starttemperatur“ geschaltet werden
T	Temperatur	°C; K	Bei der Strahlung muss die absolute Temperatur betrachtet werden
R_{el}	Elektrischer Widerstand	Ω	Aus dem elektrischen Pfad wird die Verlustleistung als Wärmestrom gemäß $R \cdot I^2$ generiert
$R_{el, K}$	Elektrischer Kontaktwiderstand	Ω	Der Kontaktwiderstand
R_{th}	Thermischer Widerstand	K/W	Es werden im Modell drei Arten der thermischen Widerstände unterschieden: Leitwiderstände, Konvektionswiderstände und Strahlungswiderstände.
b	Breite	m	
l	Länge	m	
h	Höhe	m	
D	Durchmesser	m	
A	Fläche	mm ²	Oberfläche verschiedener Komponenten, z. B.: A_O als Oberfläche für die Stiftwanne und A_{OS} als Oberfläche für das Buchsengehäuse
α_{el}	Linearer Temperaturkoeffizient – elektrisch		Parameter für Änderung des elektrischen Widerstands über der Temperatur
α_{th}	Linearer Temperaturkoeffizient – thermisch		Parameter für Änderung des thermischen Leitwiderstands über der Temperatur
α_K	Konvektionsfaktor	W/(m ² K)	Ist von vielen Parametern abhängig – Konvektionsmodell (Wärmeatlas)
ε	Emissionsfaktor		Bei Kunststoffen im Bereich von 0,5–0,9
t	Zeit	sec	

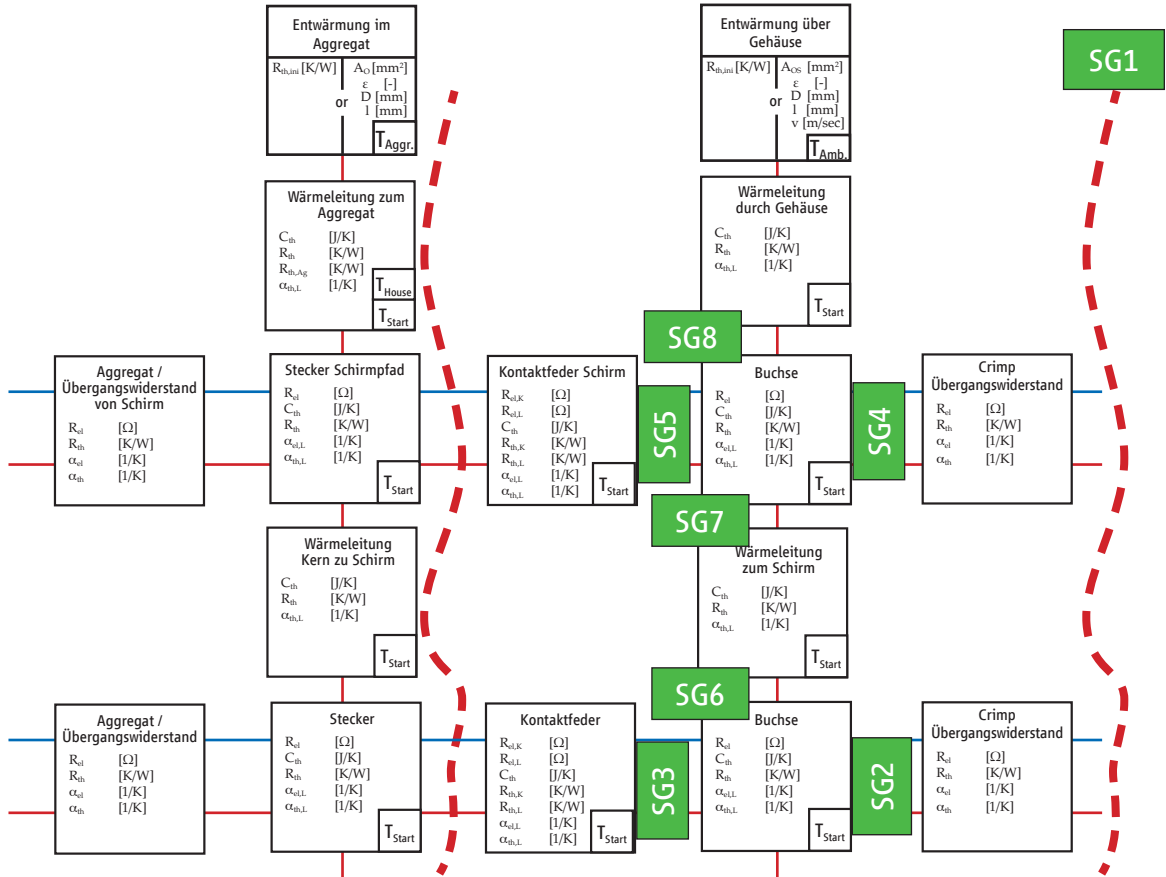
C) Tab. 35: Bezug auf das betroffene Element. Buchstabenreihen tiefgestellt.

Index	Bedeutung	Index	Bedeutung
Amb	Umgebung	Start, t = 0	Zeitpunkt t = 0
L	Leiter	V	Verseilung
S	Schirm	Z	Zwickelfüllung
I	Isolation	M	Mantel
G	Gehäuse	rd	radial
P	Pin-Kontakt	min	minimal
B	Kontaktbahn bei Multikontaktelementen	max	maximal
K	Kontakt	nom	nominal
F	Feder	l	links
C	Crimp	r	rechts
T	Anschluss	i	innen
A	Außenoberfläche	a	außen
Aggr, Ag	Bezug auf Innenraum des Aggregats/Steuergeräts	ax	axial
House	Bezug auf Gehäuse des Aggregats	cond	leiten
0	Ausgangsgröße	einzel	einzelnes Kontaktelement
A, B	Schnittstelle links/rechts		

6.3 Geometriaufbereitung

Zum Analysieren der Parameter für die Systemsimulation muss das CAD-Modell im ersten Schritt in die einzelnen Blöcke der Systemsimulation aufgeteilt werden. Hierzu müssen die Geometrie analysiert und die System- bzw. Schnittgrenzen definiert werden. Um hier die Trennung richtig zu bestimmen, sollte im ersten Schritt das Ersatzmodell für die Systemsimulation (Abbildung 24) aufgebaut werden.

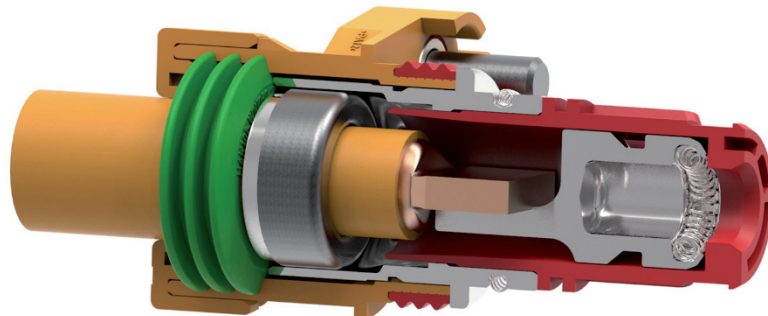
Abb. 24: Blockschaltbild für einpoligen geschirmten Steckverbinder



Quelle: ZVEI

Für die Analyse der Geometrie kann bei der simulatorischen Extraktion der Parameter der Stift- und Buchsenkontakt getrennt voneinander betrachtet werden, da der Leitungsanschluss zum Gegenstecker in der Simulation nicht auf eine vorhandene Geometrie angewiesen ist. Zur Darlegung der generellen Vorgehensweise wird der in Abbildung 25 dargestellte Kuppler verwendet.

Abb. 25: Beispiel einer CAD-Geometrie



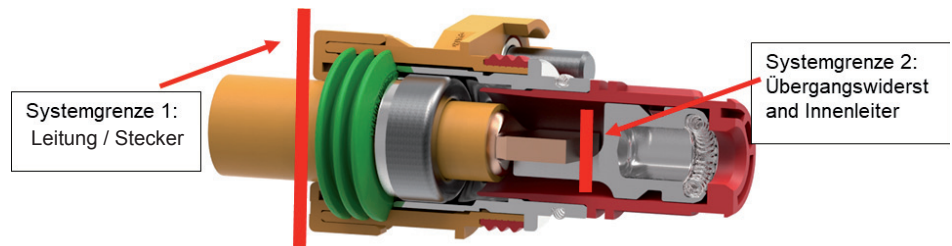
Quelle: Rosenberger

6.4 Definition der Schnittgrenzen

6.4.1 Systemgrenze zur Leitung

Aus der Definition im Blockschaltbild ist die Systemgrenze der Leitung zum Stecker am elektrischen Übergang definiert. Als Nebenrandbedingung gilt, dass die Leitung an der Systemgrenze ungestört in seiner elektrischen bzw. thermischen Eigenschaft sein muss. Damit ergibt sich bei dem in Abbildung 26 dargestellten Steckverbinder die Systemgrenze zur Leitung an der leitungsseitigen Planfläche des Kunststoffgehäuses (Systemgrenze 1 in Abbildung 26).

Abb. 26: Systemgrenzen für Leitungen und Innenleiter



Quelle: Rosenberger

6.4.2 Übergangswiderstand Kabelinnenleiter

Im Sinne des in Abbildung 24 dargestellten Blockschaltbilds ist der Übergangswiderstand Leiter auf Innenleiter ohne thermische Eigenschaften modelliert. Bei coaxialen Strukturen ist hier sowohl die Modellierung als auch die Messung besonders schwer, da ab der SG 1 (Leitung/Stecker) noch ein Leitungsanteil mit thermischen Längs- und Querleitungseigenschaften vorhanden ist. Um eine einheitliche Definition des Werts zu gewährleisten, sollte der Übergangswiderstand von der SG 1 zur SG 2 (Leitung/Innenleiter) definiert werden, obwohl es sich an dieser Stelle um eine Reihenschaltung von Widerständen mit unterschiedlichen Temperaturbeikoeffizienten handelt.

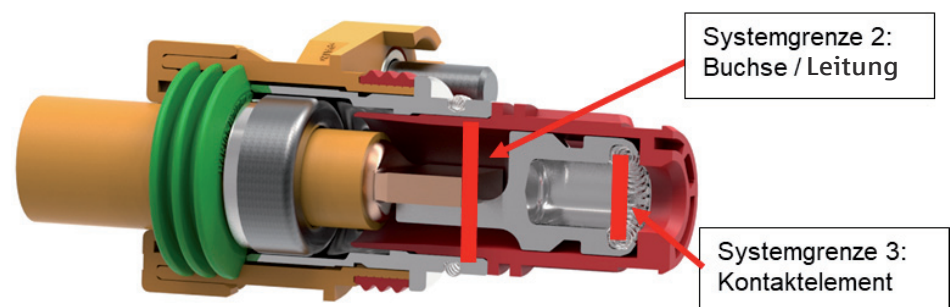
Alternativ kann der Übergangswiderstand Leiter/Innenleiter isoliert angegeben werden. Für diesen Fall muss der Kabelanteil thermisch und elektrisch dem Innenleiter zugeschlagen werden.

Für die Systemsimulation sind beide Varianten möglich. Das Parameterset dieser beiden Varianten unterscheidet sich dabei wesentlich, dennoch wird sich die Systemantwort nicht wesentlich unterscheiden.

6.4.3 Innenleiter Buchse

Der Block „Innenleiter Buchse“ wird von den elektrischen und thermischen Eigenschaften des Innenleiters zwischen den SG 2 und SG 3 bestimmt. Je nachdem, welche Leitungsbestandteile in dem Übergangswiderstand Leitungsinnenleiter (Kapitel 3.19.2) berücksichtigt wurden, werden die entsprechenden unberücksichtigten Leitungsbestandteile von Pin und Leitung diesem Block zugeschlagen.

Abb. 27: Systemgrenzen Innenleiter



Quelle: Rosenberger

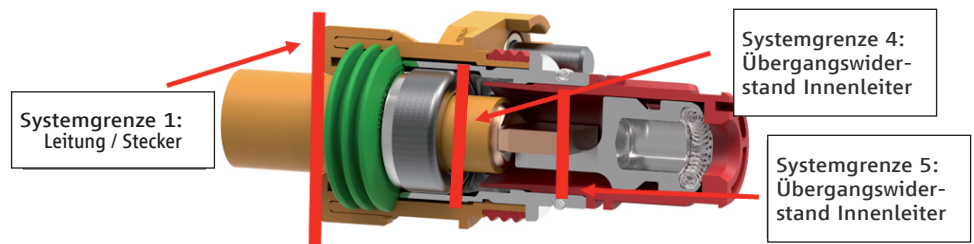
6.4.4 Wärmestrom von Kern zu Schirm

Für die Berechnung des radialen Wärmewiderstands R_{th} werden alle Komponenten des Innenleiters (Leitung + Buchseninnenleiter) zusammengefasst. Ebenso werden die Komponenten des Außenleiters, die einen Beitrag zum Entwärmen des Innenleiters leisten, zusammengefasst.

6.4.5 Crimp/Schirmübergang

Für die Berechnung des Schirmwiderstands am Leitungsübergang sind die Übergangsstelle selbst und der Leitungsanteil von der Systemgrenze bis zum Schirmübergang zu berücksichtigen. Der Metallanteil des Steckeraußenleiters zwischen SG 1 und SG 4 wird dabei dem Block Crimp/Schirmübergang zugeordnet.

Abb. 28: Systemgrenzen für Leitungsschirm



Quelle: Rosenberger

Wie auch beim Innenleiter kann der Leitungsanteil der Leitung auch dem Block „Buchse Schirm“ zugeordnet werden. Je nach Varianten muss der nicht berücksichtigte Leitungsanteil im Block „Wärmestrom durch den Schirmleiter“ aufgenommen werden.

6.4.6 Wärmestrom durch den Schirmleiter

Der Wärmestrom durch den Schirmleiter entspricht dem Metallanteil zwischen der SG 4 und SG 5 (Abbildung 28). Zudem ist der axiale Wärmewiderstand vom Buchsen- zum Steckergehäuse in diesem Block mitzuberechnen, da im Block „Wärmeleitung durch das Gehäuse“ keine axiale Wärmeleitung möglich ist. Bei Kunststoffkomponenten ist dieser Anteil sehr gering und kann i. d. R. sogar vernachlässigt werden.

6.4.7 Wärmeleitung durch das Gehäuse

Die radiale Wärmeleitung von Schirm durch das Gehäuse berücksichtigt alle wärmeleitenden Komponenten, die den Schirmleiter nach außen umgeben. Im Beispiel in Abbildung 28 sind dies das äußere Kunststoffgehäuse und das Dichtelement. Der Wärmeübergang vom Gehäuse in die Umgebung durch Konvektion und Strahlung wird in einem separaten Block berücksichtigt, um später die Variationsrechnung bezüglich dieser Anteile zu erleichtern.

6.4.8 Entwärmung über das Gehäuse

In diesem Block werden die Konvektion und Strahlung des dem Stecker umgebenden Kunststoffgehäuses berücksichtigt. Die Wärmeübergangskoeffizienten werden mit den Berechnungsgrundlagen des technischen Leitfadens ermittelt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Wärmeübergang, auf die Oberfläche des Gehäuses bezogen, auf seine Grundform normiert werden muss. Alternativ können die Ansätze aus dem VDI-Wärmeatlas verwendet werden.

6.5 Kontaktdefinition

Die Kontaktzonen müssen mit einer Kontaktformulierung modelliert werden, die den realen elektrischen und thermischen Kontaktwiderstand widerspiegelt. Hierbei wird darauf hingewiesen, dass die thermischen und elektrischen Kontakteigenschaften nicht berechnet, sondern durch Messung an realen Bauteilen bestimmt werden müssen. Zudem ist der Einfluss der Luftspalte im Kontaktbereich zu berücksichtigen.

6.6 Randbedingungen und Analyse

Ziel der FE-Simulation ist es, die Verlustleistung und die daraus resultierende Erwärmung von stromführenden Bauteilen möglichst genau zu ermitteln. Zudem soll der thermische Widerstand in Leiterausdehnung (axial) und quer dazu (radial) ermittelt werden. Für diesen Zweck wird eine gekoppelte thermisch-elektrische Simulation vorgeschlagen. Alternativ kann auch eine getrennte Betrachtung von elektrischen und thermischen Anregungen verwendet werden.

Für eine korrekte Berechnung der Kennwerte müssen alle Bauteile und Komponenten mit den richtigen geometrischen Maßen und Einbaulagen modelliert sein. Abweichungen zur Realität haben Abweichungen in den Kennwerten zur Folge. Zudem müssen allen Bauteilen die korrekten Materialmodelle zugewiesen werden, um genaue Ergebnisse zu erzielen. Dabei muss beachtet werden, dass sich die Materialeigenschaften mit der Temperatur ändern können. Somit ist es unerlässlich, dass diese Effekte in der Materialkarte korrekt hinterlegt sind.

Im Gegensatz zur Messung am realen Bauteil können bei der Berechnung der Parameter die einzelnen Anteile nicht genau voneinander getrennt werden. Aus diesem Grund wird sich der Parametersatz zwischen berechneten und gemessenen Werten immer unterscheiden.

6.7 Elektrische Verlustleistung und axialer thermischer Widerstand

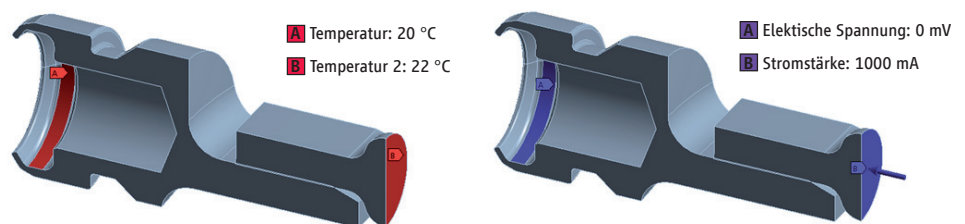
6.7.1 Axialer Wärmestrom durch Einprägen

Die elektrische Verlustleistung wird durch Einprägen eines frei wählbaren Prüfstroms berechnet. Hierfür müssen der Strom auf einer Seite und die Spannung auf der anderen Seite des Leiters definiert werden. Wird das Modell gelöst, so kann aus der Rechnung die resultierende Spannungsdifferenz ausgegeben werden. Mit dem ohmschen Gesetz kann im Anschluss der elektrische Leitungswiderstand für die Systemsimulation berechnet werden.

Ebenso verfährt man bei der Berechnung des thermischen Leitungswiderstands in Leitungsrichtung. Auf einer Seite wird die Temperatur definiert, auf der gegenüberliegenden Seite wird der Wärmestrom eingepreßt. Das Ergebnis ist dann eine Temperaturerhöhung. Analog zum ohmschen Gesetz kann auch hier mit der Temperaturdifferenz und dem eingepreßten Wärmestrom der thermische Leitungswiderstand errechnet werden.

Alternativ kann man den Wärmestrom durch die Vorgabe einer Temperaturdifferenz ermitteln.

Abb. 29: Randbedingung für die Bestimmung des elektrischen und thermischen Leitungswiderstands

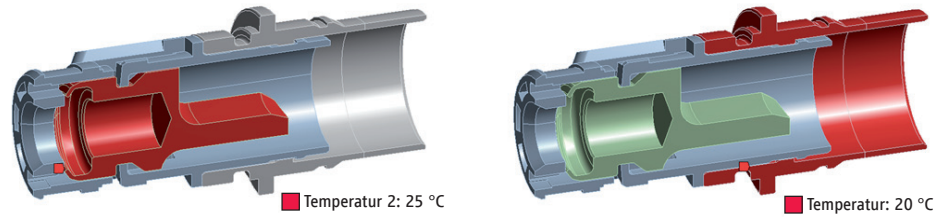


Quelle: Rosenberger

6.7.2 Radialer Wärmestrom

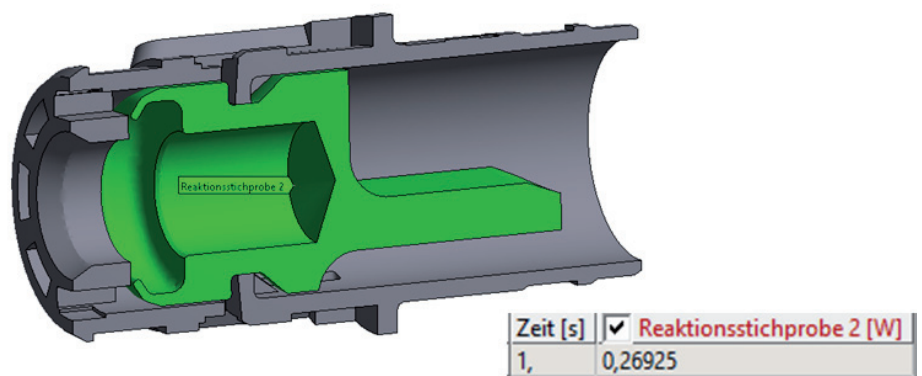
Die Berechnung des radialen Wärmestroms erfolgt ähnlich der des axialen Wärmestroms. Als eine Möglichkeit für die Randbedingung kann man auf der Seite des Innenleiters eine thermische Randbedingung anbringen. Um den Wärmestrom zu erzwingen, wird dann auf der Seite des Schirmleiters ebenfalls eine thermische Randbedingung definiert (siehe Abbildung 30). Die beiden Randbedingungen haben jedoch eine Temperaturdifferenz, die frei wählbar ist. Durch das Temperaturgefälle wird in der Berechnung ein Wärmestrom initiiert, der anschließend ausgegeben werden kann (siehe Abbildung 31). Unter Berücksichtigung der Gleichung (74) kann der Wärmewiderstand für die Systemsimulation berechnet werden.

Abb. 30: Thermische Randbedingung zum Bestimmen des radialen Wärmestroms



Quelle: Rosenberger

Abb. 31: Thermische Reaktion auf eingestellte Temperaturgefälle



Quelle: Rosenberger

6.8 Auswertung und Überführung der Parameter für die Systemsimulation

Für die Systemsimulation wird die vorhandene 3D-CAD-Geometrie auf den jeweiligen Massepunkt abstrahiert. Für den jeweiligen Baustein ergeben sich dann folgende mögliche Inhalte:

Elektrischer Widerstand	R_{el}	[Ω]
Linearer elektrischer Temperaturkoeffizient	α_{el}	[$\frac{1}{K}$]
Thermischer Widerstand	R_{th}	[K/W]
Thermische Kapazität	C_{th}	[J/K]
Linearer thermischer Temperaturkoeffizient	α_{th}	[$\frac{1}{K}$]

Die Ermittlung der Parameter für die Systemsimulation wird in diesem Kapitel allgemein beschrieben. Dabei werden gleichwertige Berechnungsansätze nur für ein Bauteil beschrieben und für ähnliche Fälle auf diese Methode referenziert.

Die für die Berechnung von Kennwerten notwendigen Stoffwerte werden aus Materialdatenblätter oder dem VDI-Wärmeatlas verwendet, sofern sie in diesem technischen Leitfaden nicht aufgeführt sind.

6.9 Notwendige Gleichungen

Elektrischer Widerstand:

$$R_{el} = \frac{\Delta U}{I} \quad (73)$$

Thermischer Widerstand:

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{Q_V} \quad (74)$$

6.10 Crimp/Übergangswiderstand (IL)

Der reale Crimpwiderstand kann auf Basis des CAD-Modells nicht ermittelt werden. Selbst mit aufwendigen Umformsimulationen ist dieser Parameter nur schwer zu bestimmen. Daher sollte dieser Parameter für jeden Übergang allgemeingültig vermessen werden. Für die Bestimmung der korrekten Leitungswiderstände müssen dabei die Abstände der Messklemmen bekannt sein, da dieser Leitungsanteil bei der Bestimmung des restlichen Leitungswiderstands verrechnet werden muss.

6.11 Buchse

Der elektrische und thermische Widerstand der Buchse wird aus dem errechneten Spannungsabfall bzw. Temperaturdifferenz in der Simulation ermittelt. Mit dem eingepprägten Strom, der als Randbedingung definiert wurde, und dem ohmschen Gesetz (Gleichung (73)) kann der Leiterwiderstand der Buchse bestimmt werden.

Die Erwärmung der Buchse wird aus der elektrischen Verlustleistung berechnet. Hierfür wird die Temperaturdifferenz, die durch die eingepprägte Wärmequelle und -senke definiert ist, durch elektrische Verlustleistung geteilt.

6.12 Kontaktfeder

Für die Berechnung des elektrischen Widerstands der Kontaktfeder muss der Kontaktwiderstand des einzelnen Kontaktpunkts zum Leitungswiderstand der Kontaktfeder addiert werden. Der Leitungswiderstand wird nach dem Prinzip von Kapitel 6.10 ermittelt. Der Leitungswiderstandsanteil kann aus der Geometrie (Kap. 6.7) berechnet werden. Der Kontaktwiderstand muß durch Messung bestimmt werden.

Für parallele Strompfade muss der Widerstand eines einzelnen Strompfads durch die Anzahl der parallelen Pfade geteilt werden (Berücksichtigung der Parallelschaltung).

6.13 Wärmeleitung Kern zu Schirm

Zur Bestimmung des radialen thermischen Widerstands wird am Innenleiter und an der Isolation die Wärmequelle und -senke mit frei wählbaren Temperaturen definiert. Durch die Berechnung des Systems kann der daraus resultierende Wärmestrom ermittelt werden. Mithilfe von Gleichung (74) wird im Anschluss der thermische Widerstand bestimmt.

6.14 Crimp/Übergangswiderstand Schirmung zwischen Buchse-Schirm, Kontaktfeder-Schirm und Wärmeleitung durch Gehäuse

Das Vorgehen zum Bestimmen des Übergangswiderstands der Schirmung ist analog dem Kapitel 6.10.

6.15 Entwärmung über Gehäuse

Die Entwärmung des Gehäuses ist den Gegebenheiten entsprechend zu modellieren. Bei Kunststoffgehäusen dominieren Konvektion und Strahlung. Diese Parameter können mit guter Näherung mit den Gleichungen aus dem Technischen Leitfadens oder mit den Stoffwerten aus dem VDI-Wärmeatlas (Kapitel Fa1 im Wärmeatlas) bestimmt werden. Bei Metallgehäusen ist vor allem der Wärmestrom durch Befestigung oder Kontakt zu einem Aggregat zu berücksichtigen.

Konvektion

Die Konvektion wird nach dem beschriebenen Vorgehen im Technischen Leitfaden berechnet. Alternativ kann man den VDI-Wärmeatlas heranziehen.

Strahlung

Der Strahlungskoeffizient kann aus dem Datenblatt des Werkstoffs entnommen werden.

7 Literaturhinweise

- [1] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman and A. S. Lavine, Principles of Heat and Mass Transfer-7th Edition, 2017.
- [2] VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, VDI-Wärmeatlas, 11. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.
- [3] K. Herrmann, Gebauer und Griller, „Vorschlag für thermisch / elektrische Leitungsparameter“, 18.10.2018, ZVEI AK Thermosimulation.
- [4] M. Ludwig, M. Leidner, H. Schmidt, TE Connectivity, „Thermisches Ersatzschaltbild“, 05.10.2018, ZVEI AK Thermosimulation.
- [5] K. Dvorsky, Physical Software Solutions GmbH, „Modelldetails für thermische Netze und Gültigkeitsbereiche“, 18.02.2019, ZVEI AK Thermosimulation.



ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik-
und Elektronikindustrie e.V.

Lyoner Straße 9
60528 Frankfurt am Main

Telefon: +49 69 6302-0

Fax: +49 69 6302-317

E-Mail: zvei@zvei.org

www.zvei.org