

**Michael Blauth**

**Parametrisierte Modelle zur konstruktiven  
Auslegung optimierter elektrischer  
Steckverbinderkontakte**

# **Ilmenauer Beiträge zur elektrischen Energiesystem-, Geräte- und Anlagentechnik (IBEGA)**

Herausgegeben von  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Westermann  
(Fachgebiet Elektrische Energieversorgung) und  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Berger  
(Fachgebiet Elektrische Geräte und Anlagen)  
an der Technischen Universität Ilmenau.

**Band 18**

Michael Blauth

**Parametrisierte Modelle  
zur konstruktiven Auslegung  
optimierter elektrischer  
Steckverbinderkontakte**



Universitätsverlag Ilmenau  
2017

# Impressum

## Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Diese Arbeit hat der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Ilmenau als Dissertation vorgelegen.

Tag der Einreichung: 18. Oktober 2016

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Berger  
(Technische Universität Ilmenau)

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jian Song  
(Hochschule Ostwestfalen-Lippe)

3. Gutachter: Dr.-Ing. Christian Helmig  
(PHOENIX CONTACT GmbH & Co. KG)

Tag der Verteidigung: 6. Februar 2017

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

### Universitätsverlag Ilmenau

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

[www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag](http://www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag)

### Herstellung und Auslieferung

Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

[www.mv-verlag.de](http://www.mv-verlag.de)

**ISSN** 2194-2838 (Druckausgabe)

**ISBN** 978-3-86360-155-3 (Druckausgabe)

**URN** urn:nbn:de:gbv:ilm1-2017000035

---

### Titelfotos:

©iStockphoto.com : JLGutierrez ; timmy ; 3alexnd ; Elkencize ; tap10  
yuyang/Bigstock.com

M. Streck, FG EGA | F. Nothnagel, FG EGA | D. Westermann, FG EEV

## Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand in großen Teilen während meiner Zeit im Labor für Feinsystemtechnik an der Hochschule Ostwestfalen-Lippe. Die Arbeit wurde erst durch die finanzielle Unterstützung im Rahmen eines Promotionsstipendiums der Phoenix Contact-Stiftung ermöglicht.

Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Mein besonderer Dank geht an:

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Berger von der TU Ilmenau für die hilfreichen Anregungen und wichtigen Hinweise zu dieser Arbeit und die Übernahme des Gutachtens,

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jian Song von der Hochschule Ostwestfalen-Lippe für die Betreuung während meiner Zeit an der Hochschule, die wertvollen Diskussionen und die Übernahme des Gutachtens,

Herrn Dr. Helmig, Herrn Tobias Kochjohann und Herrn Dr. Beier von der Firma Phoenix Contact GmbH & Co. KG für die Anregung zu dieser Arbeit, die fachliche Unterstützung und die guten Arbeitsbedingungen, alle Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern in der Technologieentwicklung DC bei Phoenix Contact GmbH & Co. KG und im Labor für Feinsystemtechnik an der Hochschule Ostwestfalen-Lippe für die Unterstützung bei der Durchführung der Untersuchungen, für die hilfreichen Gespräche und für das freundliche Arbeitsklima.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Frau Carina und unseren Kindern Jonathan und Lennard für die Geduld und das Verständnis, das sie mir während der ganzen Zeit entgegengebracht haben.

Paderborn, im Februar 2017

Michael Blauth

## **Kurzfassung**

Im Rahmen dieser Arbeit wird die konstruktive Auslegung von Steckverbindern hinsichtlich der Stromtragfähigkeit untersucht.

Zunächst werden bekannte analytische Modelle aus verschiedenen physikalischen Phänomenen (mechanische, elektrische, thermische und kontaktphysikalische) miteinander kombiniert, um die Stromerwärmung von Steckverbinderkontakten incl. der angeschlossenen Leitung analytisch zu berechnen. Die Modelle werden mit Hilfe von Experimenten und FE-Analysen verifiziert.

Anschließend werden die analytischen Modelle umgeformt, um wichtige Fragestellungen bei der konstruktiven Auslegung von Steckverbinderkontakten zu berechnen. Dazu zählen unter anderem der maximal zulässige Durchgangswiderstand von Steckverbinderkontakten, der Zusammenhang zwischen Durchgangswiderstand und Stromerwärmung, sowie die optimale Anzahl an Kontaktfedern für einen Steckverbinderkontakt. Zudem werden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um den Einfluss konstruktionsrelevanter Parameter auf die Stromerwärmung von Steckverbinderkontakten darzustellen.

Durch die gewonnenen Ergebnisse wird schließlich ein Vorgehen zur systematischen Auslegung von Steckverbinderkontakten hinsichtlich der Stromtragfähigkeit erarbeitet. Dieses nutzt analytische Modelle (parametrisierte Modelle), mit denen sich wesentliche geometrische Abmessungen und Werkstoffkennwerte berechnen lassen. Dadurch können Baureihen von Steckverbinderkontakten entwickelt werden, die einer einheitlichen Methodik folgen, eine Überdimensionierung vermeiden und sich für verschiedene Stromstärken skalieren lassen.

Die Arbeit stellt damit einen Ansatz zur parametrischen Konstruktion von Steckverbindern dar.

## **Abstract**

The aim of this work is to investigate the design of connector contacts according to a specific current carrying capacity.

At first established analytical models of different physical phenomena (mechanic, electric, thermal and contact physical) are combined. Thus, the heating of connector contacts including the connected wire can be calculated analytically. The models are verified by experiments and by FE-Analysis.

Afterwards, these analytical models are transformed in order to calculate important parameters for the design process of connector contacts. This includes the maximum permissible power loss of a connector contact, the relationship between the transition resistance and the heating, as well as the optimal number of contact springs for a connector contact. Additionally, sensitivity studies are conducted, in order to illustrate the influence of several design parameters on the heating of connector contacts.

Using the obtained results, a systematic approach for dimensioning connector contacts with respect to the current carrying capacity is presented. This approach uses analytical models (parametrized models) in order to calculate the main geometrical and material parameters. Thus, connector contacts can be designed using a uniform method, which maximises the performance potential and which is scalable for different current ratings.

Therefore, this work presents an approach for the parametric design of connector contacts.

Für Carina.

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Zielstellung der Arbeit .....	8
1.2	Aufbau der Arbeit.....	11
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen .....</b>	<b>12</b>
2.1	Funktion und Aufbau von Steckverbinderkontakten .....	12
2.2	Konstruktionsprozess bei Steckverbinderkontakten.....	16
2.3	Modellbildung, Simulation und Optimierung am Beispiel von Steckverbinderkontakten.....	19
2.3.1	Analytische Verfahren .....	22
2.3.2	Numerische Verfahren .....	23
2.3.3	Optimierung von Bauelementen .....	26
2.4	Grundlagen zur Ermittlung kontaktphysikalischer Eigenschaften .....	29
2.4.1	Kontaktkraft.....	31
2.4.1.1	Festlegung der Kontaktkraft .....	31
2.4.1.2	Berechnung der Kontaktkraft von Biegefedern.....	35
2.4.2	Kontaktwiderstand.....	39
2.4.2.1	Kontaktfläche (Mechanische Betrachtung) .....	42
2.4.2.2	Engewiderstand (Elektrische Betrachtung) .....	53
2.4.2.3	Empirische Ermittlung des Kontaktwiderstandes.....	60
2.5	Dimensionierung des Bahnbereiches von Steckverbinderkontakten.....	64
2.6	Vereinfachung des Leiteranschlussbereiches .....	66
<b>3</b>	<b>Thermische Modellbildung, Berechnung und Verifikation.....</b>	<b>69</b>
3.1	Thermische Modelle zur Auslegung von Steckverbinderkontakten.....	71
3.1.1	Analytischer Ansatz zur Berechnung der Erwärmung .....	71
3.1.2	Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten.....	73
3.1.2.1	Wärmeübergangskoeffizient für Wärmekonvektion .....	73
3.1.2.2	Wärmeübergangskoeffizient für Wärmestrahlung.....	78
3.2	Leiterübertemperatur .....	82
3.2.1	Thermische Modellbildung der Leitung.....	82
3.2.2	Berechnung und Verifikation der Leiterübertemperatur .....	85

3.3 Temperaturgradient zwischen Steckverbinder und Leitung .....	90
3.3.1 Thermische Modellbildung mit axialem Wärmestrom .....	90
3.3.2 Thermische Ortskonstante einer Leitung .....	92
3.3.3 Thermische Randbedingungen .....	94
3.4 Temperaturdifferenz an kurzen Teilbereichen .....	96
3.5 Temperaturdifferenz an der Kontaktstelle .....	97
3.6 Wärmeströme an dem Steckverbinderkontakt .....	99
3.7 Thermische Modellbildung des Gesamtsystems .....	101
3.8 Verifikation der Erwärmung von Steckverbinderkontakten .....	105
3.8.1 Prüfmuster und Versuchsaufbau .....	105
3.8.2 Berechnung und Verifikation .....	108
<b>4 Parametrisierte Modelle für Steckverbinderkontakte .....</b>	<b>111</b>
4.1 Dimensionierung des maximalen Durchgangswiderstandes .....	113
4.1.1 Berechnung des maximalen Wärmestroms in die Leitung .....	117
4.1.2 Maximal zulässiger Durchgangswiderstand .....	120
4.2 Zusammenhang zwischen Durchgangswiderstand und Erwärmung .....	122
4.3 Ermittlung der optimalen Anzahl an Kontaktfedern .....	124
4.3.1 Szenarien zur Bestimmung des Durchgangswiderstandes der Kontaktfedern .....	126
4.3.2 Beispielhafte Berechnung des Einflusses der Anzahl an Kontaktfedern .....	130
4.3.3 Restriktionen für die optimale Anzahl an Kontaktfedern .....	132
4.4 Sensitivitätsanalyse bezüglich der Erwärmung von Steckverbinderkontakten .....	134

---

<b>5 Vorgehen zur konstruktiven Auslegung von Steckverbinderkontakten .....</b>	<b>139</b>
<b>6 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>144</b>
<b>Formelzeichen und Abkürzungen.....</b>	<b>149</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>159</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>185</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>191</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>195</b>
A1 Auswahl wichtiger Eigenschaften von Steckverbinderkontakten.....	196
A2 Wesentliche Teilfunktionen der Bauelemente einer Steckverbindung .....	197
A3 Formelsammlung.....	198
A4 Mögliche Einflussparameter auf den Kontaktwiderstand.....	209
A5 Geometrische und elektrische Parameter von Leitungen .....	210
A6 Geometrisch-stoffliche Parameter der untersuchten Steckverbinderkontakte .....	211
A7 Ergänzung möglicher Fragestellungen und Einflüsse.....	213
A8 Beispielhafte konstruktive Auslegung von runden Steckverbinderkontakten für 100 A und 300 A .....	214



## 1 Einleitung

Elektrische Steckverbinder sind lösbare elektromechanische Verbindungselemente. Sie werden dazu verwendet, Bauelemente oder Baugruppen elektrisch und mechanisch voneinander zu trennen bzw. diese zu Funktionseinheiten zusammenzufügen. Die wesentliche Funktion von elektrischen Steckverbindern besteht darin, an einer lösbaren elektrischen Verbindungsstelle Signale und Leistung mit ausreichender Qualität über die ganze Nutzungsdauer zu übertragen. Dabei dürfen die Steckverbinder weder zu einer Störung des Signals, noch zu einer unzulässigen Verlustleistung führen [Mro93 S.15, ViKc02 S.403, Dij04 S.10].

Das weltweite Geschäft mit Steckverbindern hatte im Jahr 2014 ein Volumen von 39,7 Mrd. Euro [ZVE15 S.9]. Durch die Elektrifizierung und Modularisierung von Anlagen und Systemen nehmen sowohl die Anzahl, als auch die Bedeutung und die Anforderungen an Steckverbinder zu [MoSo98, Ber14, ZVE15 S.10]. Aufgrund neuer elektronischer Systeme und Funktionen sind beispielsweise in einem modernen PKW etwa 250 Steckverbinder mit ca. 2000 elektrischen Kontakten zu finden [Sum15]. Dabei bestimmen sie wesentlich die Zuverlässigkeit, Funktion und Kosten ganzer Systeme [Bei93, Wac06, ZVE15].

Für verschiedene Anwendungsbereiche (z.B. Automobiltechnik, Datentechnik, Konsumelektronik und Industrieelektronik) werden unterschiedliche Steckverbinder verwendet. Beispielhaft sind in Abbildung 1-1 typische elektrische Steckverbinder für die Leistungsübertragung dargestellt.



Abbildung 1-1: Ladestecker der Automobiltechnik, Photovoltaik-Steckverbinder und Industrie-Steckverbinder [Pho16]

Steckverbinder besitzen unterschiedliche Eigenschaften, die für den Anwender von Interesse sind. Eine Auswahl der wichtigsten Eigenschaften ist im Anhang A1 aufgeführt. Eigenschaften von Steckverbindern wie z.B. die Steck- und Ziehkräfte, der Verschleiß oder der Durchgangswiderstand können sehr lokal dem Steckverbinderkontakt zugeordnet werden. Die Stromerwärmung (hier Erwärmung genannt) von Steckverbindern ist allerdings stark von dem Gesamtsystem abhängig und wird neben den Steckverbinderkontakten auch von dem angeschlossenen Leiter, dem Gehäuse und den Umgebungsbedingungen beeinflusst. Es ist abzusehen, dass sich in der Zukunft höhere Anforderungen an die Stromübertragung von Steckverbinderkontakten ergeben [ZVE06 S.16, Ber14]. Daher wird in dieser Arbeit speziell die Stromtragfähigkeit von Steckverbinderkontakten wissenschaftlich untersucht. Die Stromtragfähigkeit (auch Strombelastbarkeit genannt), ist eine sehr wichtige Eigenschaft von Steckverbinderkontakten für die Leistungsübertragung. Sie gibt den maximalen Dauerstrom an, der unter Berücksichtigung der Umgebungstemperatur für den Steckverbinder zulässig ist. Dabei darf eine vorgegebene Grenztemperatur nicht überschritten werden. Um die Stromtragfähigkeit von Steckverbinderkontakten zu ermitteln, muss die stromabhängige Erwärmung im stationären Zustand gemessen oder berechnet werden.

Die Gesamtfunktion von elektrischen Steckverbindern wird vornehmlich durch die Steckverbinderkontakte (Kontaktbuchse und Kontaktstift) bestimmt (Abbildung 1-2). Zur Erreichung der Gesamtfunktion erfüllen die einzelnen Bauelemente unterschiedliche Teilfunktionen. Diese sind im Anhang A2 aufgelistet.

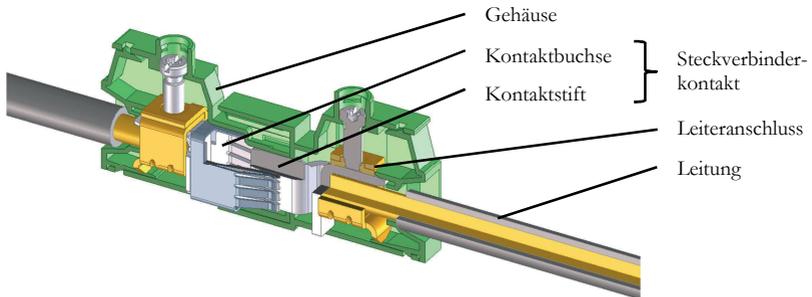


Abbildung 1-2: Bauelemente einer Steckverbindung, die zwei Leitungen verbindet

Steckverbinderkontakte kommen ebenso wie Maschinenelemente aus dem allgemeinen Maschinenbau (z.B. Schraubenverbindungen, Federn, Lager) immer wieder in gleicher oder ähnlicher Form vor. Im Gegensatz zu den meisten Maschinenelementen gibt es bei Steckverbinderkontakten allerdings noch keine vergleichbaren Hilfsmittel für die konstruktive Auslegung der Bauelemente. Daher wird zunächst am Beispiel von Schrauben kurz auf wesentliche Merkmale von Maschinenelementen eingegangen.

Schrauben sind das am häufigsten verwendete Maschinenelement [MRM05 S.194] und ein typisches Beispiel für ein Bauelement, welches in unzähligen Varianten hergestellt wird. Sowohl die konstruktive Auslegung, als auch die Auswahl der richtigen Schraubenverbindung werden dadurch vereinfacht, dass es für dieses Maschinenelement sowohl Konstruktionsmethoden, als auch Skalierungsregeln bzw. parametrisierte Modelle in Form von genormten Grundformen und Konstruktionstabellen gibt [BIII88, KITh07, VDI14]. Dadurch werden die geometrischen Abmessungen gebräuchlicher Grundformen von Schrauben, Schraubenköpfen, Gewindearten etc. für unterschiedliche Größen festgelegt. So hat der Anwender die Auswahl zwischen einheitlichen Schraubentypen und kann unter anderem zwischen verschiedenen Gewinden, Festigkeiten, Längen und Durchmessern wählen. Diese sind als Baureihen in vielen Größenabstufungen zu finden. Da die wesentlichen mechanischen Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen den Einflussparametern und Eigenschaften von Schrauben durch analytische Gleichungen quantitativ beschrieben sind, kann zudem eine systematische und überschlägige Berechnung

der Dimensionen von Bauelementen durchgeführt werden [Blil88, Ehr04 S.57, KlTh07 S.3, VDI14]. Für spezifische Anforderungen lassen sich dadurch individuelle Schrauben mit optimierten Eigenschaften auswählen.

In Analogie zu Schrauben können für die Zukunft z.B. folgende Zielstellungen bei der konstruktiven Auslegung von optimierten Steckverbinderkontakten abgeleitet werden:

Konstruktion nach unterschiedlichen Zielgrößen, hinsichtlich derer ein Steckverbinderkontakt optimiert werden kann (z.B. hohe Stromtragfähigkeit, hohe Anzahl an Steckzyklen, geringe Steck- und Ziehkräfte oder geringer Bauraum).

Grenzwertige Auslegung, d.h. keine Überdimensionierung, um Funktions- und Leistungsreserven voll auszuschöpfen.

Skalierbare Baureihenkonstruktion von Steckverbinderkontakten z.B. für verschiedene Stromstärken.

Vorgehen zur konstruktiven Auslegung von Steckverbinderkontakten.

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, ist eine genaue Kenntnis über die Funktionsweise, sowie über die Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen den Einflussparametern und Eigenschaften des Systems erforderlich [BrSc37, MoSo98, Ehr04 S.3, Son07, Vin16 S.969]. Viele Zusammenhänge sind in den verschiedenen physikalischen Phänomenen (mechanische, elektrische, thermische und kontaktphysikalische) grundlegend untersucht und durch Gleichungen beschrieben. Dadurch lassen sich bisher einzelne Teileigenschaften von Steckverbinderkontakten wie z.B. die Federkraft, der Engewiderstand oder die Steckkraft analytisch berechnen. In dieser Arbeit werden die verschiedenen physikalischen Phänomene gekoppelt, um die Erwärmung bei dem System Steckverbinderkontakt berechnen und optimieren zu können.

Nach [Kra00 S.22] ist ein technisches System (hier Steckverbinderkontakt) ein abgegrenzter Bereich der Wirklichkeit, das Beziehungen zu seiner Umgebung (z.B. Bedienung, Gehäuse) hat, bestimmte Funktionen erfüllt (z.B. lösbare Verbindungsstelle, Stromübertragung) und eine Struktur (Aufbau des Systems mit Systemelementen und deren Relationen) aufweist. Auf das System wirken

Eingangsgrößen und Ausgangsgrößen, die nach ihrer Relevanz unterschieden werden können (Abbildung 1-3).

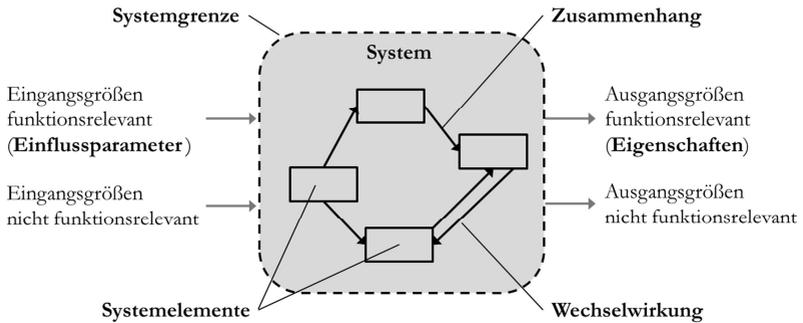


Abbildung 1-3: Systemparameter in Anlehnung an [Kra00 S.22, Vin16 S.970]

Bei der Berechnung von Eigenschaften eines Systems wird überprüft, ob ein entworfenes und vorläufig ausgelegtes Bauelement bestimmte Forderungen erfüllt [Kra04 S.48]. Zunächst müssen die Einflussparameter vorgegeben werden. Dies ist in Abbildung 1-4 exemplarisch anhand der Stromtragfähigkeit dargestellt. Einflussparameter sind zum einen konstruktive Größen wie die Systemstruktur (z.B. Anordnung und Anzahl der Bauelemente), die Bauteilgeometrie (z.B. geometrische Abmessungen der einzelnen Bauelemente und Bereiche) und der Werkstoff des Steckverbinderkontaktes. Zudem müssen sowohl Randbedingungen (z.B. die Umgebungstemperatur oder die zulässige Grenztemperatur), als auch die Belastung des Systems in Form des zu übertragenden Stroms berücksichtigt werden (Abbildung 1-4). Mit z.B. der FE-Analyse lassen sich anschließend gekoppelte Feldprobleme mit mehreren physikalischen Phänomenen lösen. Dadurch kann anhand einer vorgegebenen Bauteilgeometrie die Erwärmung und im Folgenden die Stromtragfähigkeit von Steckverbinderkontakten in der frühen Phase des Konstruktionsprozesses berechnet werden.

Bei einer konstruktiven Auslegung neuer Steckverbinderkontakte liegen dagegen weder die Bauteilgeometrie noch die Werkstoffkennwerte der Bauelemente vor. Von dem Kunden werden nur die für ihn wichtigen Eigenschaften und Randbedingungen vorgegeben. Anschließend müssen im Rahmen der kon-

struktiven Auslegung die geometrisch-stofflichen Parameter des Steckverbinderkontaktes definiert werden, sodass dieser den Anforderungen genügt (Abbildung 1-4). Die konstruktive Auslegung von Steckverbinderkontakten ist damit ein sehr viel komplexerer Prozess als die reine Berechnung von Eigenschaften. Da es keine eindeutige Lösung gibt, ist eine direkte Berechnung der konstruktiven Einflussparameter aus einer vorgegebenen Eigenschaft nicht möglich.

Derzeit stellt die konstruktive Auslegung neuer Steckverbinderkontakte einen iterativen Prozess dar, bei dem sich der Entwickler durch wiederholte Berechnung und Änderung von Parametern schrittweise der Lösung nähert. Dies ist nicht nur sehr zeit- und kostenintensiv, sondern auch durch individuelle Erfahrungen des Entwicklers geprägt. Wenn es allerdings darum geht, neue Produkte mit z.B. höherer Stromstärke zu entwickeln, muss extrapoliert werden. Dabei können Erfahrungen oftmals trügerisch sein, da es sich um nichtlineare und komplexe Zusammenhänge mit vielen Wechselwirkungen handelt (siehe Abbildung 3-19 und Abbildung 4-11). Um bei gleichem Erwärmungsverhalten statt eines Steckverbinderkontaktes für 100 A einen für 300 A konstruktiv auszulegen, müssen verschiedene Parameter angepasst werden. Darauf Einfluss haben z.B. der Querschnitt des Bahnbereiches, die Anzahl an Kontaktstellen bzw. Kontaktfedern oder die elektrische Leitfähigkeit des Basismaterials. Die Frage im Rahmen der konstruktiven Auslegung ist wie die Parameter zu wählen sind, um die geforderten Eigenschaften zu erfüllen. Wenn bei annähernd gleichem Betriebsverhalten statt eines hochleitfähigen Basismaterials eines mit geringer elektrischer Leitfähigkeit verwendet werden kann, oder wenn bei gleichem Werkstoff ein geringerer Querschnitt notwendig ist, hat dies eine erhebliche Kosteneinsparung zur Folge. Diese Fragestellungen haben somit große Auswirkungen auf die Qualität und Herstellkosten der Produkte.



Abbildung 1-4: Vorgehen bei der Berechnung von Eigenschaften und bei der konstruktive Auslegung am Beispiel der Stromtragfähigkeit

## 1.1 Zielstellung der Arbeit

Zielstellung dieser Arbeit ist es, die Erwärmung und die konstruktive Auslegung von Steckverbinderkontakten für die Leistungsübertragung wissenschaftlich zu untersuchen.

Für einzelne physikalische Phänomene (mechanische, elektrische, thermische und kontaktphysikalische) sind viele Zusammenhänge in der Literatur grundlegend untersucht und durch Gleichungen beschrieben. Bisher wurden Teil-Eigenschaften von Steckverbinderkontakten wie z.B. die Federkraft, der Enge-widerstand oder die Steckkraft analytisch berechnet. In dieser Arbeit sollen die verschiedenen physikalischen Phänomene auf mathematisch-physikalischer Abstraktionsebene gekoppelt werden, um die Erwärmung von Steckverbinderkontakten incl. der angeschlossenen Leitung analytisch berechnen und optimieren zu können. Es muss geklärt werden, wie bekannte analytische Gleichungen aus unterschiedlichen physikalischen Phänomenen gekoppelt werden können und wie weit sie für die Berechnung der Erwärmung von Steckverbinderkontakten anwendbar sind. Die Modelle müssen mit geeigneten Methoden (z.B. Experimente oder FE-Analyse) verifiziert werden.

Bei der konstruktiven Auslegung von Steckverbinderkontakten hinsichtlich einer bestimmten Stromtragfähigkeit gibt es grundsätzliche Fragestellungen, die in der Literatur nur ansatzweise beantwortet wurden. Folgende Fragestellungen ergeben sich bei jeder konstruktiven Auslegung von neuen Steckverbinderkontakten. Bisher können sie nicht eindeutig geklärt werden. Daher sollen sie im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden:

- Optimale Anzahl an Kontaktstellen bzw. Kontaktfedern
- Zusammenhang zwischen Durchgangswiderstand und Erwärmung
- Minimale elektrische Leitfähigkeit des Basismaterials
- Einfluss konstruktionsrelevanter Parameter auf die Erwärmung (Sensitivitätsanalyse)

Der Konstruktionsprozess neuer Steckverbinderkontakte stellt derzeit einen iterativen Prozess dar, der zeit- und kostenintensiv ist. Um den Konstruktionsprozess zu vereinfachen, soll ein Vorgehen zur konstruktiven Auslegung von

Steckverbinderkontakten erarbeitet werden. Methodische Vorgehensweisen zur konstruktiven Auslegung von elektrischen Geräten wie z.B. Schaltgeräte sind bekannt [Jäg81a, Jäg81b, KuWa87, BAK95, Bar03]. Auch gibt es z.B. für Zahnradgetriebe Ansätze, anstatt des üblichen Konzeptes der iterativen Abfolge von Synthese und Analyse, was weitgehend dem intuitiven Prinzip des „Trail-And-Error“ entspricht, explizite Entwurfsmodelle zu verwenden [POS16]. Durch quantitative Vorgaben werden anhand formaler Zusammenhänge (parametrisierte Modelle) einzelne Parameter direkt berechnet, wodurch sich schnelle und hochwertige Entwürfe generieren lassen.

Für die konstruktive Auslegung von Steckverbinderkontakten hinsichtlich einer bestimmten Stromtragfähigkeit gibt es noch keine vergleichbaren Ansätze. Ziel ist es, den Konstruktionsprozess und die Entscheidungen nachvollziehbar zu machen. Zudem sollen Baureihen von Steckverbinderkontakten entwickelt werden, die einer einheitlichen Methodik folgen, eine Überdimensionierung vermeiden, sich für verschiedene Stromstärken skalieren lassen und die Teilevielfalt einschränken. Erstrebenswert ist ein Berechnungsprogramm, welches durch die Vorgabe von Eigenschaften, Belastungen und Randbedingungen (Abbildung 1-4) in der frühen Phase des Konstruktionsprozesses eine geometrisch-stoffliche Grobdimensionierung von Steckverbinderkontakten durchführt.

Anzumerken ist, dass ein Steckverbinderkontakt unter sehr verschiedenen Umgebungsbedingungen und in unterschiedlichen Gehäusen verbaut werden kann, wodurch das thermische Verhalten wesentlich beeinflusst wird. Zur Angabe einer Stromerwärmung, die alleine für den Steckverbinderkontakt typisch ist und nicht von dem Isolierkörper beeinflusst wird, bezieht man sich laut [Vin16 S.581] auf den frei in Luft angeordneten einzelnen Steckverbinderkontakt. Durch z.B. ein Gehäuse, eine thermisch unsymmetrische Belastung oder kurze Leitungen kann sich die Erwärmung im Vergleich zu einem frei in Luft untersuchten Kontakt mit einer langen Leitung entweder erhöhen oder verringern. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein einpoliger Steckverbinderkontakt ohne Gehäuse frei in Luft untersucht. Zudem wird die Leitungslänge als lang im Vergleich zu der thermischen Ortskonstante betrachtet. Dadurch

entstehen reproduzierbare Ergebnisse, die Vergleiche zwischen verschiedenen Steckverbinderkontakten zulassen.

Es gibt sehr unterschiedliche Arten von Steckverbinderkontakten (siehe Abbildung 2-2). Im Rahmen dieser Arbeit werden speziell die Parameter, Werkstoffe und Bauteilgeometrien herausgestellt, die für flache und runde Steckverbinderkontakte mit geschlitzten Kontaktfedern relevant sind. Für Steckverbinderkontakte mit z.B. Kontaktlamellen ist das Vorgehen übertragbar.

## 1.2 Aufbau der Arbeit

Zunächst werden die Funktion, der Aufbau und der Konstruktionsprozess von Steckverbinderkontakten erläutert, um sowohl Gemeinsamkeiten, als auch Unterscheidungsmerkmale verschiedener Steckverbinderkontakte und angrenzender Fachdisziplinen darzustellen. Den verschiedenen Konstruktionsphasen werden Berechnungsmethoden (analytische Berechnung und FE-Analyse) zugeordnet und deren Vor- und Nachteile aufgezeigt.

Aus der Literatur bekannte Grundlagen, Modellvorstellungen und mathematisch-physikalische Modelle der verschiedenen physikalischen Phänomene, die zur analytischen Berechnung der Erwärmung von Steckverbinderkontakten notwendig sind, werden daraufhin erläutert. Anschließend werden Berechnungsmodelle ausgewählt, miteinander kombiniert und durch geeignete Randbedingungen der Systemstruktur von Steckverbinderkontakten angepasst.

Die Verifikation der analytischen Modelle findet durch Quervergleiche zu FE-Analysen statt. Zudem werden Experimente durchgeführt, um Zwischengrößen (Abbildung 1-4) der Modelle zu verifizieren. Mit Hilfe der verifizierten Modelle kann die Erwärmung von Steckverbinderkontakten berechnet werden. Des Weiteren lassen sich die Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen den wesentlichen Einflussparametern und der Erwärmung von Steckverbinderkontakten ablesen.

Im Zweiten Teil der Arbeit werden grundsätzliche Untersuchungen zur Erwärmung und zur konstruktiven Auslegungen von Steckverbinderkontakten erarbeitet. Die analytischen Modelle zur Berechnung der Erwärmung werden verwendet, um parametrisierte Modelle zu erzeugen. Mit diesen Modellen lassen sich konstruktive Größen berechnen. Anhand der Erkenntnisse wird ein Vorgehen zur konstruktiven Auslegung von Steckverbinderkontakten hinsichtlich der Stromtragfähigkeit erarbeitet. Mit Hilfe der parametrisierten Modelle werden abschließend im Anhang A8 Rundkontakte exemplarisch konstruktiv ausgelegt.

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Funktion und Aufbau von Steckverbinderkontakten

Die Gesamtfunktion einer Steckverbindung wird wesentlich durch die Steckverbinderkontakte in Form von Kontaktstift und Kontaktbuchse bestimmt, da über diese der Stromfluss stattfindet. Besonders wichtig sind dabei die stromführungsfähigen Berührungsstellen zwischen den leitfähigen Bauelementen, welche als elektrische Kontakte bezeichnet werden [ESE74 S.130, ViKe02 S.1].

An einem Steckverbinderkontakt sind immer mehrere elektrische Kontakte zu finden, die sich grundsätzlich unterscheiden. Im Leiteranschlussbereich zwischen dem Leiter und dem Steckverbinderkontakt liegt typischerweise ein Flächenkontakt vor. Dieser kann als permanente stoff-, kraft- oder formschlüssige Kontaktstelle (z.B. Löten, Schweißen, Crimpen) oder als bedingt lösbare Kontaktstelle (z.B. Schraubanschluss, Federkraftanschluss) ausgeführt werden. Der elektrische Kontakt zwischen der Kontaktbuchse und dem Kontaktstift (Abbildung 2-1) ist wesentlich für die Erfüllung der Gesamtfunktion des Steckverbinders. Dabei handelt es sich hier typischerweise um kraftschlüssige Punkt- oder Linienkontakte.

Die Funktionsstruktur eines Steckverbinderkontaktes ist in Abbildung 2-1 dargestellt. Funktionsbestimmend sind die an den elektrischen Kontakten aufgebrachte Kontaktkraft am Leiteranschluss  $F_T$  und die Kontaktkraft  $F_K$  im Kontaktpunkt der lösbaren Kontaktstelle.

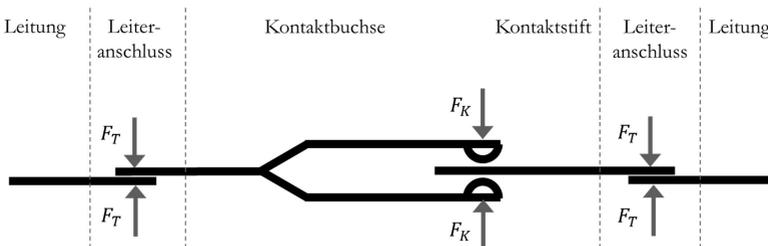


Abbildung 2-1: Funktionsstruktur eines Steckverbinders mit kraftschlüssigen Verbindungen

In Abbildung 2-2 sind verschiedene Arten von Steckverbinderkontakten dargestellt. Unabhängig von ihrer Funktion können sie nach ihrer geometrischen Grundform in Flachkontakte und Rundkontakte unterschieden werden. Innerhalb dieser beiden Arten gibt es verschiedene technische Prinzipien, die zur Erzeugung des elektrischen Kontaktes verwendet werden.

Bei geschlitzten Kontaktfedern [Pho13, HAR15] handelt es sich um eine einteilige Konstruktion der Kontaktbuchse. Die einzelnen Kontaktfedern sind durch Schlitzte getrennt, wodurch sie unabhängig voneinander federn können. Die Kontaktkraft wird durch Auslenkung der angestellten Kontaktfedern erzeugt und der Stromfluss findet direkt von der Kontaktbuchse zu dem Kontaktstift statt.

Bei Steckverbinderkontakten mit Kontaktlamellen [Mul09, ODU13] oder einem Kontaktdraht [ODU13, BAL14] ist ein zusätzliches Bauelement zwischen der Kontaktbuchse und dem Kontaktstift vorhanden. Dieses dient als Federelement zur Erzeugung der Kontaktkraft. Gleichzeitig findet der Stromfluss darüber statt, wodurch eine zusätzliche elektrische Kontaktstelle und ein zusätzlicher Bahnwiderstand (Abbildung 2-6) entsteht.

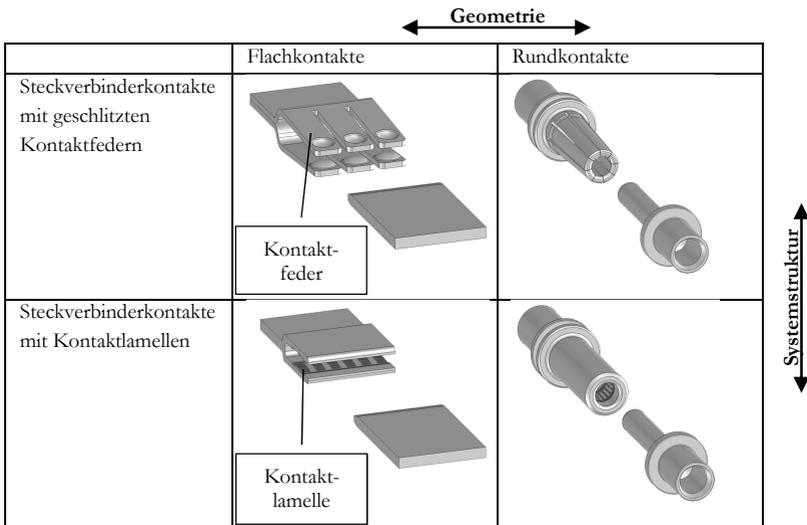


Abbildung 2-2: Arten von Steckverbinderkontakten

Die Gemeinsamkeit der verschiedenen Arten von Steckverbinderkontakten liegt darin, dass sie aus mindestens zwei Hälften (Kontaktbuchse und Kontaktstift) bestehen. Zudem ist stets ein Federelement zu finden, durch das die Kontaktkraft erzeugt wird. Bei den verschiedenen Federelementen sind sowohl die Art der Kräfteerzeugung (elastische Kräfte), die physikalische Wirkungsweise (Hooke'sches Gesetz), als auch der dazugehörige Effekt in Form einer Federdeformation [Rot82 S.125] gleich.

In Abbildung 2-2 ist zu sehen, dass sich die Steckverbinderkontakte sowohl in der Geometrie (z.B. Geometrie der Kontaktfedern und des Bahnbereiches), als auch in der Systemstruktur (z.B. Anordnung und Anzahl der Bauelemente) unterscheiden können.

Bei der Umsetzung von Steckverbinderkontakten gibt es ebenfalls eine Vielzahl verschiedener Unterscheidungsmerkmale:

- Fertigungsverfahren, z.B. Stanz- und Biegeverfahren, Drehverfahren
- Basismaterial, z.B. Kupfer und verschiedene Kupferlegierungen
- Oberfläche, z.B. Gold, Silber, Zinn, Nickel, Palladium
- Anzahl und Geometrie der Kontaktstellen und Kontaktfedern
- Geometrie des Bahnbereiches
- Kontaktkraft und Federcharakteristik von Kontaktfedern
- Funktionsintegration oder Funktionstrennung, z.B. Verwendung von Überfedern

Diese Unterschiede beruhen u.a. auf funktionellen und wirtschaftlichen Anforderungen an Steckverbinderkontakte. Allerdings können sie auch zu einer hohen Teilevielfalt führen.

Unabhängig von der Art des Steckverbinderkontaktes werden Steckverbinder in ihrer Anwendung hinsichtlich Strom, Spannung und Frequenz unterschieden [Vin16 S.562]. Die funktionellen Anforderungen unterscheiden sich dabei grundsätzlich [Mro93]. Konstruktiv unterscheiden sich Steckverbinderkontakte für die Leistungsübertragung von denen für die Signalübertragung durch größere Querschnitte, leitfähigere Basismaterialien, andere Oberflächenbeschichtungen, höhere Kontaktnormalkräfte und eine höhere Anzahl an Kontaktstellen.

In dieser Arbeit werden Steckverbinderkontakte für die Leistungsübertragung untersucht. Bei der Leistungsübertragung spielt die Joule'sche Verlustleistung eine große Rolle und die Stromtragfähigkeit ist eine sehr wichtige Eigenschaft. Sie gibt den maximal zulässigen Dauerstrom an, der unter Berücksichtigung der Umgebungstemperatur von dem Steckverbinder maximal geführt werden darf. Die Grenztemperatur wird durch die Temperaturgrenzen von Basismaterial, Oberfläche, Kunststoff, etc. bestimmt [Böh05 S.116, Son07]. Die Grenztemperaturen dürfen weder zu einer Schädigung des Materials, noch zu einer Beeinträchtigung der Funktion führen. Aus physikalischer Sicht sind sie z.B. durch Erweichungserscheinungen und durch das Einsetzen von Alterungsmechanismen wie z.B. Spannungsrelaxation und chemischen Reaktionen begründet, die bei erhöhter Temperatur schneller ablaufen [Blu09 S.13]. Die Grenztemperatur wird in den meisten Fällen von den Herstellern oder durch Normen festgelegt. Die maximal zulässige Erwärmung kann für ähnliche Anwendungen bei 30 K [UL 01, DIN03b], 50 K [IEC96, DIN12] oder bis zu 65 K [DIN09b] liegen. Des Weiteren werden auch maximal zulässige Temperaturen wie z.B. 100 °C [DIN09a] oder 105 °C [DIN09b] angegeben. Diese sind im Rahmen der konstruktiven Auslegung von Steckverbinderkontakten zu berücksichtigen.

## 2.2 Konstruktionsprozess bei Steckverbinderkontakten

Die konstruktive Auslegung von elektromechanischen und thermischen Bauelementen wird von Krause [KrBü04, Kra04, Kra12] und Lienig [Lie12] behandelt. In [Jäg81a] und [Jäg81b] werden wichtige Aspekte für die methodische Konstruktion von Schaltgeräten genannt. Diese können teilweise auch auf Steckverbinder übertragen werden. Für Schaltgeräte wird empfohlen, grundsätzlich die allgemeine Konstruktionsmethodik des Maschinenbaus anzuwenden [Jäg81a]. Beispiele zur thermischen Auslegung von Leiterbahnen [Ada02a, Ada02b, Ada07, Obe08], Stromschienen [Tat10, Böh05, Cha14] und Schaltgeräten bzw. Schaltanlagen [KuWa87, SDA01, PWS02b, PWS02a, Bar03, FrWe04, SSL04, Böh05, SiAn14] sind aus der Literatur bekannt. Allerdings werden dort vor allem Berechnungen durchgeführt. Leitfäden zur Konstruktion von Steckverbindern sind z.B. in [N.N96, Mro98, Lan00] zu finden. Zusammenhänge zwischen Anforderungen und Werkstoffeigenschaften werden darin aufgezeigt. Der Fokus dieser, meist von Herstellern für Kupferwerkstoffe herausgegebenen Leitfäden, liegt allerdings auf den Werkstoffeigenschaften und weniger auf dem Funktionsprinzip und den Eigenschaften von Steckverbinderkontakten. In [MoSo98] werden Maßnahmen aufgeführt, die zur Verbesserung von verschiedenen Eigenschaften von Steckverbinderkontakten führen. Diese sind allerdings nur qualitativ beschrieben. Im Rahmen dieser Arbeit werden das Vorgehen und die Begrifflichkeiten nach Krause [Kra00] und Pahl/Beitz [PBF07] verwendet. Laut Krause [Kra00] wird die systematische Konstruktion in verschiedene Phasen unterteilt:

- Aufbereitungsphase
- Prinzipphase
- Gestaltungsphase
- Dokumentationsphase

In der Aufbereitungsphase wird zunächst die Aufgabenstellung geklärt und präzisiert [PBF07 S.195]. Um Konzeptalternativen zu erzeugen, müssen in der anschließenden Prinzipphase sowohl Lösungsprinzipien als auch die Systemstruktur festgelegt werden. Steckverbindungen bestehen aus verschiedenen Bauelementen. Neue Konzepte können daher auch durch Kombination von

bekanntem Teillösungen entwickelt werden. Aufgrund der Vielzahl verschiedener Lösungsalternativen kann neben der Erfahrung des Entwicklers z.B. ein wissensbasiertes System verwendet werden. Basierend auf bekannten Lösungen ist damit eine automatische Erstellung von möglichen Konzeptalternativen durchführbar [FoYa02, FoTa13]. Eine Dimensionierung muss aber dennoch im Nachgang durchgeführt werden.

Oftmals handelt es sich bei Steckverbinderkontakten um Anpassungskonstruktionen oder Variantenkonstruktionen [PBF07 S.4], bei denen die Lösungsprinzipien und die Systemstruktur festgelegt sind. Vor allem wird die Gestaltungsphase durchlaufen, in der das Produkt dimensioniert wird. Ausgehend von qualitativen Vorstellungen wird zu diesem Zweck die Lösung quantitativ-gestalterisch festgelegt [PBF07 S.196]. Bei Steckverbinderkontakten werden z.B. folgende Eigenschaften festgelegt (Abbildung 1-4) [Kra04 S.33]:

Geometrische Eigenschaften (z.B. Form, Abmessungen)

Stoffliche Eigenschaften (z.B. Werkstoffe mit physikalischen und chemischen Eigenschaften)

Zustandseigenschaften (z.B. Kontaktkräfte, Widerstände, Stromerwärmung)

Die Gestaltungsphase kann zweckmäßig abhängig von der Detaillierungsebene in die Phase der Grobgestaltung und der Feingestaltung unterteilt werden [HöVo02, PBF07 S.307, Sch13 S.3]. Zunächst findet die Grobgestaltung der Hauptfunktionsträger statt [PBF07 S.306]. Folgende Ziele werden dabei verfolgt:

Wichtige Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen Einflussparametern und funktionellen Eigenschaften erkennen

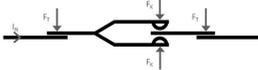
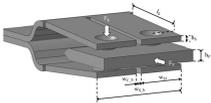
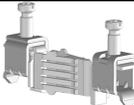
Stofflich-geometrische Einflussparameter dimensionieren

Globales Optimum für geometrische und stoffliche Größen finden

Eine starke Beeinflussung der Kosten und der Qualität findet in der frühen Phase der Produktentwicklung statt [EKL07 S.2, Dij07b]. Daher sind die Entscheidungen in dieser Phase sehr wichtig. Aus diesem Grund sollte die Berechnung schon in der frühen Phase der Produktentwicklung einbezogen werden [KHD06 S.2]. Allerdings ist zu diesem Zeitpunkt eine detaillierte Be-

rechnung oftmals nicht zielführend, da noch nicht alle Parameter konkretisiert sind und in der Regel die Details noch nicht berücksichtigt werden müssen [PBF07 S.308]. Zunächst werden einfache, qualitative Aussagen bzw. Vergleiche zwischen konkurrierenden Konzepten und Varianten benötigt. Dabei geht der Trend dahin, durch Simultaneous Engineering an einem für alle beteiligten Entwicklungsbereichen zugänglichen konsistenten Datenmodell zu arbeiten [Böh04 S.3]. In der Phase der Grobgestaltung ist es allerdings sinnvoll, einfache Modelle mit reduziertem Informationsgehalt, d.h. mit einem erhöhten Abstraktionsgrad zu verwenden, da sowohl stoffliche, als auch geometrische Details noch nicht genau definiert werden können [KHD06 S.5, HST16]. Durch abstrakte Modelle kann versucht werden, möglichst weit vereinfachte Rechenverfahren zu verwenden und nur die relevanten Mechanismen zu berücksichtigen [BaLi99]. Dazu bieten sich für Steckverbinderkontakte die Methoden der analytischen Berechnung, die Wärmenetzmethode oder die FE-Analyse mit vereinfachten Modellen an. In Tabelle 2-1 werden anhand der Literaturrecherche den verschiedenen Konstruktionsphasen unterschiedliche Auslegungsmethoden zugeordnet.

Tabelle 2-1: Den Konstruktionsphasen zugeordnete Auslegungsmethoden

Konstruktionsphase	Auslegungsmethode	Beispiel
<b>Prinzipphase</b>	Prinzipskizze	
<b>Grobgestaltung</b> Werkstoffauswahl Dimensionierung Groboptimierung	Analytische Berechnung Wärmenetzmethode FE-Analyse	
<b>Feingestaltung</b> Ausgestaltung Feinoptimierung	FE-Analyse	

In der Phase der Feingestaltung von Haupt- und Nebenfunktionsträgern werden Details berücksichtigt und alle notwendigen Einzelheiten endgültig festgelegt [PBF07 S.309]. Das System wird lokal optimiert, was typischerweise nur noch mit einer FE-Analyse möglich ist.

### 2.3 Modellbildung, Simulation und Optimierung am Beispiel von Steckverbinderkontakten

Um ein Verständnis von Prozessen und Systemen zu entwickeln, sowie für die Vorhersage und Optimierung des Verhaltens, gibt es verschiedene Möglichkeiten des Erkenntniserwerbes. Der Anwender kann auf Experimente, analytische Untersuchungen oder Modellbildung und Simulationen zurückgreifen [Bun13 S.V, Vin16 S.970].

Experimente an realen Steckverbindern sind für die Untersuchung der Eigenschaften, als normative Produktprüfungen und für die Verifikation von Berechnungsergebnissen unumgänglich. Allerdings können sie erst in einer späten Phase der Produktentwicklung durchgeführt werden, wenn Funktionsmuster verfügbar sind. Zudem ist die experimentelle Untersuchung zeit- und kostenintensiv. Da ein Gesamtergebnis gemessen wird, lassen sich die physikalischen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Einflussparametern nur schwierig separieren. Zudem lassen sich nicht alle relevanten Größen messtechnisch erfassen [Kah04 S.15].

Ein wichtiges Werkzeug um die Qualität der Produkte zu erhöhen und gleichzeitig die Entwicklungszeiten und -kosten zu verringern, ist die Modellbildung und Simulation im Rahmen der Produktentwicklung [Geb11 S.9, Vin16 S.970]. Als „Simulation“ wird in dieser Arbeit das Lösen von Gleichungen mit einem numerischen Verfahren (im Rahmen der FE-Analyse) bezeichnet<sup>1</sup>. Als „Berechnung“ wird das Lösen von analytischen Gleichungen z.B. mit Hilfe eines Tabellenkalkulationsprogramms bezeichnet. Als Modell wird ein vereinfachendes Abbild einer partiellen Realität verstanden [Bun13 S.5]. Dabei kann ein Modell entweder aus einer einzelnen Gleichung oder aus einem komplexen Gleichungssystem bestehen. In der Natur- und Ingenieurwissenschaft handelt es sich dabei meist um mathematisch-physikalische Modelle, welche die Grundlage der sich anschließenden Simulation bzw. Berechnung und Optimie-

---

<sup>1</sup> Der Begriff der Simulation ist nicht eindeutig belegt. Im weiteren Sinne wird unter „Simulation“ der Gesamtkomplex der Vorausberechnungen oder das Nachstellen eines bestimmten Szenarios verstanden, also das „virtuelle Experiment“ [Bun13].

zung bilden können [Böh05 S.48, Bun13 S.4, Vin16 S.970]. Mit ihnen können die Zusammenhänge zwischen Einflussparameter und Eigenschaften quantifiziert werden.

Die wichtigsten Schritte und Elemente von Simulationsmethoden sind in [Vin16 S.971] dargestellt. Zunächst geht es bei der theoretischen Systemanalyse um die Aufstellung der einzelnen Systemelemente und deren Wechselwirkungen. Zudem müssen die Systemstruktur und die Systemgrenzen festgelegt werden (Abbildung 1-3) [Vin16 S.971]. Anschließend müssen für die einzelnen Systemelemente berechenbare mathematisch-physikalische Modelle in Form von Gleichungen oder Gleichungssystemen aufgestellt werden.

Zur Berechnung muss die Gestalt des zu untersuchenden Objekts so weit abstrahiert werden, bis sie einem berechenbaren Modell entspricht [VDI14 S.20]. Für eine effektive Ressourcennutzung ist stets zu prüfen, welche Modellierungstiefe bzw. welcher Abstraktionsgrad angemessen ist im Hinblick auf die erwünschte Güte des Resultats und den erforderlichen Aufwand [BAK95, ASF11, Bun13 S.12]. Dabei kann der Abstraktionsgrad des Modells auf verschiedenen Ebenen stattfinden:

- Geometrische Detaillierung, z. B. Vernachlässigung von Verrundungen
- Räumliche Auflösung, z.B. Betrachtung des Kontaktpunktes anstatt des gesamten Steckverbinders
- Zeitliche Auflösung, z.B. Vernachlässigung der Alterung
- Physikalische Phänomene, z.B. Vernachlässigung des Skin-Effektes
- Beschreibung der Werkstoffeigenschaften, z.B. elastisches statt elastisch-plastisches Materialverhalten

In [ASF11] wird zwischen Modellen geringer, mittlerer und hoher Komplexität unterschieden, die in verschiedenen Phasen der Produktentwicklung verwendet werden können. Zu einfache Modelle können zu falschen Ergebnissen führen, andererseits sind zu detailliert beschriebene Modelle nicht immer zielführend und wirtschaftlich vertretbar [ASF11]. Der notwendige Abstraktionsgrad des zu untersuchenden Problems unterscheidet sich in den verschiedenen Phasen.

Obwohl die physikalischen Rahmenparameter sehr komplex sind, können viele wertvolle Erkenntnisse durch relativ einfache numerische Simulationen erlangt werden [ASF11]. Der Abstraktionsgrad verschiedener Methoden ist in Abbildung 2-3 dargestellt.

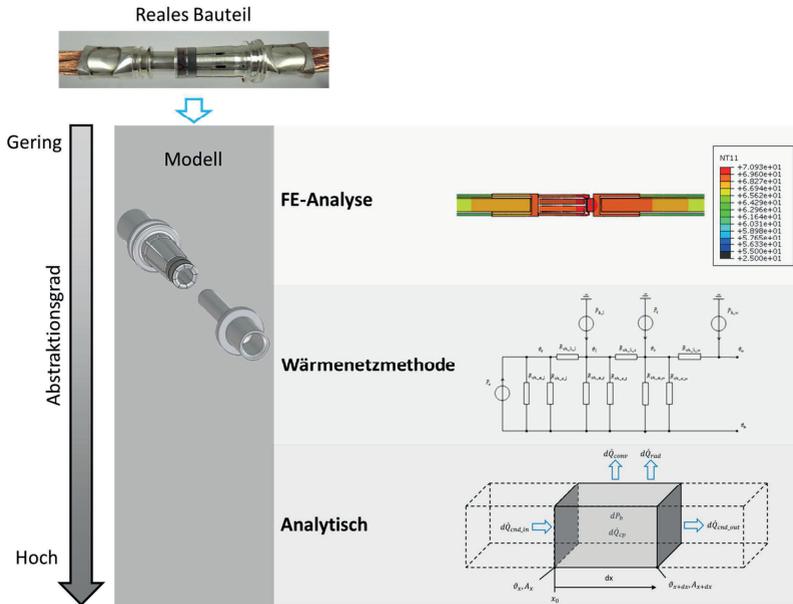


Abbildung 2-3: Abstraktionsgrad und Modelltiefe bei der Simulation von Steckverbinderkontakten

Abhängig von dem Modell gibt es verschiedene Lösungsansätze. Einfache analytische Gleichungen können in geschlossener Form explizit berechnet werden. Differenzialgleichungen in impliziter Form lassen sich hingegen meistens nur noch mit Hilfe von numerischen Lösungsansätzen annähern. Da verschiedene physikalische Phänomene mathematisch ähnlich gelöst werden können, besteht des Weiteren die Möglichkeit durch Analogiebetrachtungen physikalische Prozesse aus einem Gebiet, z.B. der Thermodynamik, mit Berechnungsmethoden aus einem anderen Gebiet, z.B. der Elektrotechnik, zu berechnen. Ein Beispiel dafür ist die Wärmenetzmethode [PBL81, Løb85, Gra05, Mag07 S.9, Lic12 S.5].

### 2.3.1 Analytische Verfahren

Einfache Modellgleichungen lassen sich durch eine analytische Berechnung exakt lösen [Kah04 S.15]. Viele technische und physikalische Prozesse werden mathematisch durch Systeme von gewöhnlichen und partiellen Differenzialgleichungen beschrieben [JuLa01 S.13, PoKo09 S.544]. Für Spezialfälle wie z.B. einem einseitig eingespannten Biegebalken mit konstantem Querschnitt oder der Erwärmung eines Zylinders wurden analytische Lösungen der partiellen Differenzialgleichungen formuliert. Damit lassen sich z.B. die Kontaktkraft von Steckverbinderkontakten [Hor87, GKM00] oder die Erwärmung von Leitungen [BrSc37, PBL81 S.777, Ilg04, Böh05 S.51] in geschlossener Form berechnen. Weitere Beispiele sind die Berechnung der Kontaktfläche nach Hertz [Her81] oder die Berechnung des Engwiderstandes nach Holm [Hol67]. Neben den analytisch hergeleiteten Gleichungen gibt es empirisch ermittelte Gleichungen, die aufgrund von Experimenten formuliert wurden. Ein Beispiel dafür ist die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten über dimensionslose Kennzahlen [Ver06] oder die empirische Ermittlung des Kontaktwiderstandes in Abhängigkeit von der Kontaktnormalkraft [BEB10]. Diese sind explizit formuliert und lassen sich berechnen. Allerdings ist bei den empirisch ermittelten Gleichungen neben den betrachteten Vereinfachungen und Randbedingungen besonders darauf zu achten, dass sie zunächst nur in den untersuchten Systemgrenzen gelten.

Eigenschaften von Steckverbinderkontakten wie z.B. die Steckkraft können analytisch berechnet und durch geeignete Steckergeometrien optimiert werden [Kru66, Hor85, Liu90, Yun98]. Auch zur Berechnung der Erwärmung von Leitungen und Stromschienen gibt es analytische Ansätze [BrSc37, PBL81 S.777, Ilg04, Böh05 S.51].

Die Bedeutung der vereinfachten analytischen Modelle ist trotz ihrer teils starken Vereinfachung sehr hoch [Böh05 S.51]. Diese Modelle helfen technische Fragestellungen zu systematisieren und allgemein gültige Erkenntnisse zu nutzen [Böh05 S.51]. Für einfache Problemstellungen sind sie recht nah an der Realität, wodurch sich Dimensionierungen und konstruktive Maßnahmen ableiten lassen [Hol67 S.10, Bre08, BBS14c]. Zudem lassen sich die Wirkmechanismen besser verstehen [Ehr04 S.3].

Beruhend auf Erfahrung und aus der Literaturrecherche sind in Tabelle 2-2 aus meiner Sicht die Vor- und Nachteile bei der analytischen Modellbildung von Steckverbinderkontakten in der Phase der Grobgestaltung aufgeführt.

Tabelle 2-2: Vor- und Nachteile der analytischen Modellbildung (für Steckverbinderkontakte)

Vorteile	Nachteile
Kurze Berechnungszeiten	Erhöhter Aufwand bei der Erstellung des analytischen Modells
Parameter lassen sich in einem weiten Bereich variieren, wenn das Modell mit allgemeingültigen Beziehungen aufgestellt wird	Aufgrund der starken Vereinfachungen ist stets zu prüfen, ob die Randbedingungen und Vereinfachungen noch akzeptabel sind
Einflussparameter und deren Abhängigkeiten sind ablesbar	Bei der Erstellung des Modells sind physikalische und mathematische Kenntnisse des Systems notwendig
Verifizierte Gleichungen können mathematisch umgeformt werden, wodurch das Modell als Grundlage für die Dimensionierung und Optimierung dienen kann	Nur für sehr abstrakte Modelle geeignet
Kein FE-Programm und keine FE-Kenntnisse erforderlich	
Gemessene Parameter lassen sich sehr einfach zur Berechnung nutzen (z.B. gemessene Kontaktfläche oder gemessener Kontaktwiderstand)	

Für erste überschlägige Berechnungen von Steckverbinderkontakten sind analytische Modelle damit durchaus zielführend und anwendbar. Aufgrund der überschaubaren Systemstruktur und Bauteilgeometrie von Steckverbinderkontakten sind Vereinfachungen zulässig. Bei der Modellbildung besteht die Anforderung darin, die verschiedenen Teilbereiche und physikalischen Phänomene in geeigneter Form miteinander zu kombinieren [BBS13, BBS14c].

### 2.3.2 Numerische Verfahren

Viele Differenzialgleichungen können nicht analytisch berechnet werden. Mit Hilfe der Computertechnik gibt es aber die Möglichkeit Differenzialgleichungen durch numerische Methoden wie z.B. der Finite-Elemente-Methode (FEM), Finite-Differenz-Methode (FDM) oder der Finite-Volumen-Methode

(FVM) näherungsweise zu approximieren [JuLa01 S.13, PoKo09 S.507]. Dadurch lassen sich selbst sehr komplexe Gleichungssysteme lösen.

Die Finite-Elemente-Methode ist aufgrund der Diskretisierung von linearen und nichtlinearen Problemen in beliebigen beschränkten Gebieten die meist verwendete Diskretisierungsmethode [JuLa01 S.13]. Sie ist in der Lage verschiedene physikalische Phänomene zu berücksichtigen [Geb11 S.84, Vin16 S.973], da gekoppelte Feldprobleme gelöst werden können.

Heutzutage stehen den Anwendern sehr leistungsstarke Finite-Elemente-Programme zur Verfügung [Nas10 S.1, Vin16 S.973]. Viele multiphysikalische Simulationen werden mit numerischen Simulationsprogrammen durchgeführt, weil diese Art der Vorausberechnung einfacher zu handhaben ist und sie auch bei komplexen Bauelementen angewendet werden kann. Die Gleichungen müssen bei dieser Methode im Gegensatz zu der analytischen Berechnung nicht mehr von dem Anwender aufgestellt und gelöst werden. Diese Arbeit wird von dem Rechenprogramm erledigt. Für die Modellbildung und Simulation sind neben dem Umgang mit dem Programm auch Kenntnisse des physikalischen Problems notwendig, um das Modell mit geeigneten Randbedingungen und Parametern zu definieren und die Ergebnisse interpretieren zu können.

Laut [Kat12 S.285] sind mechanische-, elektrische- und thermische Eigenschaften heute gut durchdrungen und können zuverlässig simuliert werden [Kat12 S.285]. Bei der konstruktiven Auslegung von Kontaktfedern lassen sich z.B. mit der heutigen Rechentechnik FE-Analysen geometrisch nichtlinearer Probleme unter Berücksichtigung elastisch-plastischer Werkstoffeigenschaften leicht lösen [Bre08]. Dies gilt allerdings nur soweit wie auch geeignete Werkstoffkennwerte zur Verfügung stehen.

Für die Simulation der Eigenschaften von Steckverbinderkontakten müssen meistens verschiedene physikalische Phänomene miteinander gekoppelt werden. Beispiele für die Berechnung des thermisch-elektrischen Verhaltens sind in [LLW96, WaXu07, McG08, DoCo09, PAJ10, AJC12, CER12, Hau13, Geb13] zu finden. Bei der Simulation ist stets eine gute Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Werten bestätigt worden. Ein beispielhaftes Vorgehen bei der Simulation ist in [Hau13] dargestellt.

Beruhend auf Erfahrung und aus der Literaturrecherche sind in Tabelle 2-3 aus meiner Sicht die Vor- und Nachteile bei der numerischen Modellbildung von Steckverbinderkontakten in der Phase der Grobgestaltung aufgeführt.

Tabelle 2-3: Vor- und Nachteile der numerischen Simulation (für Steckverbinderkontakte)

Vorteile	Nachteile
Überschaubarer Aufwand bei der Erstellung des Modells	Lange Berechnungszeiten
Viele Vereinfachungen und Einschränkungen, die der analytischen Lösbarkeit halber getroffen wurden, sind überflüssig [PoKo09 S.504]	Die numerische Lösung gilt nur für bestimmte Parameterkombinationen [Böh05 S.52]
	Einflussparameter und deren Abhängigkeiten nicht mehr erkennbar [Böh05 S.52]
	Entwickler muss sowohl im Umgang mit dem Simulationsprogramm, als auch mit den zu berechnenden physikalischen Zusammenhängen vertraut sein
	Bei der Bewertung der Ergebnisse ist besonders bei der FE-Analyse eine kritische Herangehensweise angezeigt [MSW07 S.24, Ta]ö07]
	Optimierung und Dimensionierung nur durch Parametervariation
	Konvergenzprobleme bei sehr unterschiedlichen Skalen (z.B. feine Vernetzung im Kontaktpunkt im Gegensatz zu den Abmessungen des Bahnbereiches)
	Gemessene Parameter lassen sich nicht immer direkt zur Berechnung nutzen (z.B. gemessene Kontaktfläche oder gemessener Kontaktwiderstand)

Obwohl Steckverbinderkontakte geometrisch relativ einfache Bauelemente sind, gibt es keine durchgängige Simulation mit der FE-Analyse, bei der alle Parameter an einem Steckverbinderkontakt gleichzeitig modelliert und berechnet werden. Stattdessen werden teils starke Vereinfachungen angenommen, um geeignete Modelle für eine Simulation zu bekommen. Es gibt Parameter, die noch nicht oder nur sehr aufwendig mit der FE-Analyse berechnet werden können. Um diese zu berücksichtigen, werden zunächst Experimente zur

Extraktion der Parameter durchgeführt oder FE-Analysen mit analytischen Berechnungen kombiniert. Beispiele dafür sind:

- Konvektiver Wärmeübergang [CER12, Hau13]
- Elektrischer Kontaktwiderstand [CER12]
- Thermischer Kontaktwiderstand [CER12]
- Reibungszahl [CHC10, AGS13]
- Reale Oberflächentopologie [Lei09]
- Wärmeabfuhr in den Leiter [Bar03, Geb13]

In dieser Arbeit wird die Finite-Elemente-Methode dazu verwendet, einzelne Bereiche des Steckverbinderkontaktes im Detail zu untersuchen und analytische Modelle zu verifizieren. Im Vergleich zu der analytischen Berechnung ist die numerische Simulation nicht nur auf Standard-Geometrien und vereinfachte Werkstoffeigenschaften beschränkt. Allerdings ist z.B. die Berücksichtigung der Rauheit bei der numerischen Simulation mit konventionellen FEM Berechnungsprogrammen aufgrund der Komplexität und der Anzahl an benötigten Gitterpunkten sehr schwierig [Vin16 S.978]. Zudem unterscheiden sich die mikroskopische Größenordnung der Rauheit und die makroskopische Größe der Bauelemente sehr stark. Dies führt zu Problemen in der Vernetzung und im Konvergenzverhalten.

### **2.3.3 Optimierung von Bauelementen**

Nachdem die mathematischen Berechnungsmodelle verifiziert sind, können diese als Grundlage für eine Dimensionierung und Optimierung dienen. Die Dimensionierung bzw. Optimierung ist das Finden einer Kombination von Parametern für eine gegebene Aufgabenstellung [Lie06 S.3]. Der Unterschied von Dimensionierung und Optimierung liegt nur im Abbruchkriterium der Berechnung. Beim Dimensionieren reicht das Finden einer zulässigen Lösung von Parametern aus [Lie06 S.3]. Bei der Optimierung soll die beste Lösung (beste Parameterkombination) ermittelt werden [Lie06 S.3]. Für eine Optimierung von Bauelementen sind die Kenntnisse der Freiräume und Randbedin-

gungen unerlässlich [KHD06 S.7]. Im Rahmen der Optimierung werden im einfachsten Fall Extremwertprobleme gelöst, die eindeutige Lösungen besitzen (Abbildung 2-4). Der Konstruktionsprozess für Baueinheiten ist allerdings wesentlich komplizierter als eine einfache Optimierung, da viele Zielgrößen und Einflussparameter in den verschiedenen Stufen des Konstruktionsprozesses beachtet werden müssen [Böh05 S.50]. Meistens liegen nicht genügend Informationen vor, um das System zu optimieren, wodurch es nie eindeutig modellierbar und optimierbar sein wird [Böh05 S.50]. Komplexe Systeme können allerdings durch eine systematische Parametervariation optimiert werden. Für die Parametervariation können die Probleme durch verschiedene Modelle beschrieben werden, welche in Abbildung 2-4 dargestellt sind.

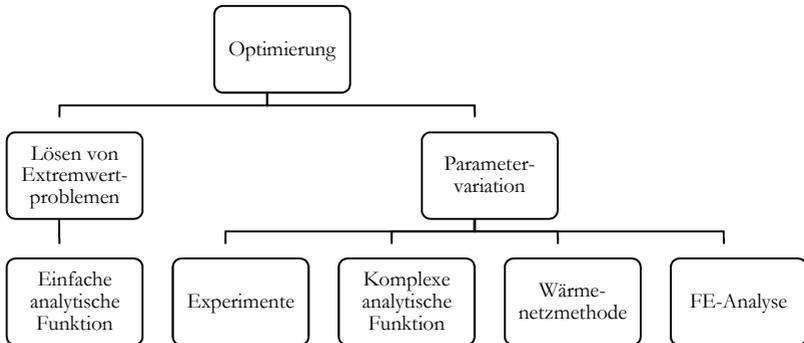


Abbildung 2-4: Möglichkeiten der Optimierung

Das Potenzial, durch Geometrievarianten die Produkte systematisch zu optimieren, wird in vielen Bereichen noch nicht ausreichend genutzt [KHD06 S.7]. Die Parametervariation mit Hilfe von FE-Analysen kann entweder von dem Anwender durch eine gezielte Eingabe verschiedener Parameter erfolgen oder mit speziellen Optimierungsprogrammen unterstützt werden. Mit Optimierungsprogrammen ist es möglich z.B. Kontaktfedern von Steckverbinderkontakten [RoHo08, Geb12] und Kontaktlamellen [Geb13, Geb14] zu optimieren. Dafür ist ein vollparametrisiertes Simulationsmodell erforderlich. Das Programm nimmt eine systematische Untersuchung des vorgegebenen Parameter-raums vor. Die daran anschließende Sensitivitätsanalyse liefert die Zusammen-

hänge der verschiedenen Einflussparameter, sodass der Entwicklungsingenieur einen Überblick über wichtige und unwichtige Größen erhält und funktionale Zusammenhänge besser versteht und bewerten kann [Geb13]. Zudem kann neben der Optimierung eine Robustheitsanalyse durchgeführt werden. Die Berechnung zur Optimierung der Bauteilgeometrie ist allerdings sehr aufwendig. In [RoHo08] wird ein Steckverbinderkontakt optimiert, bei dem 950 Berechnungen notwendig sind. Für die Berechnung wird eine Berechnungszeit von einer Woche angegeben. Zudem ergeben sich auch hier bei der Optimierung mehrere optimale Lösungen, bei denen letztendlich der Entwickler die beste Lösung auswählen muss [Geb13].

Zweckmäßig wird in dieser Arbeit zwischen Grob- und Feinoptimierung unterschieden. Bei einer Groboptimierung wird ein globales Optimum bezogen auf die Hauptfunktionsträger gesucht. Dabei werden stofflich-geometrische Parameter der Steckverbinderkontakte wie z.B. Anzahl an Kontaktfedern, Querschnitte oder Basismaterial, berücksichtigt. Durch die parametrisierten Modelle lassen sich Lösungen sehr viel schneller erzeugen, als mit konventionellen Optimierungsprogrammen.

Nachdem die wesentlichen Parameter festgelegt sind, schließt sich in der folgenden Konstruktionsphase die Feinoptimierung an (Tabelle 2-1). Darin werden Teilbereiche wie z.B. die Dicke der Oberflächenbeschichtung, der Leiteranschluss oder die Einführgeometrie der Kontaktbuchse und des Kontaktstiftes lokal optimiert. Im Rahmen dieser Arbeit wird speziell die Groboptimierung betrachtet.

## 2.4 Grundlagen zur Ermittlung kontaktphysikalischer Eigenschaften

Für eine multiphysikalische Modellierung und Berechnung der Erwärmung von Steckverbinderkontakten müssen mechanische, elektrische, thermische und kontaktphysikalische Phänomene miteinander gekoppelt werden. In Abbildung 2-5 sind die Teilmodelle dargestellt, mit denen die Verlustleistung an der Kontaktstelle berechnet werden kann.

Ausgehend von der Auslenkung  $\Delta x_S$  eines einseitig eingespannten Biegebalkens wird zunächst die Kontaktkraft  $F_K$  berechnet. Dazu sind verschiedene geometrisch-stoffliche Parameter notwendig. Die Kontaktkraft wirkt auf die Kontaktstelle und führt zu einem elektrischen Kontakt zwischen zwei Bauelementen. Im Vergleich zu dem Bahnbereich kommt es in der Kontaktfläche mit dem Radius  $a$  zu einem verringerten Querschnitt. Dadurch tritt in der Umgebung der Kontaktstelle ein erhöhter Widerstand (Engwiderstand  $R_C$ ) auf, der bei Stromfluss zu einer erhöhten Verlustleistung  $\dot{Q}_C$  führt.

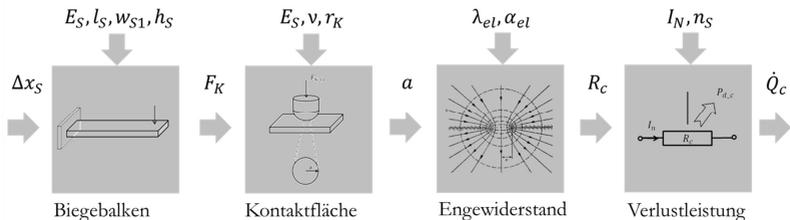


Abbildung 2-5: Modelle zur Berechnung des Wärmestroms

Für die konstruktive Auslegung von Steckverbinderkontakten ist die Unterscheidung der Teilwiderstände sehr wichtig und deshalb in Abbildung 2-6 dargestellt. Eine wichtige Kenngröße von Steckverbinderkontakten für die Leistungsübertragung ist der sogenannte (Gesamt-) Durchgangswiderstand [Vin16 S.566], der hier als  $R_{tr}$  (transition resistance) bezeichnet wird. Er stellt den Gesamtwiderstand von Leiteranschluss zu Leiteranschluss dar (Gleichung (2.1)) und beinhaltet die Leiteranschlusswiderstände auf der Buchsenseite  $R_{T,S}$  und auf der Stiftseite  $R_{T,P}$  sowie die Bahnwiderstände der Kontaktbuchse

$R_{b,S}$  und des Kontaktstiftes  $R_{b,P}$  als auch die Parallelschaltung der Kontaktfedern mit den dazugehörigen Bahnwiderständen  $R_{b,Sx}$  und den Kontaktwiderständen  $R_{K,Sx}$  der jeweiligen Kontaktfedern.

$$R_{tr} = R_{T,S} + R_{b,S} + \frac{1}{\frac{1}{R_{b,S1} + R_{K,S1}} + \frac{1}{R_{b,S2} + R_{K,S2}}} + R_{b,P} + R_{T,P} \quad (2.1)$$

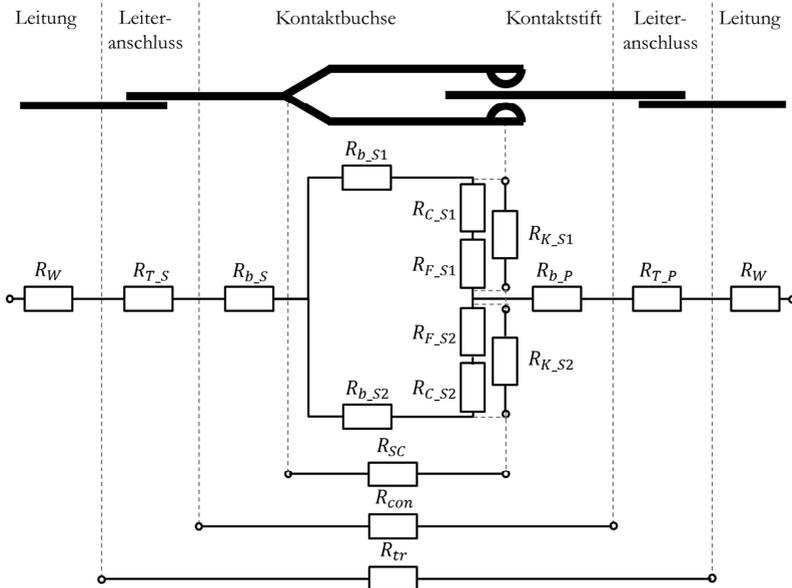


Abbildung 2-6: Teilwiderstände eines Steckverbinderkontaktes

Der Widerstand des Steckverbinderkontaktes, bei dem die Leiteranschlusswiderstände nicht betrachtet werden, wird als  $R_{con}$  bezeichnet. Der Widerstand  $R_{SC}$  berücksichtigt die Parallelschaltung der Kontaktfedern mit den dazugehörigen Bahnwiderständen und den Kontaktwiderständen.

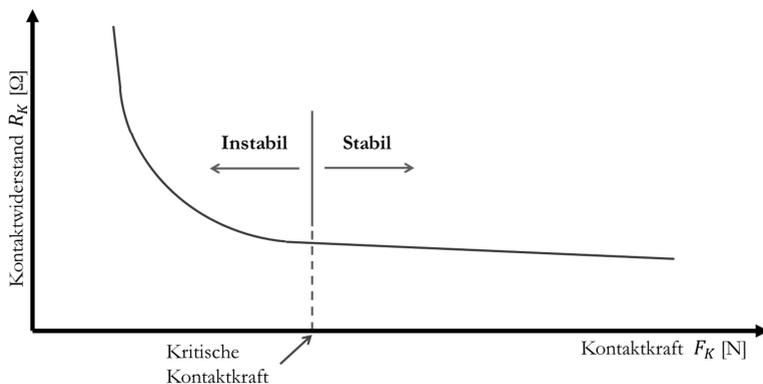
In der Praxis lassen sich die Teilwiderstände eines Steckverbinderkontaktes teilweise nicht klar trennen. So besteht z.B. der Leiteranschlusswiderstand  $R_T$  sowohl aus einem Kontaktwiderstand, als auch aus einem Teilstück des Leiterwiderstandes  $R_W$  und des Bahnwiderstandes des Steckverbinderkontaktes  $R_b$ . Ein Teil des Bahnwiderstandes der Kontaktfedern  $R_{b_{Sx}}$  und des Kontaktstiftes  $R_{b_p}$ , der Engewiderstand  $R_{C_{Sx}}$  und der Fremdschichtwiderstand  $R_{F_{Sx}}$  zwischen Kontaktbuchse und Kontaktstift lassen sich messtechnisch ebenfalls nicht getrennt erfassen. Daher werden sie zu dem sogenannten Kontaktwiderstand  $R_{K_{Sx}}$  zusammengefasst, der von der Höhe der aufgebrachten Kontaktkraft abhängig ist.

### 2.4.1 Kontaktkraft

Die Kontaktkraft (auch Kontaktnormalkraft genannt) ist ein wichtiger Konstruktionsparameter bei der Auslegung von Steckverbinderkontakten. Sie hat einen großen Einfluss auf die Höhe und das Langzeitverhalten des Kontaktwiderstandes. Zudem beeinflusst sie unter anderem die Steckkraft und das Verschleißverhalten [Hor87, Mro11a].

#### 2.4.1.1 Festlegung der Kontaktkraft

Die Festlegung einer geeigneten Kontaktkraft bei der konstruktiven Auslegung von elektrischen Kontakten ist eine große Herausforderung. Die Kontaktkraft ist nicht eindeutig festzulegen, da sie verschiedene Eigenschaften mit teils gegenläufigen Anforderungen beeinflusst. Der schematische Verlauf der Kontaktkraft und die Einflussparameter, welche die minimale und maximale Kontaktkraft begrenzen, sind in Abbildung 2-7 dargestellt.



Begrenzung minimale Kontaktkraft		Begrenzung maximale Kontaktkraft
Stoß- und Vibrationsbelastungen Kontaktwiderstand Fretting Materialabtrag	Einsatzbedingungen	Verschleiß Steck- und Ziehkräfte
Toleranzen Systemsteifigkeit	Gestalt	Bauraum Federgeometrie (Form, Dicke, Breite, Länge) Federweg
Relaxationsverhalten Oxidationsverhalten	Werkstoff	Festigkeit Elastizitätsmodul

Abbildung 2-7: Schematische Darstellung zur Auslegung der Kontaktkraft und begrenzende Faktoren auf die minimale und maximale Kontaktkraft vgl. [Mro98 S.7, Dij98, Lan00 S.10, Lei09 S.9, MJG13 S.103]

Bei der Festlegung der Kontaktkraft darf über die gesamte Nutzungsdauer eine minimale (kritische) Kontaktkraft nicht unterschritten werden [ViKe02]. Sie sollte so ausgelegt werden, dass eine Änderung der Kontaktkraft infolge Alterung nur eine geringe Änderung des Kontaktwiderstandes zur Folge hat. Für unterschiedliche elektrische Kontakte und Oberflächen werden in der Literatur verschiedene minimale Kontaktkräfte angegeben. Oftmals werden anstatt genauer Werte nur qualitative Aussagen wie „hoch“ oder „niedrig“ angegeben. In Tabelle 2-4 sind aus der Literaturrecherche die empfohlenen Kontaktkräfte für verschiedene Oberflächenwerkstoffe und Anwendungen dargestellt.

Tabelle 2-4: Kontaktkräfte für verschiedene Oberflächenbeschichtungen und Anwendungen

Werkstoff	Empfohlene Kontaktkraft bei Steckverbindern für die Signalübertragung	Empfohlene Kontaktkraft bei Steckverbindern für die Leistungsübertragung	Empfohlene Kontaktkraft für Schaltgeräte
Gold	Min. >0,03 N. Empfohlen: > 0,3 N [Vin09 S.273] > 0,1 – 0,2 N [AMP04a S.5] 0,3 – 0,5 N für guten elektrischen Kontakt. Empfohlen: > 1 N [Dij02, Dij07b] > 1 N [ScTh11]		Relais: >0,03 bis 0,2 N [Ele16] Relais: >0,01 bis 0,2 N [ViKe02 S.524]
Silber	Min. >0,1 N. Empfohlen: >0,5 N [Vin09 S.273] > 0,2 N [Mye09] 0,3 – 0,5 N. Empfohlen: >1 N [Dij02, Dij07b] 1 – 10 N [SSH10] > 2 N [ScTh11]	> 10 N [SSH10] 10-100 N [Mye09]	Schütze: 0,05 – 0,08 N/A [Ele16] 0,06 – 0,15 N/A [ESE74 S.244] Leistungsschalter: 0,1 – 0,2 N/A [Ele16] 0,15 – 0,6 N/A [ESE74 S.245] Hochvakuum-schalter: 1 – 2 N/A [ESE74 S.245]
Zinn	> 1 N [AMP04b, Vin09 S.273, Sla14 S.133] 1 – 3 N [Dij98] > 2 N [ScTh11] 5 – 10 N [Dij07b]	> 1 N [Sla14 S.133]	

Aus Tabelle 2-4 ist zu entnehmen, dass die empfohlene minimale Kontaktkraft je nach Literaturquelle stark variieren kann. Bei Steckverbindern für die Leistungsübertragung werden höhere Kontaktkräfte verwendet, als bei der Signalübertragung. Im Gegensatz zu der Schaltgerätetechnik ist es für Steckverbinder unüblich minimale Kontaktkräfte anzugeben, die abhängig von dem zu übertragenden Strom sind.

Für die konstruktive Auslegung sollte zwischen Kontaktkräften für Signal- oder Leistungsübertragung unterschieden werden. Bei Steckverbinderkontakten für die Leistungsübertragung sollte die Kontaktkraft möglichst hoch sein, um einen geringen Kontaktwiderstand und damit eine geringe Joule'sche Verlustleistung sicherzustellen. Für die Leistungsübertragung wird üblicherweise Silber oder Zinn als Oberflächenbeschichtung verwendet [Sla14 S.133]. Der Bereich der Kontaktkraft liegt wie in Tabelle 2-4 zu sehen ist in einem Bereich von  $> 1$  N bis zu 100 N.

Bei der Signalübertragung sollte die Kontaktkraft möglichst gering sein, um wichtige Eigenschaften wie die Steck- und Ziehkräfte bei hochpoligen Steckverbindervarianten zu verringern. Sie sollte so hoch sein, dass eine sichere Kontaktierung entsteht und die Fremdschichten zerstört werden.

Neben der Kontaktkraft wird auch die maximale Hertz'sche Flächenpressung in der Kontaktfläche als möglicher Auslegungsparameter für zuverlässige elektrische Kontakte diskutiert [KaHo89, Flu90, Mro91, Dij02, Mro11a]. Laut [Dij02] sind beide Parameter wichtig. Die Kritik an der Flächenpressung liegt darin, dass unabhängige Parameter, d.h. die Kontaktkraft, die Kontaktgeometrie und der Elastizitätsmodul (Anhang A 3 Gleichung (6.26) und (6.28)) in einem einzigen Parameter zusammengefasst werden [Mro91] [Mro11a]. So kann durch eine hohe Kontaktkraft und eine große Kontaktgeometrie die gleiche Flächenpressung erzeugt werden wie bei einer geringen Kontaktkraft und einer kleinen Kontaktgeometrie [Mro91, Mro11a]. Die Flächenpressung ist wichtig für die Wirksamkeit der Zerstörung von Fremdschichten beim Stecken [Dij02]. Der Verschleiß, der Kontaktwiderstand oder die Zerstörung der Fremdschicht sind jedoch nicht nur von der Höhe der Flächenpressung abhängig [Mro91, Mro11a, Mro11b]. Daher ist die Vorgabe einer bestimmten Flächenpressung kein geeigneter Konstruktionsparameter für unterschiedliche Anwendungen und Eigenschaften von elektrischen Kontakten [Mro91 S.7]. Zudem lässt sich die Flächenpressung nicht direkt messen. Simulationen haben gezeigt, dass an den individuellen Berührungsflächen (a-spots) deutlich höhere Flächenpressungen vorliegen, als durch die Hertz'sche Theorie vorhergesagt [Lei09 S.188].

Im Gegensatz zu der Flächenpressung liegt ein großer Vorteil der Kontaktkraft darin, dass sie unabhängig von anderen Parametern ist und direkt an Steckverbindern gemessen bzw. eingestellt werden kann.

#### 2.4.1.2 Berechnung der Kontaktkraft von Biegefedern

Um eine vorgegebene Kontaktkraft zu erhalten, muss das Federelement dementsprechend dimensioniert werden. Kontaktfedern sind die funktionell wichtigsten Bauelemente an Steckverbinderkontakten [ViKe02 S.405]. Bei den meisten Kontaktfedern findet eine Funktionsintegration statt, bei der die Kontaktfedern mehrere Funktionen gleichzeitig übernehmen. An sie werden sowohl elektrische, als auch mechanische und thermische Anforderungen gestellt. Die Funktionsintegration dient der Vereinfachung der Systemstruktur und der Reduzierung des Bauraums. Zudem ergibt sie eine einfachere Fertigung und Montage der Bauelemente. Um bei Steckverbinderkontakten die Kontaktkraft zu erhöhen, oder der Relaxation entgegenzuwirken, kann auch das Prinzip der Funktionstrennung angestrebt werden. In diesem Fall wird eine zusätzliche Überfeder verwendet, welche nur für die Federeigenschaften zuständig ist. Für den stromführenden Bereich und für das Federelement können so optimale Werkstoffe eingesetzt werden [Bei93].

Geschlitzte Kontaktfedern stellen in ihrer einfachsten Form eine einseitig eingespannte Biegefeder dar [Mro93, Lan00 S.10]. Laut [Hor87] können die meisten edelmetallbeschichteten Steckkontakte in guter Näherung als lineare Balkenfeder beschrieben werden und somit in einfacher Weise analytisch berechnet werden [BrNo06, Sch06 S.12].

Bei der konstruktiven Auslegung von Federn sind ein Funktionsnachweis und ein Festigkeitsnachweis zu erbringen. Im Rahmen des Funktionsnachweises wird die Einhaltung von Federkraft, Federweg und Federsteifigkeit überprüft. Der Festigkeitsnachweis wird zur Überprüfung der Einhaltung von zulässigen Beanspruchungen erbracht [MeWa93 S.97].

Zur Charakterisierung einer Feder wird die Federrate  $C(x)$  herangezogen. Sie beschreibt den Zusammenhang zwischen der auf die Feder einwirkenden Kraft  $F$  und dem sich daraufhin einstellenden Federweg  $x$  [MeWa93 S.92]:

$$C(x) = \left. \frac{dF}{dx} \right|_x \quad (2.2)$$

Besitzt die Feder eine lineare bzw. annähernd lineare Kennlinie, so hat die Federrate einen konstanten Wert, der durch die Federkonstante  $C$  beschrieben wird [MeWa93 S.94]. Bei bekannter Federkonstante und gegebener Auslenkung  $\Delta x_S$  kann die resultierende Kontaktkraft  $F_K$  ermittelt werden.

$$F_K = C \cdot \Delta x_S \quad (2.3)$$

Für eine einseitig eingespannte Biegefeder mit konstantem Querschnitt kann die Federkonstante analytisch berechnet werden. Für die Berechnung gelten die in Tabelle 2-5 aufgeführten Voraussetzungen und Vereinfachungen, deren Einhaltung zu berücksichtigen ist.

Tabelle 2-5: Voraussetzungen und Vereinfachungen für die analytische Berechnung der Federkonstante [MeWa93 S.120, MSW07]

Voraussetzungen und Vereinfachungen	Kontaktfeder von Steckverbinderkontakten
Elastische Werkstoffbeanspruchung	Belastung der Kontaktfeder im Hooke'schen Bereich
Ideale Einspannungen und Auflager (Einspannung starr und Auflager reibungsfrei)	Stark abhängig von der Konstruktion
Auftretende Spannungen sind dem Abstand von der neutralen Faser direkt proportional	Belastung der Kontaktfeder im Hooke'schen Bereich
Keine Querschnittsveränderung bei Belastung	Erfüllt
Verlagerung des Kraftangriffspunktes ist klein und die Hebelarmverkürzung ist vernachlässigbar	Schwach gekrümmte Balken mit geringer Auslenkungen

Sind die in Tabelle 2-5 beschriebenen Voraussetzungen und Vereinfachungen erfüllt, so kann die Federkonstante von Biegebalken mit verschiedenen Geometrien und Werkstoffkennwerten berechnet werden. Die meisten Kontaktfedern von geschlitzten Steckverbinderkontakten lassen sich auf einfache Grundformen wie z.B. Rechteck oder Kreisringstück zurückführen, da dies fertigungstechnisch anzustreben ist. Für flache Steckverbinderkontakte mit

Rechteckquerschnitt und runde Steckverbinderkontakte mit kreisringförmigem Querschnitt sind die Flächenmomente 2. Grades im Anhang A3 (Tabelle 6-2) dargestellt.

Für den Festigkeitsnachweis an Kontaktfedern kann die maximale Randfaser-spannung an der Kontaktfeder analytisch berechnet werden (Anhang A3 Ta-belle 6-2). Der Arbeitspunkt für die Kontaktfeder darf nicht zu nah an der maximalen Dehngrenze des Werkstoffs liegen, da es andernfalls mit der Zeit durch Relaxation zu einer plastischen Verformung kommt [Lei09 S.26].

Aus den mathematischen Gleichungen können durch Umstellen hilfreiche Kenntnisse ermittelt werden. Für eine vorgegebene maximale Spannung kön-nen die maximal zulässige Kontaktkraft oder die maximale Auslenkung einer Kontaktfeder berechnet werden (Anhang A3 Tabelle 6-2).

Bei Steckverbinderkontakten findet konstruktiv bedingt oftmals eine Reihen- und / oder Parallelschaltung von Einzelfedern statt. Dadurch ergibt sich ein Federsystem, welches ebenfalls mit den im Anhang A3 Tabelle 6-3 aufgeführ-ten Gleichungen analytisch berechnet werden kann. Bei einer Parallelschaltung der einzelnen Kontaktfedern legt der Kraftangriffspunkt jeder Einzelfeder beim Stecken des Kontaktstifts den gleichen Federweg zurück. Bei der Reihen-schaltung wird jede Einzelfeder durch die gleiche Gesamtfederkraft belastet [MeWa93 S.105].

Anhand der analytischen Gleichungen können wichtige Einflussparameter direkt abgelesen werden, um diese im Rahmen der konstruktiven Auslegung besonders zu berücksichtigen. Es ist zu erkennen, dass die Kontaktkraft bei rechteckigen Kontaktfedern sehr stark (dritte Potenz im Anhang A3 Glei-chung (6.1)) von der Dicke des Werkstoffs und der Einspannlänge abhängig ist. Die Dicke der Kontaktfeder kann bei Walzprodukten mit einer geringen Toleranzabweichung eingestellt werden [Wie99]. Die Einspannlänge ist aller-dings ein kritischer Parameter. Bei Steckverbinderkontakten ist nicht immer ersichtlich, wo die als ideal anzunehmende Einspannung für Kontaktfedern liegt. Dadurch ist die genaue Einspannlänge nur schwierig zu definieren, was aufgrund der Abhängigkeit in der dritten Potenz einen großen Einfluss auf die Genauigkeit der Berechnung hat.

Für kompliziert gestaltete Federgeometrien können die Kontaktkraft und die maximale Spannung nur noch numerisch durch Zerlegen in Teilbereiche und Lösen von Differenzialgleichungen oder durch Anwendung der Energiebilanz berechnet werden [Hor85 S.75–90, Hor87]. Daher hat sich aufgrund einer gestiegenen Bedienerfreundlichkeit von kommerziellen Berechnungsprogrammen, einer guten Durchdringung der Problematik und einer verringerten Rechenzeit die mechanische FE-Analyse im Rahmen der Feingestaltung durchgesetzt. Diese kann neben komplexen Randbedingungen auch Material-Nichtlinearitäten, geometrische Nichtlinearitäten und Nichtlinearitäten infolge Randbedingungen berücksichtigen [Nas10 S.10, Geb11 S.30]. Zusätzlich können dynamische Belastungen besser simuliert werden [GKM00].

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die Auswahl der Kontaktkraft nicht eindeutig zu klären ist. Sie ist stark von den Einsatzbedingungen, dem individuellen Konzept und den verwendeten Werkstoffen abhängig. Für eine erste Abschätzung können empfohlene Kontaktkräfte aus der Literatur entnommen werden. Dabei ist jedoch stets zu prüfen, unter welchen Bedingungen die Kontaktkräfte ermittelt wurden, z.B. für welche Art von elektrischem Kontakt. Ausgehend von den geometrischen Abmessungen und den Werkstoffeigenschaften lässt sich die Kontaktkraft von den meisten Steckverbinderkontakten mit geschlitzten Kontaktfedern in einer guten Näherung analytisch berechnen (Anhang A3). Die wesentlichen Zusammenhänge können anhand der Gleichungen abgelesen werden. Zudem können die Gleichungen verwendet werden, um einen Funktionsnachweis und ein Festigkeitsnachweis zu erbringen und dadurch die Kontaktfedern zu dimensionieren.

### 2.4.2 Kontaktwiderstand

Ein elektrischer Kontakt beschreibt den Zustand, der durch die stromführende Berührung zweier elektrisch leitfähiger Bauelemente entsteht [ESE74 S.130, ViKe02 S.1]. Im Gegensatz zu einem durchgehenden Leiter kommt es bei Stromfluss an der Berührungsstelle zu einem zusätzlichen elektrischen Widerstand [Bin12, Hol67 S.10]. Dieser zusätzliche Widerstand wird als Kontaktwiderstand  $R_K$  bezeichnet. Er setzt sich aus dem Engewiderstand  $R_C$  und dem Fremdschichtwiderstand  $R_F$  zusammen [Hol67 S.10, ViKe02 S.3]:

$$R_K = R_C + R_F \quad (2.4)$$

Der Engewiderstand entsteht aufgrund der Einschnürung der Stromlinien, da sich die elektrisch leitende Kontaktfläche an der Berührungsstelle auf mikroskopisch kleine Berührungsflächen (*a-spots*) beschränkt [Bin12, Hol67 S.10]. Dadurch kommt es aufgrund der erhöhten Stromdichte zu einem erhöhten elektrischen Widerstand in der Umgebung der Berührungsfläche. Der Fremdschichtwiderstand kann durch Fremdschichten in der Kontaktstelle auftreten [Hol67 S.2].

Für den Entwickler von Steckverbinderkontakten ist der Kontaktwiderstand von entscheidender Bedeutung [Wil81 S.6]. Es handelt sich dabei um eine wichtige Kenngröße, welche die Funktion und die Zuverlässigkeit von Steckverbindern bestimmt [QBT91, Sla14 S.237]. Die kontaktphysikalische Untersuchung der Berührungsstelle ist eine wesentliche Aufgabenstellung bei der Untersuchung von elektrischen Kontakten. Um elektrische Kontakte an Schaltgeräten, Stromschienen und Steckverbindern qualitativ und quantitativ zu beschreiben, werden seit Jahrzehnten weltweit experimentelle [Hol67 S.10, QBT91, SoSc09, BEB10, Sla14] und modellbasierte Untersuchungen [GrWi66, Lei09, Pop10, JDL14] durchgeführt. Eine vollständige Beschreibung aller Vorgänge in der Kontaktstelle, inklusive der Alterungsmechanismen, ist allerdings noch nicht gelungen [Sla14 S.234]. Der Grund dafür ist die Vielzahl der Einflussparameter und deren Wechselwirkungen.

Zur Vorhersage des Engewiderstandes bzw. der Kontaktfläche gibt es verschiedenste Modelle unterschiedlicher Komplexität (z.B. analytische oder numerische Modelle), die unter speziellen Bedingungen (z.B. elastisches- oder plastisches Materialverhalten) und mit verschiedenen Vereinfachungen (z.B. Vernachlässigung von Rauheit und Oberflächenbeschichtung) zur Berechnung des Engewiderstandes verwendet werden können. Dabei muss für die praktische Anwendung ein Kompromiss zwischen möglichst genauen Ergebnissen und dem Rechenaufwand gefunden werden.

Von Leidner et al. [Lei09, LSM10] wurden mit einem numerischen Verfahren die kontaktphysikalischen Vorgänge in der Kontaktstelle sehr genau modelliert. Es lassen sich Schichtsysteme konstanter Dicke und Rauheiten berücksichtigen. Für den Bereich geringer Kontaktkräfte und dünner Oberflächenbeschichtungen können mit dem Modell elastisch-plastische Deformationen, die Verteilung der inneren Spannungen, der Engewiderstand, sowie die Stromdichteverteilung im Kontaktbereich realer elektrischer Kontakte simuliert werden. Dadurch lässt sich der Kontaktpunkt gezielt untersuchen und optimieren.

Allerdings ist es derzeit noch nicht möglich Vorgänge wie z.B. Erweichungserscheinungen oder die Veränderung der Oberfläche und der Fremdschichten in Abhängigkeit von den Steckzyklen zu modellieren und zu berechnen.

Im Anhang A4 sind bekannte Einflussparameter auf den Kontaktwiderstand aufgelistet. Bei der Modellbildung ist es nicht immer notwendig alle Einflussparameter zu berücksichtigen. Besonders in der Phase der Grobgestaltung von Steckverbinderkontakten reicht oftmals eine grobe Abschätzung des Kontaktwiderstandes aus. Er stellt in der Praxis eine statistische Größe dar und kann stark variieren. Während des Betriebs kann sich der Kontaktwiderstand im Gegensatz zu dem Anfangs-Zustand ändern [BLS09, GLG14a]. Durch Strombelastung oder beim Stecken und Ziehen kann sich der Kontaktwiderstand zunächst verringern, da Fremdschichten zerstört werden und Rauheitsspitzen abgeflacht werden. Dies führt zu einer größeren wahren Kontaktfläche [Hol67 S.135, Di98, BEB10].

Der häufigere Fall besteht allerdings darin, dass sich der Kontaktwiderstand im Betrieb erhöht [Mro93]. Folgende Phänomene können eine Erhöhung des Kontaktwiderstandes zur Folge haben:

- Fremdschichten mit geringerer elektrischer Leitfähigkeit
  - Chemische Reaktion [Ber96, BKM07 S.2012, Blu09, SSW14]
  - Reiboxidation (Fretting) [BKM07 S.214, KöSo15]
  - Verunreinigungen
- Veränderungen in dem Werkstoff
  - Interdiffusion [BKM07 S.231, Blu09, Bur11, PSG13]
  - Elektromigration [BKM07 S.237]
- Abbau der Kontaktkraft
  - Spannungsrelaxation [Ber96, BKM07 S.240, Blu09]
  - Materialabtrag infolge Verschleiß [Vin16 S.566]
  - Toleranzen im System
  - Beschädigung durch Missbrauch

Im Rahmen dieser Arbeit wird für die Phase der Grobgestaltung auf vereinfachte Berechnungen zurückgegriffen, welche die wichtigsten geometrischen und stofflichen Zusammenhänge und deren Einfluss auf den Kontaktwiderstand quantitativ beschreiben. Für eine genauere Berechnung des Kontaktwiderstandes kann auf erweiterte Berechnungsmodelle oder experimentell ermittelte Ergebnisse zurückgegriffen werden.

Für die Berechnung des Kontaktwiderstandes wird, sowohl bei der FE-Analyse, als auch bei der analytischen Berechnung zweckmäßig zwischen einer mechanischen und elektrischen Betrachtung unterschieden. Im Rahmen der mechanischen Betrachtung geht es um die Ermittlung der leitfähigen Kontaktfläche, wenn sich zwei Bauelemente berühren. Bei der elektrischen Betrachtung geht es um die Ermittlung des Engwiderstandes, wenn ein Stromfluss durch die leitfähige Kontaktfläche(n) stattfindet.

### 2.4.2.1 Kontaktfläche (Mechanische Betrachtung)

In der Praxis kommen ideal glatte Oberflächen nicht vor [ESE74 S.130]. Bei der Berührung zwischen zwei realen Kontakten kommt es aufgrund der Rauheit der Oberfläche und Fremdschichten nicht auf der ganzen scheinbaren Kontaktfläche zwischen zwei Kontakten zu einem Stromfluss. Folgende Kontaktflächen werden unterschieden [ESE74 S.131, Hol67 S.7] und sind in Abbildung 2-8 dargestellt:

Scheinbare Kontaktfläche  $A_s$ : Fläche, die bei der Berührung makroskopisch betrachtet auftritt

Tragende Kontaktfläche  $A_t$ : Summe aller mikroskopischen Berührungsstellen (Metallisch und Fremdschichten), auf die eine Kontaktkraft wirkt

Wirksame Kontaktfläche  $A_w$  (engl.: a-spots): Teil der tragenden Kontaktfläche, in dem der Stromfluss stattfindet

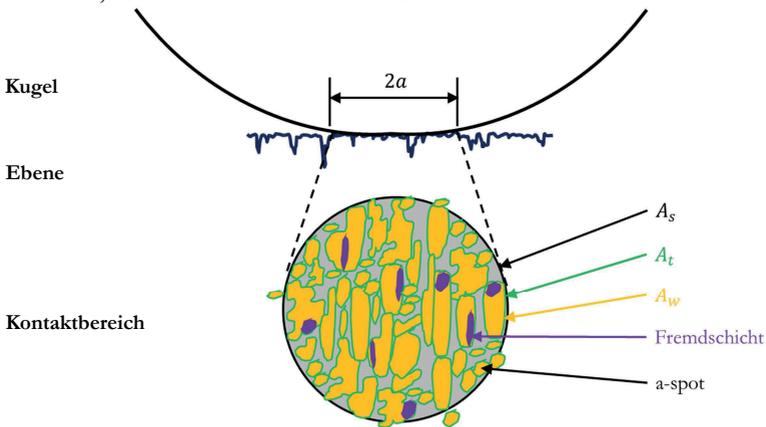


Abbildung 2-8: Schematische Darstellung einer realen Kontaktfläche

Abhängig von der Geometrie und dem Werkstoff der Kontaktpartner, der Art der Kontaktierung und den Umgebungsbedingungen unterscheidet sich der Anteil zwischen den verschiedenen Kontaktflächen. Bei fremdschichtbehafteten und rauen Kontaktflächen gilt stets:

$$A_w < A_t < A_s \quad (2.5)$$

Folgende Umstände sind typisch bei Steckverbinderkontakten für die Leistungsübertragung und haben Auswirkung auf den Anteil der Kontaktflächen.

Tabelle 2-6: Zustände bei Steckverbinderkontakten für die Leistungsübertragung

	Zustände von Steckverbinderkontakten für die Leistungsübertragung	Auswirkung
1	Verwendung edler Oberflächenbeschichtungen meist in Form von Silber	Geringerer Anteil von Fremd- bzw. Oxidschichten auf der Oberfläche
2	Scherkräfte beim Stecken	Mechanische Zerstörung der Fremdschicht (Reinigungseffekt) [Kas96, Djj98, BSM88] Rauheitsspitzen abgeflacht [BEB10]
3	Erhöhte Kontaktkräfte	Hohe Flächenpressung wodurch Rauheitsspitzen abgeflacht und Fremdschichten zerstört werden [Hil56 S.6, Sla14 S.53, Bur15]
4	Runde oder elliptische Kontaktfläche	Definierte Kontaktflächen
5	Erhöhte elektrische Spannung / Strom	Tunnel-Effekt und elektrische Zerstörung der Fremdschichten (A und B-Fritten) [Hol67 S.135, Kas96, Bur15, Vin16 S.579]

In Abbildung 2-18 zeigen Experimente an vergoldeten Kontakten, dass bei Kräften  $> 5 \text{ N}$  die Rauheiten und Fremdschichten vernachlässigt werden können. Der Kontaktwiderstand kann für diese Anordnung mit einfachen Berechnungsmodellen ermittelt werden. In diesem Fall wird für sphärische Kontakte davon ausgegangen, dass die wahre Kontaktfläche der scheinbaren Kontaktfläche entspricht:

$$A_w = A_t = A_s \quad (2.6)$$

Damit wird die Kontaktstelle als eine einzelne Kontaktfläche vereinfacht.

### Hertz'sche Kontaktfläche mit rein elastischem Materialverhalten

Bei der Berührung zweier isotroper Körper lassen sich für rein elastisches Materialverhalten die Verformungen und Spannungen nach der Theorie von Hertz berechnen. Die Berechnung der Kontaktfläche wurde in dem allgemeinen Fall für die Berührung zweier Ellipsoide hergeleitet [Her81, Dee92] (Anhang A3 Tabelle 6-4). Durch Variation der Halbkrümmungsradien zwischen  $-\infty < r_{ii} < +\infty$  lässt sich mit dieser Berechnung die Kontaktfläche von verschiedenen Körpern wie Kugeln, Ellipsoiden oder Zylindern gegen gleichartige Körper oder gegen eine Ebene berechnen.

Der Kontaktbereich bei Steckverbinderkontakten kann im einfachsten Fall als Anordnung „Kugel auf Ebene“ (Abbildung 2-9) mit einer symmetrischen Materialpaarung vereinfacht werden.

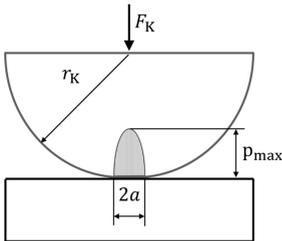


Abbildung 2-9: Kontaktfläche bei der Kombination Kugel/Ebene

Der Radius der scheinbaren Kontaktfläche  $a_{el\_K/E}$  kann dann berechnet werden [Hol67 S.368, ESE74 S.132, Joh03, Kra04 S.122]:

$$a_{el\_K/E} = \sqrt[3]{\frac{3}{2} \cdot \frac{F_K \cdot (1 - \nu^2) \cdot r_K}{E}} \quad (2.7)$$

Zudem lässt sich auch die Flächenpressung  $p(x)$  innerhalb der Kontaktstelle berechnen [Her81 S.167]:

$$p(x) = \frac{3}{2} \cdot \frac{F_K}{a_{el,K/E}^2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{a_{el,K/E}^2 - x^2} \quad (2.8)$$

Laut [LeSc03] beschreibt die Hertz'sche Gleichung in guter Näherung die lokale Spannung und die Deformation zweier mit einer definierten Kraft aneinander gedrückten sphärischen Kontakthälften. Die Hertz'sche Gleichung berücksichtigt nur die elastische Verformung und weder Schichtsysteme noch die Rauheit. Laut [LSS07] ergeben sich bei Zinn beschichteten Steckverbinderkontakten im Bereich hoher Kontaktkräfte ( $> 2$  N) gute Näherungswerte im Vergleich zu realen Kontakten. Für Goldkontakte ergibt sich bei Kontaktkräften größer 1 N keine signifikanten Unterschiede zwischen der Hertz'schen Lösung und experimentell gewonnenen Daten (Geometrie: Kugel/Ebene,  $r = 1,5$  mm; Schichtfolge: Au über Ni über CuNiSiP; Rauheit:  $0,1 - 0,3 \mu\text{m}$ ) [LSM13]. Der Effekt der Deformation auf Grund von rauen Oberflächen hat in einer Tiefe von  $0,5 \mu\text{m}$  keinen Einfluss mehr [LSS07, ZBD14]. Im ersten Ansatz werden in [LeSc03] die Berechnungen nur für glatte Oberflächen rein elastisch durchgeführt. Die Resultate reichen nach [LeSc03] zur Interpretation des Kontaktverhaltens und zur Ableitung von Risiken in Abhängigkeit von den geometrischen Größen, den Werkstoffkennwerten und der Kontaktbelastung aus.

Für kleine Kräfte ist bei normaler Rauheit die reale Kontaktfläche größer als die mit Hertz berechnete Kontaktfläche [Lei09 S.188, Sch12 S.23]. Für Oberflächen geringer Rauheit und für Kontaktelemente, die durch hohe Kontaktkräfte beansprucht werden, stellt die Hertz'sche Theorie eine gute Näherung dar [Vin09 S.12]. Bei Kontakten mit dünnen Oberflächenbeschichtungen [Sla14 S.23] müssen für die Berechnung die Werkstoffkennwerte des Basismaterials eingesetzt werden [Dij00].

## Elastisch-plastische Kontaktfläche

Elektrische Steckverbinderkontakte sind meist so ausgelegt, dass sie partiell den elastischen Bereich überschreiten [LeSc03]. Allerdings befinden sie sich makroskopisch gesehen nicht im rein plastischen Bereich. Dafür sind die Kontaktkräfte zu gering.

Für einen einzelnen sphärischen Kontakt mit elastisch-ideal-plastischem Materialverhalten (Abbildung 2-10) lassen sich der Beginn der plastischen Verformung und die Kontaktfläche mit verschiedenen Modellen analytisch beschreiben [SrYo93, KoEt02, JaGr05]. In [HSE03, BEB10] wird zur Berechnung der Kontaktfläche in dem elastisch-plastischen Bereich das Modell nach „Sridhar und Yovanovich“ [SrYo93] verwendet. Bei diesem Modell wird die Kontaktfläche nach Hertz [Joh03] für den rein elastischen Bereich durch eine asymptotische Mischungsregel mit dem rein plastischen Bereich [Tab51] verbunden.

In dieser Arbeit wird das Modell nach „Jackson und Green“ [JaGr05] verwendet. Dieses Modell basiert ebenso wie das Modell nach „Kogut und Etsion“ [KoEt02] auf FE-Analysen, anhand derer empirisch ermittelte Gleichungen approximiert werden. In dem Modell nach „Kogut und Etsion“ [KoEt02] muss für die verschiedenen Bereiche (elastisch, elastisch-plastisch und plastisch) mit unterschiedlichen Gleichungen gerechnet werden. Das Modell nach „Jackson und Green“ hat den Vorteil, dass nur zwischen elastischem und elastisch-plastischem Bereich unterschieden werden muss [JaGr05]. Zudem wurde anstatt einer konstanten Härte, eine von der Geometrie des Kontaktpunktes abhängige Härte verwendet. Die Gleichungen zur Berechnung der Kontaktfläche sind im Anhang A3 Tabelle 6-6 dargestellt. Die analytische Berechnung hat im Gegensatz zu der numerischen FE-Analyse den Vorteil, dass für die Berechnung der Kontaktfläche mit elastisch-ideal-plastischem Materialverhalten ein Tabellenkalkulationsprogramm verwendet werden kann und dadurch die Rechenzeiten vernachlässigbar gering ausfallen.

### Materialverhalten

Die Auswahl eines geeigneten Materialmodells und die richtigen Werkstoffkennwerte beeinflussen wesentlich die Ergebnisse von Simulationen und Berechnungen. In Abbildung 2-10 ist eine im Rahmen dieser Arbeit gemessene Spannungs-Dehnungs-Kurve von Kupfer (CU-ETP) dargestellt. Für die Berechnung muss diese Kurve in geeigneter Form angenähert werden. Dazu werden verschiedene Materialmodelle verglichen.

Im Bereich kleiner Verformungen bzw. Dehnungen wird ein rein elastisches Materialverhalten angenommen. Der lineare Zusammenhang zwischen Spannung  $\sigma$  und Dehnung  $\varepsilon$  wird durch das Hooke'sche Gesetz beschrieben. Dabei entspricht der Elastizitätsmodul  $E$  dem Anstieg der Spannungs-Dehnungs-Kurve [CRS13 S.141]:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.9)$$

Bei höheren Dehnungen verliert das Hooke'sche Gesetz seine Gültigkeit. Es tritt eine plastische Verformung auf, was an der Krümmung der Spannungs-Dehnungs-Kurve zu sehen ist (Abbildung 2-10) [CRS13 S.147]. Plastisches Materialverhalten wird im einfachsten Fall elastisch-ideal-plastisch angenommen. Ab einer bestimmten Dehnung  $\varepsilon_F$  gilt dann eine konstante Spannung  $\sigma_F$  [GrFe07 S.C49].

$$\begin{aligned} \sigma &= E \cdot \varepsilon && \text{für } \varepsilon \leq \varepsilon_F \\ \sigma &= \sigma_F && \text{für } \varepsilon > \varepsilon_F \end{aligned} \quad (2.10)$$

Für die Simulation können Materialmodelle verwendet werden, die das elastisch-plastische Materialverhalten aus gemessenen Werten sehr gut nachbilden. Durch geeignete Modelle können auch die wahren Spannungen und Dehnungen aus der gemessenen technischen Spannungs-Dehnungs-Kurve herausgerechnet werden, um die Verfestigung und die Einschnürung während der Verformung der Zugprüfstäbe zu berücksichtigen [CRS13 S.153, Des14a S.10].

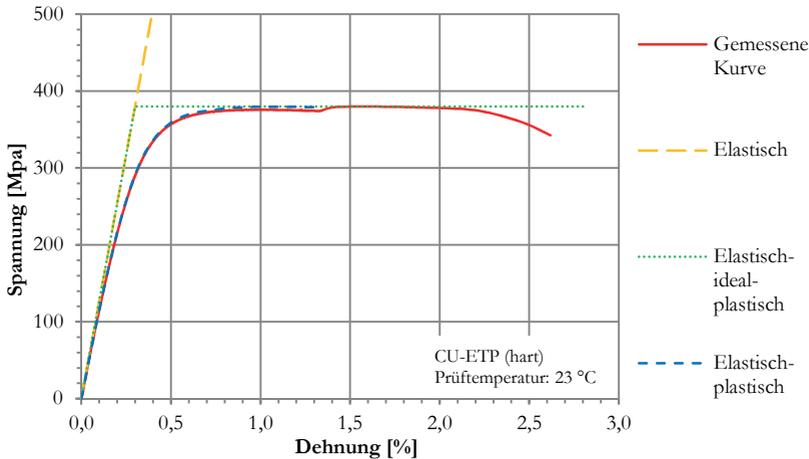


Abbildung 2-10: Spannungs-Dehnungs-Diagramm am Beispiel von Kupfer mit unterschiedlich abstrahiertem Materialverhalten

Im einfachsten Fall werden die Werkstoffkennwerte aus Datenblättern der Halbzeug-Hersteller entnommen. Die Werkstoffkennwerte wie z.B. Elastizitätsmodul und Dehngrenze sind allerdings nicht als exakte Größen zu verstehen [CRS13 S.162]. Die durch Normprüfungen ermittelten Werte sind unter anderem von dem Prüfverfahren, Fertigungsschritten, Bedienungsschwankungen und Gefügeinhomogenitäten abhängig [Wie99 S.90, CRS13 S.162]. An realen Produkten weichen die durch Normprüfungen ermittelten Werkstoffeigenschaften zudem von den wahren Werten ab, da andere Bauteilgeometrien, spezifische Einsatzbedingungen (z.B. Temperatur [Deu05] und Spannungsverteilung) und Verarbeitungseigenschaften (z.B. Umformgrad und Walzrichtung [Dij07a]) zusätzlichen Einfluss besitzen. Aus diesem Grund ist stets eine kritische Herangehensweise bei der Auswahl der Werkstoffkennwerte angebracht und mit einer teils starken Schwankung der Werkstoffkennwerte zu rechnen.

Im folgenden Kapitel wird mit Hilfe der numerischen Simulation unter anderem untersucht, welchen Einfluss die verschiedenen Modelle bzw. Abstraktionen des Materialverhaltens auf die berechnete Kontaktfläche haben.

## Numerische Simulation der Kontaktfläche

Um den Einfluss des Materialverhaltens auf die Kontaktfläche zu untersuchen, werden innerhalb dieser Arbeit FE-Analysen durchgeführt. Ebenso wie bei der analytischen Berechnung können auch bei der numerischen Simulation die Schritte der Berechnung der Kontaktfläche und die Berechnung des Engewiderstandes unterteilt werden. Mit dem Programm Abaqus (Version 6.12) wird die Kontaktfläche simuliert. Um Rechenzeit einzusparen, wird anstatt eines ganzen Modells nur ein Viertel-Modell der Anordnung „Kugel auf Ebene“ simuliert. Die Modelle werden parametrisch aufgebaut, sodass die einzelnen Parameter schnell geändert werden können, um Variantenberechnungen durchführen zu können. Der Bereich der Kontaktstelle wird im Gegensatz zu den übrigen Bereichen feiner vernetzt (in Abbildung 2-11 um den Faktor 20). Dadurch ergeben sich in dem relevanten Bereich genaue Ergebnisse. Zudem werden in dem weniger relevanten Bereich die Anzahl der Knoten verringert und damit die Rechenzeit reduziert. Der detaillierte Bereich wird so weit ausgedehnt, dass die relevanten Vorgänge (Verformung und Ausbildung des Engewiderstandes) in diesem Bereich abgebildet werden (Abbildung 2-11).

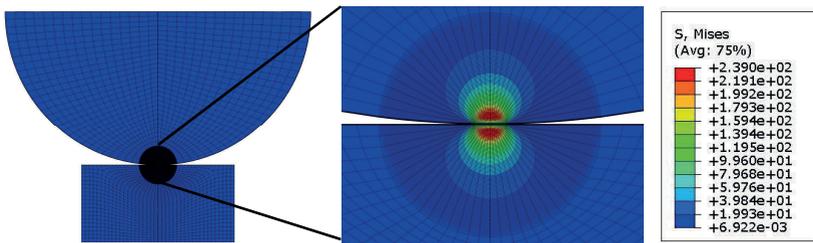


Abbildung 2-11: Spannungverteilung an der Kontaktstelle ( $r_K = 4$  mm;  $F_K = 10$  N; Elementkantlänge grob:  $100 \mu\text{m}$ , fein:  $5 \mu\text{m}$ ;  $E_S = 127$  GPa)

Für rein mechanische Simulationen werden Spannungs- und Verformungselemente des Typs C3D8R<sup>2</sup> [Des14b] verwendet. Für gekoppelte mechanisch-

---

<sup>2</sup> 8-node brick, reduced integration with hourglass control

elektrisch-thermische Simulationen werden Elemente des Typs Q3D8R<sup>3</sup> [Des14b] verwendet. Die Kontakte zwischen den zwei Bauelementen werden mit der Funktion „Node to surface“ definiert, wobei die Kugel als Slave-Fläche definiert wird. Über die Grenzflächen zwischen den beiden Bauelementen muss sowohl ein Wärmestrom, als auch ein elektrischer Strom fließen können. Durch eine Konvergenzstudie werden die elektrische und die thermische Leitfähigkeit der Grenzflächen so gewählt<sup>4</sup>, dass sie keinen Einfluss auf den Spannungsfall und den Wärmeübergang im Kontaktbereich haben.

Mit Hilfe der FE-Analyse lassen sich verschiedene mechanische Materialverhalten simulieren. Mit rein elastischem Materialverhalten und der Berechnung nach Hertz (Gleichung (2.7)) werden die Simulationsergebnisse verifiziert. Mit einem elastisch-ideal-plastischen Materialverhalten kann ein Vergleich zwischen der Simulation und dem Berechnungsmodell nach Jackson und Green (Anhang A3 Tabelle 6-6) durchgeführt werden. Des Weiteren kann auch ein elastisch-plastisches Materialverhalten simuliert werden, um einen möglichen Einfluss auf die Kontaktfläche zu untersuchen. In Abbildung 2-12 sind Berechnungen mit unterschiedlichen Materialmodellen aus Abbildung 2-10 dargestellt. Es ist zu sehen, dass das rein elastische Modell nach Hertz den geringsten Radius der Kontaktstelle vorhersagt. Mit elastischem und elastisch-ideal-plastischem Materialverhalten stimmen die numerischen und die analytischen Ergebnisse sehr gut überein. Das Modell nach Jackson und Green (Ja&Gr) gilt für reibungsfreie Körper und berücksichtigt lediglich eine Kugel gegen eine starre Ebene. Bei der Simulation wird eine für geschmierte Oberflächen typische Haftreibungszahl von  $\mu = 0,1$  verwendet [Buc81 S.322, VDI14 S.115]. Zudem werden sowohl die Kugel, als auch die Ebene als verformbar simuliert. Trotzdem besteht eine gute Übereinstimmung zwischen den Modellen.

---

<sup>3</sup> 8-node trilinear displacement, electrical potential and temperature, reduced integration with hourglass control

<sup>4</sup> Electrical Conductance  $\sigma$ : 1 E+10 S/mm<sup>2</sup>; Electrical Clearance d: 1 E-10 mm; Thermal Conductance k: 1 E+10 mW/(mm<sup>2</sup>·K); Thermal Clearance d: E-10 mm

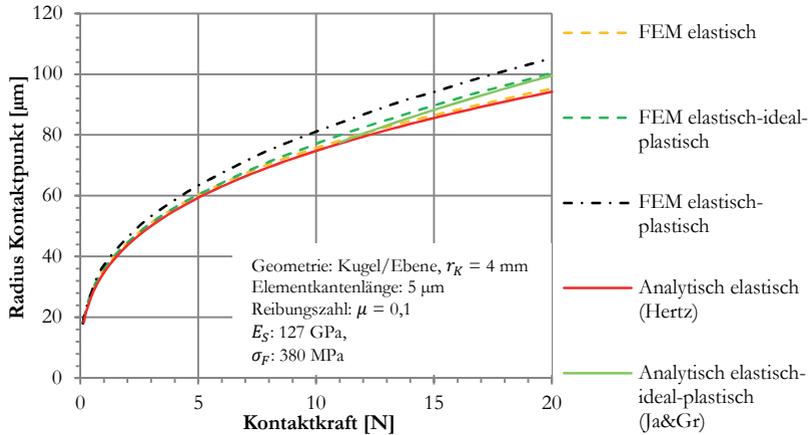


Abbildung 2-12: Vergleich der Ergebnisse von unterschiedlichen Berechnungsverfahren

Der Vergleich zeigt für mechanische Belastungen, dass die Kontaktfläche von idealisierten Kontakten mit analytischen Modellen ebenso berechnet werden kann wie mit der numerischen Methode. Für eine numerische Simulation ist allerdings ein viel höherer Modellierungsaufwand notwendig.

Um die Kontaktfläche numerisch zu berechnen, ist darauf zu achten, dass eine ausreichende Netzfeinheit verwendet wird. Durch eine zu große Elementkantenlänge, d.h. durch ein zu grobes Netz, wird die kreisförmige Kontaktfläche nur angenähert (Abbildung 2-13). Bei einem feinen Netz wird die kreisförmige Kontaktfläche besser angenähert (Abbildung 2-14).

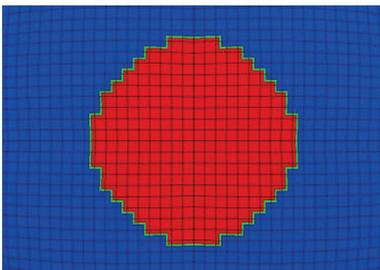


Abbildung 2-13: Kontaktfläche bei grober Vernetzung ( $10 \text{ }\mu\text{m}$ )

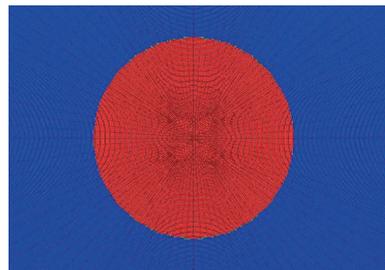


Abbildung 2-14: Kontaktfläche bei feiner Vernetzung ( $1 \text{ }\mu\text{m}$ )

Jedes Element, welches in Kontakt mit dem Gegenkörper ist, wird der Kontaktfläche zugerechnet. Eine zu grobe Vernetzung ergibt durch die Summation der einzelnen Flächen eine zu große Kontaktfläche. Mit Hilfe einer Konvergenzstudie kann die Kontaktfläche in Abhängigkeit von der Netzfeinheit untersucht und bewertet werden. Abbildung 2-15 zeigt den Einfluss der Netzfeinheit auf den Radius der Kontaktfläche. Dabei ist die Abweichung neben der Elementkantenlänge  $l_e$  auch von der aufgebrauchten Kontaktkraft abhängig. In [KoEt02] wird nach einer Konvergenzstudie eine optimale Elementkantenlänge von 3 % des Radius der Kontaktfläche  $a$  ermittelt. Für Abbildung 2-15 ergibt dies eine optimale Elementkantenlänge zwischen  $1,1 \mu\text{m}$  (bei  $a = 36,6 \mu\text{m}$ ) und  $2,4 \mu\text{m}$  (bei  $a = 82,0 \mu\text{m}$ ). Das für die Simulation in Abbildung 2-15 gewählte Netz ist mit einer minimalen Elementkantenlänge von  $1 \mu\text{m}$  etwas feiner gewählt.

Mit einer Elementkantenlänge von  $1 \mu\text{m}$  im Gegensatz zu  $10 \mu\text{m}$  liegt laut Abbildung 2-15 bei einer Kraft von  $1 \text{ N}$  eine Abweichung von  $9,8 \%$  vor. Bei einer Kraft von  $10 \text{ N}$  liegt die Abweichung nur noch bei  $2,7 \%$ .

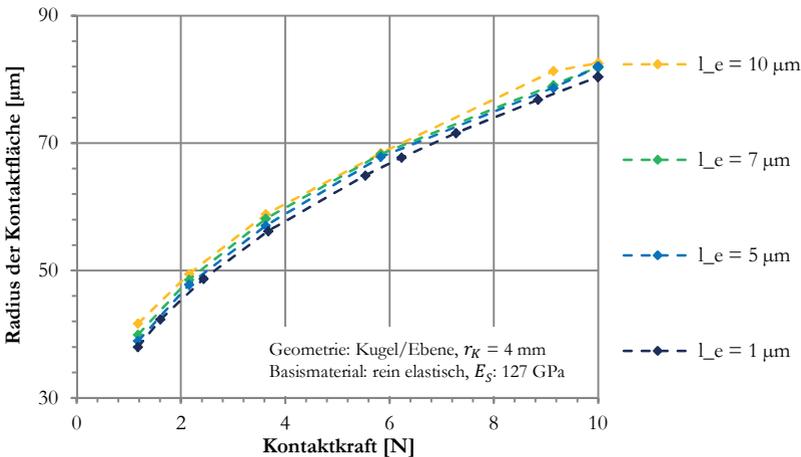


Abbildung 2-15: Einfluss der Elementkantenlänge  $l_e$  auf die Kontaktfläche

### 2.4.2.2 Engewiderstand (Elektrische Betrachtung)

Die analytischen Modelle zur Berechnung des Engewiderstandes beruhen darauf, dass der Stromfluss zwischen zwei elektrisch leitfähigen Bauelementen über eine definierte metallische Kontaktfläche (a-spot) mit vorgegebener Geometrie stattfindet. Die Stromlinien, die sich durch die leitende Kontaktstelle hindurchzwängen, bedingen durch die erhöhte Stromdichte den sogenannten Engewiderstand [Hol41 S.2]. Der größte Anteil des Engewiderstandes hat seinen Sitz in unmittelbarer Nähe der Berührungsstelle (Abbildung 2-19) [Hol41 S.2]. Der Engewiderstand liegt allerdings nicht in der Kontaktfläche, sondern im Inneren der Kontaktelemente [Rie00 S.12]. Es gibt verschiedene Modelle zur Beschreibung des Engewiderstandes eines fremschichtfreien elektrischen Kontaktes mit kreisförmiger oder elliptischer Kontaktfläche. Diese werden in [Höf77 S.13] und [Tat10 S.13] verglichen (Kugelmodell nach Holm [Hol41 S.14], Ellipsoid-Modell nach Holm [Hol41 S.15] und Kegelmodell nach Höft [Höf63 S.146]). Für die Berechnung elektrischer Kontakte ist das Ellipsoid-Modell nach Holm ein weithin akzeptiertes Modell [Hol67 S.15, ESE74, Höf77 S.12, Rie00 S.12, BKM07 S.7, Sla14 S.6].

### **Berechnung des Engewiderstandes mit dem Ellipsoid-Modell nach Holm**

Die Berechnung des Engewiderstandes wurde von Holm auf eine elektrostatische Kapazitätsbestimmung zurückgeführt, weil es sich bei der Widerstandsberechnung, als auch bei der Kapazitätsberechnung um Aufgaben handelt, die mathematisch auf dasselbe klassische Potentialproblem hinauslaufen. Zu der Zeit war das Kapazitätsproblem schon weitgehend gelöst, wodurch vorhandene mathematische Beschreibungen verwendet werden konnten [Hol41 S.12]. Unter der Voraussetzung eines räumlich konstanten spezifischen Widerstandes (geringe Erwärmung durch Messstrom [Hol41 S.12] und isotropes, homogenes Material) kann der elektrische Widerstand zwischen zwei Äquipotentialflächen ermittelt werden. Wie auch in folgender Simulation bestätigt wird, ähneln die Äquipotentialflächen des Engewiderstandes Ellipsoiden (Abbildung 2-16).

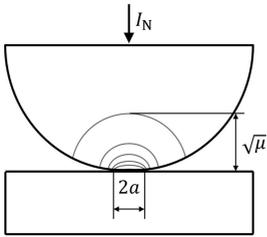


Abbildung 2-16: Äquipotentiallinien an einer Kontaktstelle

Unter der Annahme, dass die Kontaktfläche als Kreis mit dem Radius  $a$  ausgebildet ist, kann der einseitige Engewiderstand  $R_{C1}(\mu)$  als Funktion der Eindringtiefe  $\sqrt{\mu}$  in Abhängigkeit von dem spezifischen Widerstand  $\rho$  berechnet werden [Hol41 S.15]:

$$R_{C1}(\mu) = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot a} \cdot \arctan\left(\frac{\sqrt{\mu}}{a}\right) \quad (2.11)$$

Die Berechnung des Engewiderstandes einer Kontaktfläche mit elliptischer Form ist im Anhang A3 Tabelle 6-7 dargestellt.

Der Parameter  $\sqrt{\mu}$  gibt die Eindringtiefe in Form des Abstandes der Potentialfläche zu der Kontaktfläche an. Liegt die Äquipotentialfläche im Unendlichen  $\sqrt{\mu} = \infty$ , so spricht man von einer langen Stromenge, bei der die Kontaktfläche klein ist im Vergleich zu den anderen Abmaßen des Kontaktkörpers. Dadurch kann auch der Bahnwiderstand in dem Bereich vernachlässigt werden [Hol67 S.11]. Für einen Kontaktkörper ergibt sich bei einer langen Stromenge mit kreisförmiger Kontaktfläche die einfache Gleichung für den einseitigen Engewiderstand [Hol41 S.16]:

$$R_{C1} = \frac{\rho}{4 \cdot a} \quad (2.12)$$

Der doppelseitige Engewiderstand  $R_C$  für zwei Kontaktkörper eines Einmetall-Kontaktes ergibt sich zu [Hol41 S.21]:

$$R_C = \frac{\rho}{2 \cdot a} \quad (2.13)$$

Unter dieser Annahme kann für Kontakte mit kreisförmiger Berührungsfläche der Holm-Radius  $a$  gleich dem Radius der wirksamen Kontaktfläche gesetzt werden.

Die analytisch hergeleitete Gleichung (2.13) zur Berechnung des Engewiderstandes kann z.B. auch durch einen empirisch ermittelten Faktor  $\Phi$  erweitert werden. Für andere Geometrien der Kontaktstelle [Tim98, Sla14 S.8] oder bei Oberflächenbeschichtungen [Tim98, SSS09, SSH10] kann dadurch der Kontaktwiderstand berechnet werden:

$$R_C = \Phi \cdot \frac{\rho}{2 \cdot a} \quad (2.14)$$

Ähnlich wie der Bahnwiderstand, ist auch der Kontaktwiderstand abhängig von der Temperatur. Allerdings ist diese Abhängigkeit aufgrund des Temperaturgradienten in der Kontaktstelle nicht so stark ausgeprägt wie in einem Leiterstück gleicher Temperatur. Dies wird bis zu einer Erwärmung von ca. 200 °C durch den empirisch ermittelten Faktor 2/3 berücksichtigt [Bab54 S.330, Hol67 S.72]:

$$R_C(\vartheta) = R_{C_0} \cdot \left(1 + \alpha_{el} \cdot \frac{2}{3} \cdot \Delta\vartheta\right) \quad (2.15)$$

Um die Gültigkeit der analytischen Modelle zu untersuchen, wird in dieser Arbeit der Kontaktwiderstand in Abhängigkeit von der Kontaktkraft an realen Kontakten gemessen (Abbildung 2-17). In Abbildung 2-18 werden die verschiedenen analytischen Modellen mit den Messergebnissen verglichen.

Bei den Kontakten handelt es sich um die Anordnung Kugel auf Ebene. Die Kugel hat einen Radius von  $r_K = 4$  mm. Die Kontakte werden mit einer dün-

nen Goldschicht mit Nickel-Zwischenschicht beschichtet und vor der Messung gereinigt, um von einer rein metallischen Kontaktstelle ausgehen zu können. Der Einfluss einer zusätzlichen Schutzschicht auf den Engewiderstand hängt sowohl von der Dicke, als auch von der elektrischen Leitfähigkeit der Oberflächenschichten ab [Sla14 S.23]. Bei den Musterteilen liegt bei einer Kontaktkraft  $F_K$  von 10 N das Verhältnis zwischen Dicke der Schutzschicht ( $3,0 \mu\text{m}$ ) zu dem Durchmesser der Kontaktstelle ( $158 \mu\text{m}$ ) bei 0,019. Damit ist der Einfluss der Schichtdicke auf den Engewiderstand aufgrund der dünnen Schichten vernachlässigbar gering [Ben02, Sla14 S.25].

Der Kontaktwiderstand wird mit einer Vier-Leiter-Messung und einem Messstrom von 100 mA gemessen. Der Aufbau ist in Abbildung 2-17 dargestellt.

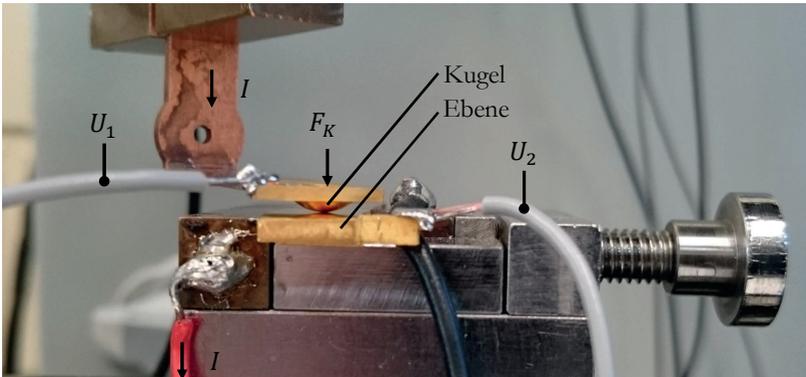


Abbildung 2-17: Aufbau zur Kontaktwiderstandsmessung

Bei der Berechnung wird für die elektrische Betrachtung das Ellipsoid-Modell nach Holm (Gleichung (2.13)) verwendet. Für die mechanische Betrachtung wird der Radius der Kontaktfläche mit dem Modell von Hertz für rein elastisches Materialverhalten (Gleichung (2.7)) und das Modell nach Jackson und Green für elastisch-ideal-plastisches Materialverhalten (Anhang A3 Tabelle 6-6) verwendet. Die Materialwerte sind in Abbildung 2-18 aufgelistet. Für die analytische Berechnung wird eine elektrische Leitfähigkeit von  $56 \text{ MS/m}$  an-

genommen, die der Leitfähigkeit des Basismaterials entspricht<sup>5</sup>. Die Rauheit der Messproben für die Ebene liegt bei  $R_z = 0,81$  bis  $1,02 \mu\text{m}$  bzw.  $R_a = 0,11$  bis  $0,16 \mu\text{m}$ . Die Rauheit der Kugel ist etwas höher und liegt bei  $R_z = 1,58$  bis  $1,77 \mu\text{m}$  bzw.  $R_a = 0,28$  bis  $0,32 \mu\text{m}$ <sup>6</sup>.

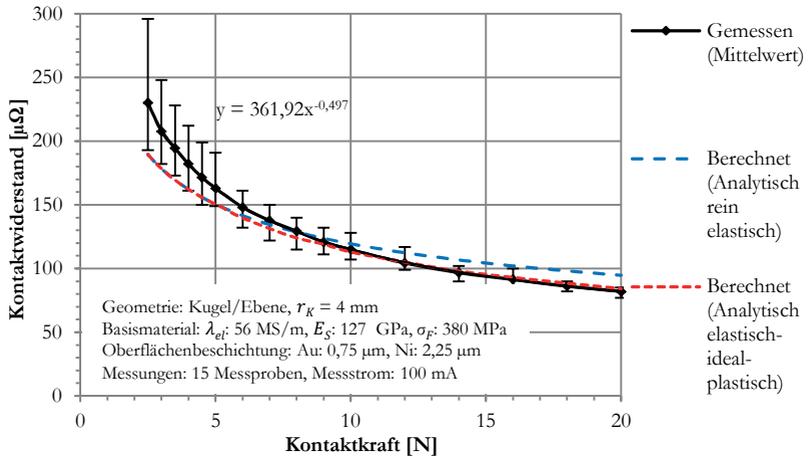


Abbildung 2-18: Gemessener und berechneter Kontaktwiderstand in Abhängigkeit von der Kontaktkraft; Fehlerbalken: Max./Min.

Bei geringen Kontaktkräften tritt für die gemessenen Werte eine erhöhte Streuung auf. In dem Bereich  $F_K < 5 \text{ N}$  liegt die Streuung der Messwerte zwischen 11 und 32 % von dem Mittelwert. In dem Bereich  $F_K > 5 \text{ N}$  liegt sie zwischen 4 und 12 % (Abbildung 2-18). Aufgrund der Streuung der Messwerte muss eine ausreichend hohe Anzahl an Prüfungen durchgeführt werden. Die Messung des Kontaktwiderstandes ergibt eine statistische Verteilung der Kontaktwiderstandswerte. Die Streubreite hängt von dem Zustand der Kontakte ab. Je sauberer die Kontakte und je größer die Kontaktkräfte sind, desto geringer wird die Streuung der Messwerte [Geh04].

<sup>5</sup> Die elektrische Leitfähigkeit des Basismaterials wurde mit dem Gerät SIGMASCOPE SMP 10 der Firma Fischer gemessen.

<sup>6</sup> Die Rauheit wurde mit einem Konfokalmessgerät NanoFocus  $\mu\text{surf explorer}$  gemessen.

Der gemessene Kontaktwiderstand liegt bei Kontaktkräften  $F_K < 8 \text{ N}$  über dem theoretischen Kontaktwiderstand eines idealen Kontaktes. Dieser erhöhte Kontaktwiderstand kann mit der Rauheit der Kontakte begründet werden. Die Kontaktierung erfolgt ohne Relativbewegung. Wenn die Rauheit bei mittleren Kräften abgeflacht ist, entspricht der gemessene Kontaktwiderstand dem mit elastischem Materialverhalten berechneten Kontaktwiderstand. Mit zunehmender Kontaktkraft nimmt der plastische Anteil zu. Ab einer Kontaktkraft von  $F_K > 5,5 \text{ N}$  ergibt die Berechnung mit elastisch-ideal-plastischem Materialverhalten die erste Abweichung zu der Berechnung mit elastischem Materialverhalten. In [BEB10] liegt für vergleichbare Kontaktkonfigurationen der Übergang von elastischem zu elastisch-plastischem Verhalten in der gleichen Größenordnung (10 N). Oberhalb von 10 N kann der Einfluss der Rauheit vernachlässigt werden, allerdings muss das elastisch-plastische Verhalten des Werkstoffs berücksichtigt werden [BEB10]. Bei größeren Kräften ergibt die Berechnung mit elastischem Materialverhalten zu geringe Kontaktflächen und damit einen zu hohen Engewiderstand.

Die Messungen in Abbildung 2-18 zeigen, dass für diesen Sonderfall einer sphärischen Kontakthälfte mit Goldoberfläche der Engewiderstand mit dem Ellipsoid-Modell nach Holm und einer Kontaktfläche mit elastisch-ideal-plastischen Materialverhalten nach Jackson und Green gut approximiert werden kann. Allerdings ist dies nicht der Fall, wenn z.B. Fremdschichten oder Linien- und Flächenkontakte auftreten. In diesen Fällen bietet es sich an, den Kontaktwiderstand des Systems empirisch zu ermitteln. Grundlegende Zusammenhänge, um das System zu verstehen, lassen sich allerdings unter vereinfachten Annahmen einer idealen Kontaktstelle untersuchen.

### Numerische FE-Analyse des Engewiderstandes

Mit der numerischen Simulation kann ebenfalls der Engewiderstand einer als ideal angenommenen Kontaktstelle berechnet werden. In Abbildung 2-19 werden zum Vergleich der Modellvorstellungen die simulierte und die analytisch berechneten Äquipotentiallinien einer kreisförmigen Kontaktstelle übereinandergelegt.

Die analytisch ermittelten Äquipotentialflächen werden mit Hilfe von Gleichung (2.11) und unter der Annahme von ellipsenförmigen Äquipotentialflächen berechnet. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen berechneten und simulierten Werten. Zwischen zwei benachbarten Äquipotentialflächen liegt ein Sechstel des Engewiderstandes  $R_{C1}$  [Hol41 S.16]. Die FE-Analyse bestätigt, dass Äquipotentiallinien die Form von Ellipsen besitzen.

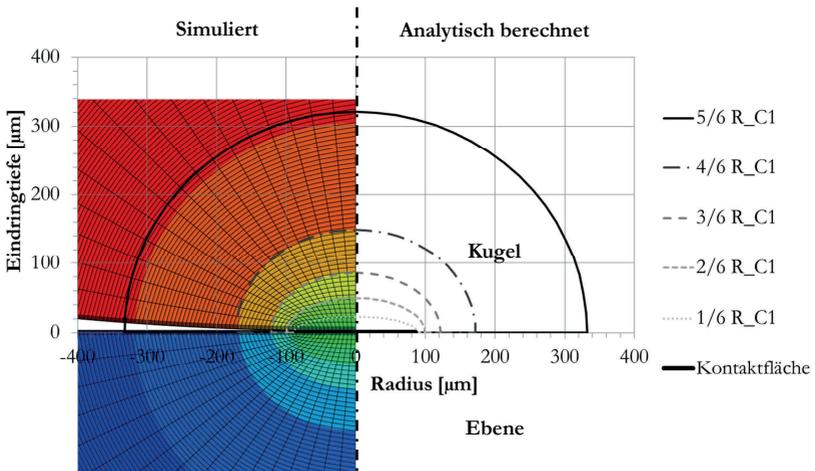


Abbildung 2-19: Simulierte und analytisch berechnete Äquipotentialflächen und Anteil des Einseitigen Engewiderstandes  $R_{C1}$ ;  $a=86 \mu\text{m}$

Wenn vereinfachte Annahmen zulässig sind, kann anhand dieser Erkenntnisse der Simulationsaufwand verringert werden. Mit einer Workstation<sup>7</sup> benötigt die Simulation des Engewiderstandes einer einzigen Kontaktstelle bei drei Kraftschritten, einem Viertel-Modell und einer Elementkantenlänge im Kontaktbereich von  $l_e = 10 \mu\text{m}$  (25.000 Knotenpunkte) ca. 44 Minuten. Bei einer Kantenlänge von  $1 \mu\text{m}$  und ca. 190.000 Knotenpunkten benötigt die Berechnung über 16 Stunden. Bei Steckverbinderkontakten mit mehreren Kontaktfedern vervielfacht sich die Berechnungszeit, sodass Berechnungszeiten von mehreren Tagen auftreten können. Zudem kann es aufgrund der unterschiedlichen Netzfeinheit zwischen dem Kontaktpunkt und dem restlichen Bereich des Steckverbinderkontaktes zu Stabilitätsproblemen in der Berechnung kommen.

Die analytische Berechnung hingegen benötigt mit gängigen Tabellenkalkulationsprogrammen keine nennenswerte Berechnungszeit. Um Simulationen zu vereinfachen, kann auch für FE-Analysen die Kontaktfläche oder der Engewiderstand analytisch berechnet werden. Anschließend werden die Parameter dem Simulationsprogramm übergeben. Statt einer mechanisch-elektrisch-thermischen Simulation muss dann z.B. nur noch eine elektrisch-thermische Simulation durchgeführt werden, was eine große Zeitersparnis bedeutet.

### **2.4.2.3 Empirische Ermittlung des Kontaktwiderstandes**

Wird ein elektrischer Kontakt z.B. im Rahmen von Varianten- oder Anpassungskonstruktionen für verschiedene Konstruktionen mehrfach verwendet, so kann die Abhängigkeit zwischen Kontaktwiderstand und Kontaktkraft empirisch ermittelt werden. Durch die Experimente werden alle relevanten Einflussparameter inkl. Kontaktgeometrie, Rauheit, Fremdschichten, Schichtsysteme, Fertigungseinflüsse, etc. berücksichtigt. Allerdings sind dafür Muster für die Prüfungen notwendig. Auch für Flächen- oder Linienkontakte, die

---

<sup>7</sup> Workstation: Prozessor Intel Xeon E5-2687W, 8 x 3.10GHz, 64 GB Arbeitsspeicher, Berechnung auf 4 Kernen

analytisch oder mit der FE-Analyse nicht ohne weiteres berechnet werden können, ist die empirische Ermittlung des Kontaktwiderstandes zielführend.

Der phänomenologische Zusammenhang zwischen dem Kontaktwiderstand und der Kontaktkraft kann allgemein mit folgender Beziehung beschrieben werden, die von verschiedenen Autoren verwendet wird [Bab54 S.325, PBL81 S.603, Ben02, BKM07 S.176]:

$$R_K = K_C \cdot F_K^{-n} \quad (2.16)$$

Der Faktor  $K_C$  ist von dem Kontaktwerkstoff, der Bearbeitungsart und dem Zustand der Kontaktfläche abhängig [PBL81 S.603]. Der Exponent  $n$  ist von der Anzahl der Berührungsstellen bzw. der Kontaktkraft, der Kontaktform und den Fremdschichten abhängig [Bab54 S.326, ViKe02 S.37].

Um den Einfluss des spezifischen elektrischen Widerstandes der Kontaktprobe  $\rho$  darzustellen, kann Gleichung (2.16) erweitert werden [ESE74 S.146, ViKe02 S.37]:

$$R_K = k_C \cdot \rho \cdot F_k^{-n} \quad (2.17)$$

Die Potenzfunktion beschreibt den Zusammenhang zwischen Kontaktwiderstand und Kontaktkraft, deren Parameter anhand von gemessenen Kurven bestimmt werden können. Die Gleichung gilt sowohl für geringe, als auch für hohe Kontaktkräfte. Für fremdschichtfreie, rein elastische Verformung liegt der Exponent theoretisch bei  $n = 1/3$  und für rein plastische Verformung bei  $n = 1/2$  [Hol67 S.43]. Daher können die Faktoren und die Exponenten für bestimmte Kraftbereiche ermittelt werden, um die Genauigkeit zu erhöhen.

Im Fall der gemessenen Abhängigkeit zwischen Kontaktwiderstand und Kontaktkraft von Abbildung 2-18 sind die Parameter  $K_C = 362 \mu\Omega\text{N}^n$  und  $n = 0,497$ . Damit dominiert laut Auswertung des Exponenten  $n$  der plastische Anteil aufgrund der hohen Kontaktkraft (bis 20 N), was auch durch die Annäherung mit dem elastisch-ideal-plastischen Materialmodell ersichtlich ist. Dass laut [ViKe02 S.38] ein Exponent  $n < 0,9$  auf eine Bedeckung der Kontakt-

oberfläche durch Fremdschichten geschlossen werden kann, kann anhand der durchgeführten Messungen nicht bestätigt werden. Die untersuchten Kontakte besitzen eine Goldoberfläche, die vor der Kontaktierung gereinigt wurde.

Eine Abwandlung von Gleichung (2.16) ist die Berechnung des Kontaktwiderstandes über die sogenannte Kontakthärte. Die Kontakthärte ist nicht identisch mit der Vickers- oder Brinellhärte [ESE74 S.133, PBL81 S.601, BIM92 S.26]. Für die Berechnung der Kontaktflächen wird von [Hil56 S.48] zunächst die Brinell-Härte verwendet. Es zeigte sich aber, dass die damit berechneten Flächen durchweg kleiner sind als die wirkliche unter dem Mikroskop gemessene. Der Grund ist laut [Hil56 S.48] wahrscheinlich die Verschiedenheit der Verhältnisse bei der Härtemessung und dem Zusammendrücken der Kontaktelemente.

Die Kontakthärte  $H_K$  wird nicht aus mechanischen Experimenten ermittelt, sondern aus dem gemessenen Kontaktwiderstand berechnet.

Wird von einer plastisch verformten Kontaktfläche ausgegangen, so gilt für die Kontakthärte:

$$H_K = \frac{F_K}{A_s} \quad (2.18)$$

Mit der scheinbaren Berührungsfläche einer kreisförmigen Kontaktfläche:

$$A_s = a_{pl}^2 \cdot \pi \quad (2.19)$$

Durch Umformen ergibt sich mechanisch der Radius der plastisch verformten Kontaktfläche in Abhängigkeit von der Kontakthärte [Rie00 S.10]:

$$a_{pl} = \sqrt{\frac{F_K}{\pi \cdot H_K}} \quad (2.20)$$

Mit dem Ellipsoid-Modell nach Holm (Gleichung (2.13)) kann unter Annahme eines idealen Kontaktes und bei bekannter Kontakthärte der Engwiderstand ermittelt werden:

$$R_C = \frac{\sqrt{\pi \cdot H_K}}{2 \cdot \lambda_{el}} \cdot F_K^{-0,5} \quad (2.21)$$

Anhand der Gleichung (2.21) ist erkennbar, dass bei der Berechnung über die Kontakthärte der Parameter  $n$  aus Gleichung (2.16) stets 0,5 ist. Die Kontakthärte lässt sich aus dem gemessenen Kontaktwiderstand ermitteln, wenn davon ausgegangen wird, dass sich eine Kontaktfläche mit dem Holm'schen Radius ergibt. Aus Abbildung 2-18 ergibt sich mit einer elektrischen Leitfähigkeit des Kontaktes von 56 MS/m, bei einer Kontaktkraft von 10 N und einem Kontaktwiderstand von 115  $\mu\Omega$  eine Kontakthärte von 528 N/mm<sup>2</sup>. Sobald der Exponent  $n$  unterschiedlich von 0,5 ist, wird die Kontakthärte abhängig von der Kontaktkraft.

Um anhand von Messwerten die Abhängigkeit zwischen Kontaktwiderstand und Kontaktkraft zu approximieren, bietet sich daher Gleichung (2.17) an.

## 2.5 Dimensionierung des Bahnbereiches von Steckverbinderkontakten

Als Bahnbereich wird in dieser Arbeit der Bereich von Steckverbinderkontakten bezeichnet, dem keine elektrische Kontaktstelle zugeordnet ist. Der Bahnwiderstand (Abbildung 2-6) wird durch den Querschnitt und die elektrische Leitfähigkeit des Teilstücks bestimmt. Um den elektrisch leitfähigen Querschnitt von Steckverbinderkontakten festzulegen, gibt es keine eindeutigen Dimensionierungsregeln.

Bei der Skalierung von Steckverbinderkontakten darf keine konstante Stromdichte angenommen werden. Für Leitungen mit verschiedenen Querschnitten und einem Nennstrom nach Anhang A5 Tabelle 6-15 wurde in Abbildung 2-20 die resultierende Stromdichte und das Verhältnis von Querschnitt zu Umfang der Leitung berechnet. Kleinere Leitungsquerschnitte können aufgrund des höheren konvektiven Wärmeübergangs und aufgrund der im Verhältnis zum Querschnitt größeren Oberfläche eine höhere spezifische Verlustleistung abgeben als große Leitungsquerschnitte. Dadurch ist die Stromdichte bei kleinen Leitungsquerschnitten höher als bei großen.

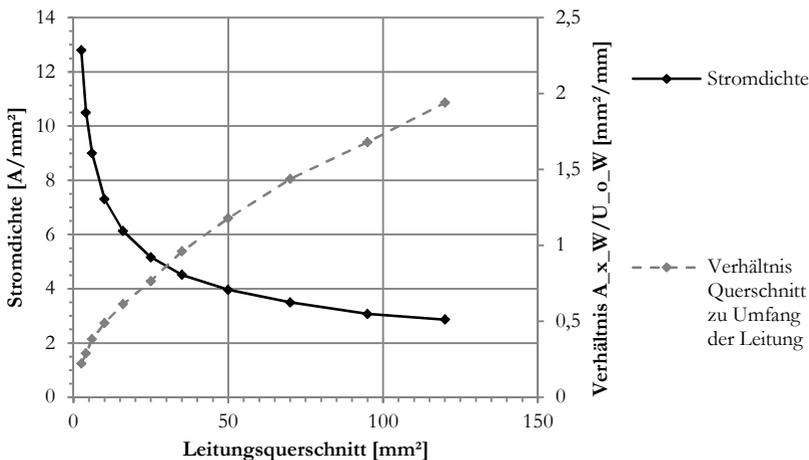


Abbildung 2-20: Änderung der Stromdichte mit dem Leiterquerschnitt für Nennstrom nach DIN VDE 0298-4 bei 30 °C Umgebungstemperatur (Anhang A5 Tabelle 6-15)

Um den notwendigen Querschnitt des Bahnbereiches von Steckverbinderkontakten zu ermitteln, können verschiedene Vereinfachungen gewählt werden, welche sich auf den Querschnitt des angeschlossenen Leiters beziehen:

Der Bahnbereich des Steckverbinderkontaktes kann so dimensioniert werden, dass er den gleichen Querschnitt hat wie die angeschlossene Leitung. Für Steckverbinderkontakte mit einer elektrischen Leitfähigkeit, die in der Größenordnung der elektrischen Leitfähigkeit der Leitung liegt, ergeben sich dadurch vergleichbare spezifische Verlustleistungen in beiden Bauelementen.

Wenn sich die elektrische Leitfähigkeit von Steckverbinderkontakt und Leitung stark unterscheiden, wird bei gleichem Querschnitt eine unterschiedliche spezifische Verlustleistung umgesetzt. Für unterschiedliche elektrische Leitfähigkeiten kann der notwendige Querschnitt für ein widerstandsgleiches Teilstück berechnet werden. In [Kam09 S.678] wurde dies für Leiter mit unterschiedlichen Werkstoffen durchgeführt (Anhang A3 Tabelle 6-12).

Zusätzlich zu der angepassten Verlustleistung kann auch der notwendige Querschnitt berechnet werden, damit sich zwei Leiter mit unterschiedlicher elektrischer Leitfähigkeit in gleichem Maße erwärmen. Für die Berechnung wird der sich ändernde Durchmesser bzw. die vergrößerte Oberfläche berücksichtigt. Für zylindrische Leiter ohne Isolierung kann das Verhältnis der notwendigen Querschnitte für eine gleiche Erwärmung berechnet werden (Anhang A3 Tabelle 6-13). Die geometrieabhängige Änderung des Wärmeübergangskoeffizienten wird nicht berücksichtigt.

Um im Steckverbinderkontakt die zusätzlichen Verlustleistungen durch die Kontaktwiderstände zu kompensieren, sind bei Steckverbindern für die Leistungsübertragung auch Querschnitte vorstellbar, die bei gleicher elektrischer Leitfähigkeit ein Vielfaches der angeschlossenen Leitung betragen.

## 2.6 Vereinfachung des Leiteranschlussbereiches

Im Leiteranschlussbereich zwischen dem Leiter und Steckverbinderkontakt (Abbildung 2-1) liegt typischerweise ein Flächen- oder Linienkontakt vor. Dieser kann als permanente stoff-, kraft- oder formschlüssige Kontaktstelle (z.B. durch Lötten, Schweißen, Crimpen) oder als bedingt lösbare Kontaktstelle (z.B. durch Schraubanschluss oder Federkraftanschluss) ausgeführt werden. Aufgrund der verschiedenen Leiteranschlusssysteme kann der Leiteranschlussbereich sehr unterschiedlich gestaltet sein. Zudem kann auch der Leiteraufbau stark variieren.

Mechanischen Eigenschaften wie das Crimpverhalten, lassen sich durch Simulation gut vorhersagen [MOK96, OTH06, ZCC08, SHB11]. Für die Stromtragfähigkeit sind die elektrischen Eigenschaften besonders wichtig, welche allerdings aufgrund des Flächenkontaktes schwieriger zu berechnen sind.

Für die Vorhersage der Erwärmung muss der absolute Wert des Leiteranschlusswiderstandes ermittelt werden. Ziel ist eine überschlägige Berechnung des Leiteranschlusswiderstandes für verschiedene Leitungsquerschnitte.

Um einen skalierbaren Leiteranschlusswiderstand für die Grobgestaltung zu ermitteln, können abhängig von dem Abstraktionsgrad unterschiedliche Vereinfachungen angenommen werden:

Im einfachsten Fall kann der Kontaktwiderstand vernachlässigt werden und eine ideale Kontaktstelle angenommen werden.

Um bei unterschiedlichen Basismaterialien von Leiter und Steckverbinderkontakt den Teilwiderstand des Leiteranschlussbereiches zu berücksichtigen, kann eine Mischungsregel angewendet werden:

$$\lambda_{el_T} = \lambda_{el_P} \cdot \frac{A_{x_P}}{A_{x_P} + A_{x_W}} + \lambda_{el_W} \cdot \frac{A_{x_W}}{A_{x_P} + A_{x_W}} \quad (2.22)$$

Aufgrund der Kontaktstelle haben reale Anschlussstellen immer einen erhöhten elektrischen Widerstand, der speziell bei Steckverbindern für die Leistungsübertragung mit berücksichtigt werden muss. In dieser Arbeit wird zur Bewertung des Leiteranschlusswiderstandes der sogenannte Gütefaktor oder  $k$ -Wert verwendet.

Der Gütefaktor  $k$  stammt von der Bewertung des Widerstandes von Stromschieneverbindungen [Ber96 S.4, Böh05]. Mit ihm kann der Widerstand von Verbindungen mit unterschiedlichen Leiterabmessungen verglichen werden. Der Gütefaktor stellt das Verhältnis zwischen Widerstand der Anschlussstelle  $R_T$  zu dem Widerstand  $R_W$  eines Leiterstücks mit gleicher Länge dar:

$$k = \frac{R_T}{R_W} \quad (2.23)$$

Dies ist in Abbildung 2-21 dargestellt.

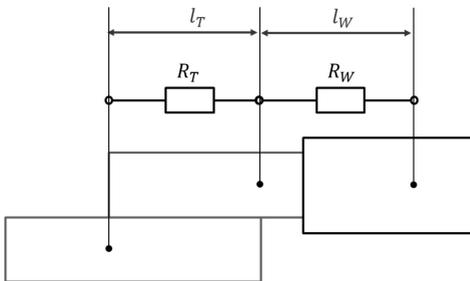


Abbildung 2-21: Bestimmung des Gütefaktors

Die Crimptechnik ist die am weitesten verbreitete Leiteranschlusstechnik [ZVE15 S.16]. Da sie sich besonders gut bei runden Steckverbinderkontakten anwenden lässt, wird sie im Folgenden beispielhaft behandelt. Aus einschlägigen Normen und internen Untersuchungen lässt sich aus dem maximal zulässigen Widerstand von Crimpverbindungen im Neuzustand ein maximaler Gütefaktor von z.B.  $k = 3$  ermitteln. Die Länge des Crimpbereiches ändert sich mit dem anzuschließenden Leitungsquerschnitt. Geometrisch wird daher angenommen, dass die Länge des Crimpbereiches das Sechsfache des Radius der angeschlossenen Leitung beträgt. In Abbildung 2-22 ist der Leiteranschlusswiderstand für einen Gütefaktor von  $k = 3$  als oberen Grenzwert und für einen Gütefaktor von  $k = 1$  als optimalen Zustand dargestellt.

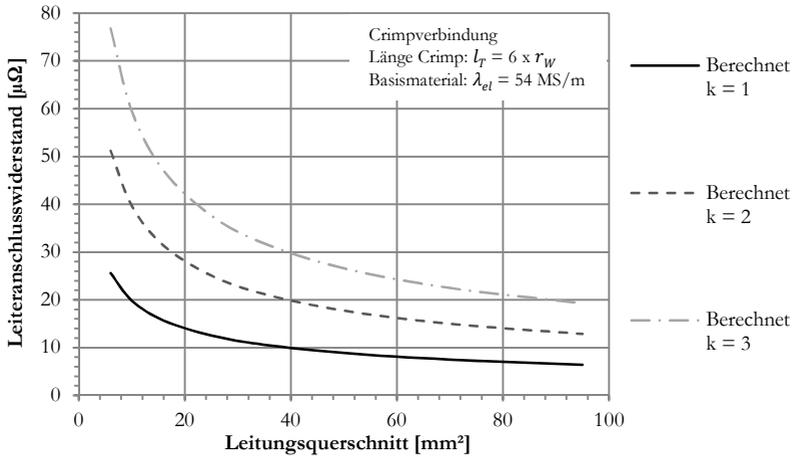


Abbildung 2-22: Abhängigkeit Leiteranschlusswiderstand von dem Leitungsquerschnitt berechnet nach Gleichung (2.23)

Für eine genauere Bestimmung des Leiteranschlusswiderstandes sind allerdings empirische Messungen an dem Leiteranschlussssystem empfehlenswert. Für Schraubenverbindungen kann die Abhängigkeit zwischen Kontaktwiderstand und Kontaktkraft empirisch ermittelt werden, um sie mit Gleichung (2.16) zu approximieren. Bei bekannter Klemmkraft der Schraubenverbindung kann dann der Kontaktwiderstand für den Anschlussbereich ermittelt werden [PWS02a].

In diesem Kapitel wurden wichtige Grundlagen und eine Auswahl von Modellen und Randbedingungen vorgestellt, mit denen sich Teilbereiche von Steckverbinderkontakten berechnen lassen. Im folgenden Kapitel werden die Modelle erweitert und gekoppelt, um ein gesamtheitliches Modell zur analytischen Berechnung der Erwärmung von Steckverbinderkontakten zu entwickeln.

### 3 Thermische Modellbildung, Berechnung und Verifikation

Um die Erwärmung von Steckverbinderkontakten mit analytischen Modellen berechnen zu können, wird zunächst die Systemstruktur des Steckverbinderkontaktes durch Modelle approximiert. Nach der Modellbildung werden die analytischen Berechnungen anhand von Messungen und Simulationen verifiziert. Die verifizierten Modelle können schließlich verwendet werden, um Eigenschaften von Steckverbinderkontakten zu berechnen. In Kapitel 4 werden sie dann zu parametrisierten Modellen umgeformt, um weitere Zusammenhänge an Steckverbinderkontakten zu beschreiben und eine systematische Auslegung abzuleiten.

Für die Berechnung der Erwärmung eines Steckverbinderkontaktes muss das Gesamtsystem betrachtet werden. Zweckmäßig wird der Steckverbinderkontakt in folgende Teilbereiche unterteilt (Abbildung 2-1):

- Leitung
- Leiteranschlussbereich
- Bahnbereich des Steckverbinderkontaktes
- Kontaktfedern / Kontaktstift
- Kontaktstelle

Diese Bereiche unterscheiden sich sowohl durch verschiedene Geometrien, als auch durch verschiedene Werkstoffe und Wärmeübergänge.

In Abbildung 3-1 ist der Temperaturverlauf entlang eines Steckverbinderkontaktes und der angeschlossenen Leitung schematisch dargestellt. In dieser Darstellung wird davon ausgegangen, dass die höchste Temperatur in der Kontaktstelle des Steckverbinderkontaktes zu finden ist und dass die angeschlossene Leitung als Kühlung für den Steckverbinder dient. Um die maximale Temperatur des Systems zu berechnen, müssen die Temperaturen an den Teilbereichen ermittelt werden.

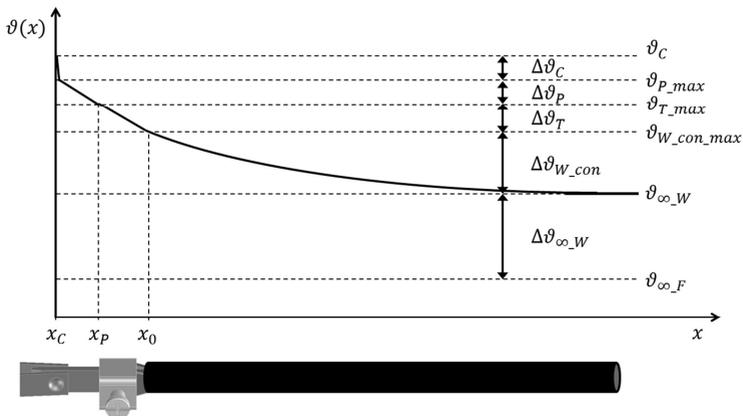


Abbildung 3-1: Temperaturverlauf des Gesamtsystems Steckverbinderkontakt

Ausgangspunkt ist stets die Umgebungstemperatur  $\vartheta_{\infty\_F}$ , in der das System betrieben wird. Bei Stromfluss kommt es zu einer Erwärmung im Inneren der Leitung  $\Delta\vartheta_{\infty\_W}$ . Durch einen Steckverbinder kommt es typischerweise zu einer Temperaturdifferenz  $\Delta\vartheta_{W\_con}$  zwischen Steckverbinderkontakt und Leitung, sodass die Leitung durch den Steckverbinder zusätzlich erwärmt wird und am Leiteranschluss die maximale Temperatur der Leitung  $\vartheta_{W\_con\_max}$  auftritt. Am Leiteranschlussbereich kommt es zu einer Temperaturdifferenz  $\Delta\vartheta_T$ , an dem Kontaktstift zu einer Temperaturdifferenz  $\Delta\vartheta_p$  und in der Kontaktstelle zu einer Temperaturdifferenz  $\Delta\vartheta_c$ .

### 3.1 Thermische Modelle zur Auslegung von Steckverbinderkontakten

Die Erwärmung von elektrischen Bauelementen wird durch Wärmeerzeugung in Form von Joule'scher Wärme und Wärmeabfuhr in Form von Wärmekonvektion, Wärmestrahlung und Wärmeleitung bestimmt. Um das thermisch-elektrische Verhalten von Steckverbinderkontakten zu berechnen, werden verschiedene Modelle miteinander gekoppelt, die aus der einschlägigen Literatur bekannt sind [Mic61, Mer87, Wut91, PoKo09, Hol10, MaNi11].

Durch die Berechnung der Erwärmung wird die Stromtragfähigkeit von Steckverbinderkontakten ermittelt. Es wird nur der stationäre Zustand betrachtet. Auf das transiente Verhalten wird nicht eingegangen.

#### 3.1.1 Analytischer Ansatz zur Berechnung der Erwärmung

Der analytische Ansatz zur Berechnung der Erwärmung eines Körpers beruht auf dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik (Energieerhaltung). Vereinfacht wird zunächst die Leistungsbilanz an einem differentiellen Volumenelement betrachtet (siehe Abbildung 3-2) [PBL81 S.778].

In dem Volumenelement der Länge  $dx$  wird eine Leistung  $P_b$  erzeugt und die Wärme  $\dot{Q}_{cp}$  gespeichert. An der Fläche  $A_x$  fließt, z.B. durch die Verlustleistung des Engwiderstandes einer Kontaktstelle, ein Wärmestrom aufgrund von Wärmeleitung  $d\dot{Q}_{cnd\_in}$  in das System hinein und an der Stelle  $A_{x+dx}$  fließt ein Wärmestrom aufgrund von Wärmeleitung  $d\dot{Q}_{cnd\_out}$  aus dem System heraus. Über die Oberfläche  $A_o$  bzw. den Umfang  $U$  kann das Volumenelement einen Wärmestrom  $d\dot{Q}_{conv}$  durch Wärmekonvektion und einen Wärmestrom  $d\dot{Q}_{rad}$  durch Wärmestrahlung an die Umgebung abgeben. Bei dieser Betrachtung werden die verschiedenen Mechanismen der Wärmeübertragung (Wärmeleitung, Wärmekonvektion und Wärmestrahlung) berücksichtigt.

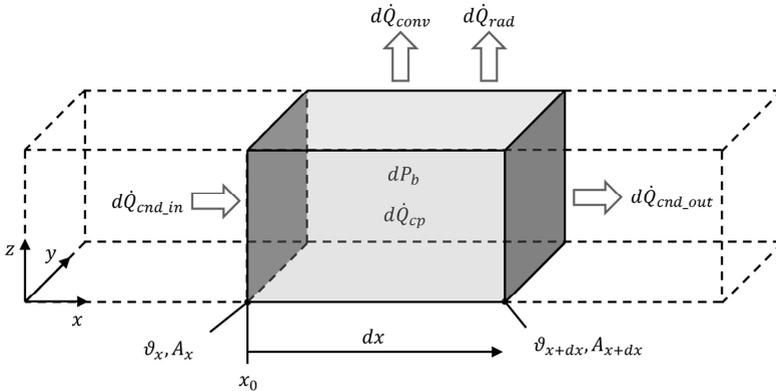


Abbildung 3-2: Leistungsbilanz eines Volumenelementes

Die einzelnen Wärmeströme sind im Anhang A3 Tabelle 6-8 dargestellt. Mit ihnen lässt sich die Leistungsbilanz an dem Volumenelement bilden:

$$dP_b - d\dot{Q}_{cp} + d\dot{Q}_{cnd,in} - d\dot{Q}_{cnd,out} - d\dot{Q}_{conv,rad} = 0 \quad (3.1)$$

Werden die Wärmeströme eingesetzt, so ergibt sich eine Differenzialgleichung zweiter Ordnung:

$$\begin{aligned} \frac{I^2}{\lambda_{el} \cdot A_x} \cdot dx - A_x \cdot \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} \cdot dx - \lambda_{th} \cdot A_x \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \Big|_x + \lambda_{th} \cdot A_{x+dx} \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \Big|_{x+dx} + \lambda_{th} \cdot A_{x+dx} \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} \cdot dx - h_{conv,rad} \cdot U \cdot \vartheta(x) \cdot dx + h_{conv,rad} \cdot U \cdot \vartheta_{\infty,F} \cdot dx = 0 \end{aligned} \quad (3.2)$$

Für verschiedene Spezialfälle lassen sich aus der Leistungsbilanz analytische Lösungen finden, die im Rahmen dieser Arbeit verwendet werden. Weitere Spezialfälle für den stationären oder instationären Zustand sind z.B. in [PBL81 S.777] aufgezeigt. Im Folgenden wird zunächst auf die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten  $h_{conv,rad}$  eingegangen.

### 3.1.2 Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten

Die Intensität des Wärmeübergangs an den Grenzflächen wird durch die Wärmeübergangskoeffizienten beschrieben. Mit ihnen kann die Wärmemenge berechnet werden, welche über die Oberfläche der Bauelemente abgegeben wird. Für die Berechnung und Optimierung der thermischen Eigenschaften von Steckverbinderkontakten sollten die einzelnen Wärmeabfuhrmechanismen separat betrachtet werden.

#### 3.1.2.1 Wärmeübergangskoeffizient für Wärmekonvektion

Der durch Wärmekonvektion übertragene Wärmestrom  $\dot{Q}_{conv}$  wird durch das Newton'sche Abkühlungsgesetz beschrieben [MaNi11 S.20]:

$$\dot{Q}_{conv} = h_{conv} \cdot A_o \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_{\infty_F}) \quad (3.3)$$

Um den Wärmestrom zu berechnen, muss der Wärmeübergangskoeffizient für Wärmekonvektion  $h_{conv}$  ermittelt werden. Die Wärmekonvektion (Wärmeströmung) kennzeichnet einen massegebundenen Wärmeenergietransport in einem strömenden Fluid [MaNi11 S.20]. Je nach Antriebsart für die Strömung wird zwischen erzwungener Wärmekonvektion und natürlicher (freier) Wärmekonvektion unterschieden [MaNi11 S.20]. Bei der erzwungenen Wärmekonvektion, die bei Steckverbindern nur selten anzutreffen ist, wird die Strömung von außen aufgebracht. Bei der natürlichen Wärmekonvektion entsteht die Strömung aufgrund von Dichteunterschieden, die bei der Erwärmung des Fluids auftreten [Ver06 S.1, MaNi11 S.185].

Der Wärmeübergangskoeffizient für Wärmekonvektion ist keine Materialeigenschaft, sondern von verschiedenen Einflussparametern abhängig [StLö72, MaNi11 S.185]. Die wesentlichen Parameter sind in Abbildung 3-3 dargestellt.

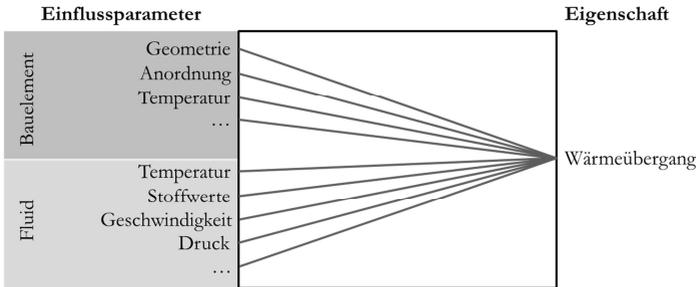


Abbildung 3-3: Einflussparameter auf den konvektiven Wärmeübergang

Zur Ermittlung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten gibt es verschiedene Ansätze mit unterschiedlichem Abstraktionsgrad:

Literaturwerte

Empirisch ermittelte Beziehungen und dimensionslose Kennzahlen

CFD-Simulation

Experimentelle Ermittlung

Für den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten werden in der Literatur verschiedene Werte angegeben. Diese variieren laut [Bar03 S.51] je nach verwendeter Literaturquelle um einen Faktor bis zu drei. Diese großen Abweichungen treten auf, wenn konvektive Wärmeübergangskoeffizienten mit unterschiedlichen Geometrien, Anordnungen und Temperaturen verglichen werden. Um Bauelemente grenzwertig auslegen zu können, sollte daher für den spezifischen Anwendungsfall der entsprechende Wärmeübergangskoeffizient abhängig von der Geometrie und der Temperatur des Bauelements separat berechnet werden.

Nicht einmal für die laminare Strömung ist es gelungen, die Wärmeübergangskoeffizienten analytisch herzuleiten [BöWe11 S.122]. Für Grundgeometrien gelingt eine näherungsweise Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten für Wärme konvektion mit empirischen Korrelationen. Für technische Anwendungen lässt sich dadurch eine meist ausreichende Genauigkeit erreichen [MaNi11 S.185]. Diese liegt allerdings nur bei etwa 20 % [Kra00 S.233].

Die Berechnung erfolgt unter Verwendung von empirisch ermittelten Beziehungen und dimensionslosen Kennzahlen, bei denen sowohl geometrische Parameter, als auch Stoffwerte berücksichtigt werden. Diese sind im Anhang A3 Tabelle 6-9 dargestellt. Der Wärmeübergangskoeffizient wird mit Hilfe der Nußelt-Zahl  $Nu$  berechnet. Die Nußelt-Zahl ist eine dimensionslose Kennzahl und gibt das Verhältnis zwischen Wärmestrom infolge Wärmekonvektion zu dem Wärmestrom infolge Wärmeleitung an<sup>8</sup> [PoKo09 S.221, MaNi11 S.186]:

$$Nu := \frac{h_{conv} \cdot l_{char}}{\lambda_{th\_F}} \quad (3.4)$$

Ist die Nußelt-Zahl bekannt, so lässt sich daraus der Wärmeübergangskoeffizient berechnen:

$$h_{conv} = \frac{Nu \cdot \lambda_{th\_F}}{l_{char}} \quad (3.5)$$

Für die Berechnung der Nußelt-Zahl gibt es verschiedene Ansätze. Die Beziehung lässt sich abhängig von der Grashof-Zahl  $Gr$  und der Prandtl-Zahl  $Pr$  (Anhang A3 Tabelle 6-9) folgendermaßen angeben [StLö72 S.26]:

$$Nu = c_1 \cdot (Gr \cdot Pr)^{n_1} \quad (3.6)$$

In [PBL81 S.772] bzw. [Böh05 S.84] sind die Koeffizienten  $c_1$  und  $n_1$  aus Gleichung (3.6) empirisch ermittelt worden, wodurch die Nußelt-Zahl für verschiedene Anordnungen und Geometrien von Stromleitern bestimmt werden kann [StLö72, Böh05]. Die Werte wurden in [StLö72] durch Experimente an Schaltanlagen ermittelt. Allerdings weichen die Werte für Bauelemente von Schaltgeräten teilweise wesentlich von Grundanordnungen (z.B. Platten, Zylinder) ab, was auf erhöhte Turbulenz infolge der äußeren Gestalt und die gegenseitige Beeinflussung der Anlagenteile zurückgeführt wird [StLö72 S.84].

---

<sup>8</sup> Die Nußelt-Zahl setzt auch die charakteristische Länge eines Körpers in Relation zur thermischen Grenzschichtdicke [MaNi11].

Bei der Verwendung der Zahlenwerte ist stets die Gültigkeit in dem untersuchten Bereich zu berücksichtigen [Böh05 S.82]. Vergleichbare Untersuchungen zu Steckverbinderkontakten gibt es nicht.

Für verschiedene geometrische Grundanordnungen findet die Berechnung der Nußelt-Zahl nach Churchill und Chu [ChCh75] vielfache Anwendung (z.B. im VDI-Wärmeatlas [Ver06]). Die wichtigsten Anordnungen wie z.B. vertikale Fläche, horizontale Fläche und horizontaler Zylinder sind im Anhang A3 in Tabelle 6-10 und Tabelle 6-11 dargestellt.

Der mittlere Wärmeübergangskoeffizient ist sowohl geometrie- als auch temperaturabhängig. Abbildung 3-4 zeigt den Vergleich von verschiedenen Modellen. Es ist gut zu erkennen, dass die Werte nach dem VDI-Wärmeatlas [Ver06] und Böhme [Böh05] sowohl für die vertikale Fläche, als auch für den horizontalen Zylinder nahe beieinander liegen. Allerdings sind die Werte nach Böhme tendenziell etwas höher, was auf die erhöhten Turbulenzen in Schaltanlagen zurückzuführen ist. In dem für Steckverbinderkontakte und Leitungen interessanten Bereiche kleiner charakteristischer Längen (grau hinterlegt) endet der Gültigkeitsbereich nach Böhme [Böh05].

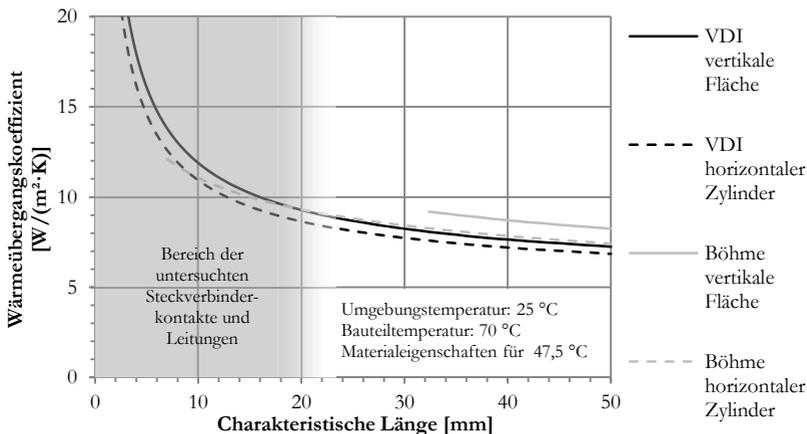


Abbildung 3-4: Gegenüberstellung der Wärmeübergangskoeffizienten berechnet nach [ChCh75, Böh05, Ver06]

In [BBS14c] wurde der Wärmeübergang von Steckverbinderkontakten untersucht. Dabei zeigte sich eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen Wärmeübergangskoeffizienten und nach dem VDI-Wärmeatlas [Ver06] berechneten Werten. Allerdings muss dazu die Bauteilgeometrie in Teilbereiche aus Grundgeometrien aufgeteilt werden (Abbildung 3-5). Für die Grundgeometrien werden die Wärmeübergangskoeffizienten anschließend separat berechnet [BBS14c].

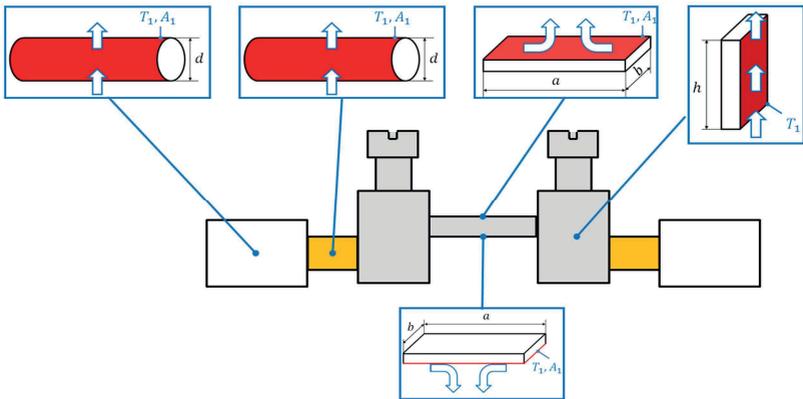


Abbildung 3-5: Aufteilung der Bauteilgeometrie in Teilbereiche aus Grundgeometrien

Neben der analytischen Berechnung kann auch eine CFD-Strömungssimulation (engl.: Computer Fluid Dynamics) zur Ermittlung des Wärmeübergangs durchgeführt werden. Dazu werden im Rahmen einer FE-Analyse die Gleichungen für die Massenerhaltung, Impulserhaltung und Energieerhaltung gelöst, um die Strömung zu berechnen [Lec14 S.10]. Dies bietet sich besonders bei sehr komplexen Bauteilgeometrien oder für die Berechnung innerhalb von Geräten mit gegenseitiger Beeinflussung der Bauelemente an (z.B. Schaltgeräte [Bar03 S.51]). Bei der CFD-Analyse wird der lokale Wärmeübergangskoeffizient berechnet. Durch diese Simulation ist jedoch ein ungleich höherer Aufwand notwendig. Zudem können für natürliche Wärmekonvektion, trotz der aufwendigen Simulation, Abweichungen von bis zu 20 % für den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten und die ermittelte Temperatur auftreten [McG08, AtTe09].

Bei der numerischen Simulation von thermisch-elektrischen Problemen ist es üblich, den Wärmeübergangskoeffizienten separat über empirische Korrelationen zu berechnen [Hau13]. Anschließend wird er als Wärmeübergangskoeffizient in die Simulation eingebunden, ohne eine CFD-Simulation durchzuführen.

Bedeutung haben ebenfalls experimentelle Untersuchungen [Kra00 S.233]. Durch sie kann der Wärmeübergangskoeffizient an spezifischen Bauelementen ermittelt werden. Allerdings können dabei die Wärmeübergänge für Wärme-konvektion, Wärmestrahlung und Wärmeleitung nicht separat identifiziert werden. Mit zusätzlichem Aufwand können Experimente im Vakuum durchgeführt werden, um die Wärmeübergänge zu verifizieren. Dadurch können Wärmeübergangskoeffizienten für Wärmekonvektion und Wärmestrahlung separat ermittelt werden [BBS15b].

### 3.1.2.2 Wärmeübergangskoeffizient für Wärmestrahlung

Die Wärmestrahlung kennzeichnet einen Energietransport durch elektromagnetische Wellen. Alle Körper mit einer Temperatur  $T_1 > 0 \text{ K}$  ( $-273,14 \text{ °C}$ ) emittieren elektromagnetische Wellen bzw. Wärmestrahlung. Im Gegensatz zur Wärmekonvektion tritt Wärmestrahlung auch im Vakuum auf, da kein materieller Träger (z.B. Luft) notwendig ist [Ver06 S.1, MaNi11 S.238].

Der Wärmestrom aufgrund von Wärmestrahlung zwischen zwei parallelen schwarzen<sup>9</sup> Oberflächen von gleicher Größe und unterschiedlicher Temperaturen kann mit dem Stefan-Boltzmann'schen Strahlungsgesetz berechnet werden [Ver06 S.1, MaNi11 S.238]:

$$\dot{Q}_{rad,12} = \sigma \cdot A_O \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (3.7)$$

---

<sup>9</sup> Die Begriffe „schwarzer Strahler“ und „grauer Strahler“ charakterisieren hier nicht die Farbe des Körpers, sondern die physikalische Eigenschaft der Wärmestrahlung

Technische Oberflächen besitzen kein ideales spektrales Emissionsverhalten eines schwarzen Körpers und werden daher als graue Strahler bezeichnet. Für sie wird der relative wellenlängenabhängige Emissionsgrad  $\varepsilon$  als Verhältnis der bei einer bestimmten Temperatur von einer Oberfläche emittierten Wärmestrahlung zu der emittierten Wärmestrahlung eines schwarzen Strahlers gleicher Temperatur, definiert [Ver06 S.3, MaNi11 S.244].

In der Praxis können mit guter Näherung alle elektrischen Nichtleiter und Halbleiter als graue Körper idealisiert werden [MaNi11 S.247]. Demgegenüber weisen elektrische Leiter (Metalle und Metalloxide) eine stark ungleichförmige spektrale Emission auf, die nicht mit dem Modell des grauen Strahlers beschrieben werden kann [MaNi11 S.247]. Für Geräte der Feinwerktechnik und Elektronik ist der Emissionsgrad im üblichen Temperaturbereich etwa konstant, d.h. unabhängig von der Oberflächentemperatur [Kra00 S.235]. Typische Werte für den relativen Emissionsgrad verschiedener Oberflächen sind z.B. in [Ver06 S.1] oder [Kra00 S.235] angegeben. Da die wärmeabstrahlenden Oberflächen zueinander nicht immer gleich angeordnet sind, muss bei der Berechnung die geometrische Ausrichtung der Oberflächen zueinander berücksichtigt werden. Dazu wird das Stefan-Boltzmann'sche Strahlungsgesetz (Gleichung (3.7)) erweitert. Die geometrische Anordnung und die Emissionsverhältnisse zweier Oberflächen werden durch die Strahlungskonstante der Anordnung  $\sigma_{12}$  berücksichtigt [MaNi11 S.252]:

$$\sigma_{12} = \varepsilon_{12} \cdot \sigma = \frac{1}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varphi_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \cdot \frac{A_{O_1}}{A_{O_2}}} \cdot \sigma \quad (3.8)$$

Beispiele für unterschiedliche vereinfachte Anordnungen der Oberflächen zueinander sind z.B. in [Ver06 S.1, MaNi11 S.252] dargestellt.

In dem Fall, dass ein kleiner Körper mit der Fläche  $A_{O_1}$  von einem größeren Körper mit der Fläche  $A_{O_2}$  vollständig umschlossen wird, gilt:

$$\sigma_{12} = \varepsilon_1 \cdot \sigma \quad (3.9)$$

Innerhalb elektrischer Geräte, bei denen geringe Temperaturunterschiede und metallische Oberflächen zu finden sind, ist der Strahlungsanteil für die Wärmeübertragung oftmals vernachlässigbar. Bei Grenztemperaturen und isolierten Gehäusen bzw. Kabeln liegt der Wärmeübergangskoeffizient für Wärmestrahlung in der gleichen Größenordnung wie der für Konvektion. Dies ist in Abbildung 3-6 dargestellt.

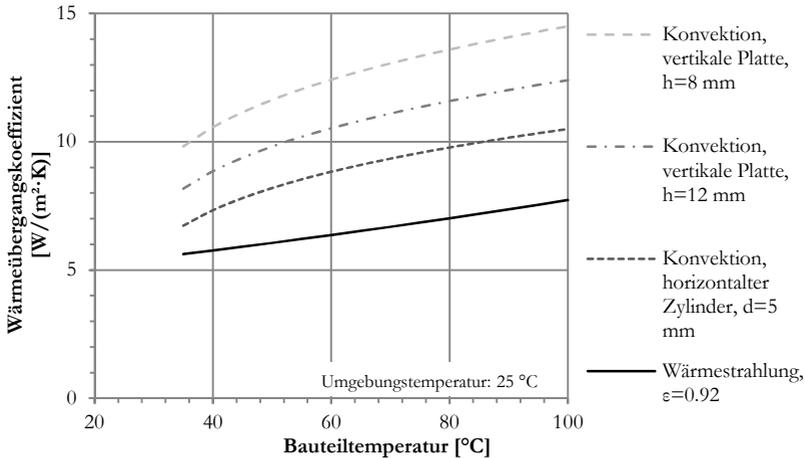


Abbildung 3-6: Temperaturabhängige Wärmeübergangskoeffizienten berechnet nach Anhang A3 Tabelle 6-9 bis Tabelle 6-11 und Gleichung (3.11)

Die Wärmeabfuhr durch Wärmekonvektion und Wärmestrahlung beruht auf verschiedenen physikalischen Phänomenen. Unter folgenden Bedingungen können die Wärmeübergangskoeffizienten für Wärmekonvektion und Wärmestrahlung linear addiert werden [MaNi11 S.22], um sie gemäß dem Newton'schen Abkühlungsgesetz (Gleichung (3.3)) zu berechnen:

Die Wärmeströme durch Wärmekonvektion und durch Wärmestrahlung treten auf der gleichen Oberfläche auf.

Es besteht ein geringer Temperaturunterschied zwischen der Oberflächentemperatur des zweiten Körpers und der Umgebungstemperatur.

Unter diesen Bedingungen kann der Gesamtwärmeübergangskoeffizient ermittelt werden [MaNi11 S.22]:

$$h_{conv\_rad} = h_{conv} + h_{rad} \quad (3.10)$$

Durch Analogiebetrachtung kann der Wärmeübergangskoeffizient für Wärmestrahlung  $h_{rad}$  berechnet werden [MaNi11 S.254]:

$$h_{rad} = \sigma_{12} \cdot (T_1 + T_2) \cdot (T_1^2 + T_2^2) \quad (3.11)$$

## 3.2 Leiterübertemperatur

Wichtig für die Erwärmung eines elektrischen Steckverbinderkontaktes ist die stationäre Leiterübertemperatur der angeschlossenen Leitung  $\vartheta_{\infty_W}$ . Die Temperatur des Leiters bildet die Basis bei der Berechnung der Maximaltemperatur des Steckverbinderkontaktes.

Als thermisch „lange“ Leitung wird in dieser Arbeit eine Leitung definiert, bei der sich in der Mitte der Leitung eine Temperatur einstellt, welche nicht von den Anschlussstellen bzw. von den angeschlossenen Bauelementen beeinflusst wird. Bei einer langen Leitung kommt es in der Mitte des Leiters zu keinem axialen Wärmestrom. Lediglich ein radialer Wärmestrom wird von dem Leiter über die Isolierung zu der Oberfläche der Leitung abgeführt. Um diese Bedingung zu erfüllen, muss die Länge der Leitung ein Vielfaches der thermischen Ortskonstanten  $b$  betragen.

### 3.2.1 Thermische Modellbildung der Leitung

In [KuWa87 S.58, Bar03, Böh05, BBS14c] wird die Temperatur von Leitungen analytisch berechnet. Für die Berechnung wird zur Nachbildung des Leiters und der Isolierung von einem mehrzylindrischen System ausgegangen. Der elektrische Leiter kann als ein Vollzylinder mit innerer Wärmequelle betrachtet werden. Die Isolierung kann als Zylinderschale ohne Wärmequellen vereinfacht werden (Abbildung 3-7).

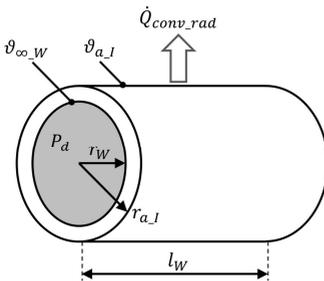


Abbildung 3-7: Modell des Leiters

Um die stationäre Leiterübertemperatur ohne Einfluss des Steckverbinders, d.h. ohne axialen Wärmestrom zu berechnen, können in der Leistungsbilanz aus Gleichung (3.1) folgende Parameter vernachlässigt werden:

$$d\dot{Q}_{cp} = d\dot{Q}_{cnd\_in} = d\dot{Q}_{cnd\_out} = 0 \quad (3.12)$$

Die Leistungsbilanz aus Gleichung (3.1) kann unter dieser Annahme vereinfacht werden:

$$P_b - d\dot{Q}_{conv\_rad} = 0 \quad (3.13)$$

Durch Einsetzen der Wärmeströme ergibt sich die implizite Gleichung:

$$\frac{I^2}{\lambda_{el} \cdot A_x} \cdot dx - h_{conv\_rad} \cdot U \cdot (\vartheta(x) - \vartheta_{\infty\_F}) \cdot dx = 0 \quad (3.14)$$

Daraus lässt sich in expliziter Form die Temperatur eines isotropen Leiters berechnen:

$$\vartheta(x) = \vartheta_{\infty\_W} = \frac{I^2}{\lambda_{el} \cdot A_x \cdot h_{conv\_rad} \cdot U} + \vartheta_{\infty\_F} \quad (3.15)$$

Durch Umformen lässt sich Gleichung (3.15) im Konstruktionsprozess zur überschlägigen Dimensionierung verwenden. So kann z.B. der maximale Strom bei vorgegebener Geometrie und Temperaturdifferenz berechnet werden [PBL81 S.777].

Für eine genauere Berechnung von Leitungen sollte zusätzlich die elektrische Isolierung der Leitung berücksichtigt werden. Die Temperatur des Leiters auf der Innenseite der Isolierung  $\vartheta_{\infty\_W}$  ist durch den zusätzlichen thermischen Widerstand der Isolierung höher als auf der Außenseite. Die Isolierung kann als Zylinderschale ohne Wärmequellen vereinfacht werden. Bei bekanntem Wärmestrom, der durch die Isolierung von innen nach außen tritt, kann die Temperaturdifferenz an der Isolierung  $\Delta\vartheta_i$  durch den Fourier'schen Wärmeleitungssatz bestimmt werden (siehe Anhang A3 Gleichung (6.95)).

Eine gute Übereinstimmung der berechneten und gemessenen Werte kann nur erreicht werden, wenn temperaturabhängige Werkstoffkennwerte und temperaturabhängige Wärmeübergangskoeffizienten verwendet werden [Bar03, BBS14c]. Um diese zu ermitteln, ist eine iterative Berechnung notwendig. Für die Berechnung des temperaturabhängigen elektrischen Widerstandes wird die Temperatur im Inneren des Leiters verwendet. Für die Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten wird die Temperatur auf der Außenseite der Isolierung verwendet.

Bis zu einer Temperatur von 100 °C kann für Kupferwerkstoffe von einer linearen Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes von der Temperatur ausgegangen werden [FrLi09 S.3–5]:

$$R(\vartheta) = R_0 \cdot (1 + \alpha_{el} \cdot \Delta\vartheta) \quad (3.16)$$

Analog zu dem empirisch ermittelten Zusammenhang zwischen Kontaktwiderstand und Kontaktkraft in Gleichung (2.16), kann auch ein Zusammenhang zwischen Erwärmung und Strom dargestellt werden. Die Erwärmung stellt das Verhältnis zwischen erzeugter und abgeführter spezifischer Leistung dar. Dies folgt aus Gleichung (3.15) und ist in Gleichung (3.17) ersichtlich:

$$\Delta\vartheta = \frac{R_w \cdot I^2}{h_{conv\_rad} \cdot A_O} = \frac{P_{zu\_spez}}{P_{ab\_spez}} \quad (3.17)$$

Werden die geometrischen und stofflichen Parameter als Konstante  $C$  zusammengefasst, so würde die Temperatur bei temperaturunabhängigen Materialeigenschaften quadratisch mit dem Strom ansteigen:

$$\Delta\vartheta = C \cdot I^2 \quad (3.18)$$

Die Konstante  $C$  ist allerdings nicht nur von dem Werkstoff und der Geometrie abhängig, sondern auch von der Temperatur und damit von dem Strom:

$$C = \frac{R_w(\vartheta)}{h_{conv\_rad}(\vartheta) \cdot A_0} \quad (3.19)$$

Demzufolge steigt die Temperatur nicht quadratisch mit dem Strom an:

$$\Delta\vartheta = C \cdot I^m \quad (3.20)$$

Die Konstante  $C$  kann experimentell bestimmt werden. Der reale Exponent  $m$  liegt zwischen 1,5 und 1,85 [MIL91, IEC09 S.34]. In dem folgenden Kapitel wird dieses auch durch die Experimente bestätigt.

### 3.2.2 Berechnung und Verifikation der Leiterübertemperatur

Um die berechnete Leiterübertemperatur bei verschiedenen Strömen und Leitungsquerschnitten zu verifizieren, werden Experimente durchgeführt. Der Versuchsaufbau hat einen Einfluss auf die Erwärmung. Um vergleichbare Ergebnisse zu produzieren, wird ein Prüfaufbau in Anlehnung an die DIN EN 60512-5-2 [DIN03a] verwendet. Der verwendete Aufbau ist schematisch in Abbildung 3-8 dargestellt.

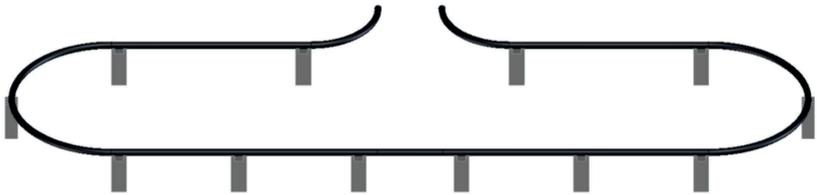


Abbildung 3-8: Prüfaufbau zur Messung der Temperatur an einer Leitung

Die Leitung wird mit 50 mm hohen Distanzstücken aus Kunststoff auf einer lackierten Holzplatte befestigt. Der Abstand zwischen den Distanzstücken beträgt >150 mm. Die Platte besteht aus lackiertem Holz mit einem hohen Emissionsgrad, um Wärmereflexionen zu vermeiden. Des Weiteren ist der Messaufbau mit einer Haube aus Polycarbonat umhüllt, die den Einfluss äußerer Strömungen verhindert. Durch Luftschlitze an den Seiten wird ein Wärmestau im Inneren verhindert. Die maximale Leitertemperatur wird mit Thermo-

elementen des Typs K gemessen, welche unter der Isolierung eingeführt sind (Abbildung 3-9). Die Oberflächentemperatur der Isolierung wird mit Thermoelementen gemessen, welche mit dünnem Klebeband und Wärmeleitpaste auf der Oberfläche angebracht sind (Abbildung 3-10).

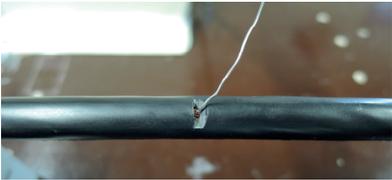


Abbildung 3-9: Messung der Leitertemperatur



Abbildung 3-10: Messung der Oberflächentemperatur

Die berechneten Temperaturen werden durch gemessene Temperaturen validiert. Die in den Experimenten verwendeten Leitungen sind feindrätige Leitungen der Klasse 5 nach DIN EN 60228 [DIN04]. Bei der analytischen Berechnung und bei der FE-Analyse werden die Leitungslitzen typischerweise nicht einzeln betrachtet. Dies würde den Modellierungs- und Berechnungsaufwand unnötig erhöhen. Deshalb wird der Leiter als ein massiver isotroper Zylinder vereinfacht. Um bei gegebenem Leitungsquerschnitt die korrekte Verlustleistung zu berechnen, müssen entweder die elektrischen oder die geometrischen Parameter des zu berechnenden Zylinders angepasst werden.

Die elektrische Leitfähigkeit muss angepasst werden, wenn für die Berechnung der Nennquerschnitt des Leiters verwendet wird. Zur Abschätzung der Verlustleistung von Leitungen wird in [Bau99 S.858] für die elektrische Leitfähigkeit des Leiters bei Raumtemperatur (20 °C) ein Wert von 54 MS/m angegeben. Elektrisch werden Leitungen z.B. nach der Norm DIN EN 60228 [DIN04] über den maximalen Widerstand je Längeneinheit definiert. Unter Berücksichtigung des Nennquerschnittes ergeben sich nach eigenen Berechnungen in dem Bereich von 10 mm<sup>2</sup> bis 120 mm<sup>2</sup> spezifische elektrische Leitfähigkeiten zwischen 53,7 MS/m und 55,2 MS/m. Diese bilden Mindestanforderungen an die Leitungen. Wenn Leitungen mit einer höheren Güte verwendet werden, hat dies eine geringere Verlustleistung und damit eine geringere Erwärmung zur Folge.

Eine weitere Möglichkeit zur Ermittlung der Verlustleistung von Leitungen besteht darin, den geometrischen Querschnitt für die Berechnung anzupassen. Dazu kann die Anzahl der Litzen gezählt werden und der mittlere Querschnitt der Litze gemessen werden. Als Summe der Einzelquerschnitte von den Litzen kann der Gesamtquerschnitt ermittelt werden. Für die Leitungslitzen aus weichgeglühtem Kupferdraht kann als Leiterwerkstoff eine elektrische Leitfähigkeit von  $>58 \text{ MS/m}$  angenommen werden [Mar03 S.28]. Diese Methode ist allerdings speziell bei fein- oder feinstdrähtigen Leitungen aufwendiger und mit Messfehlern behaftet. Zudem werden Effekte durch z.B. Verdrillen nicht berücksichtigt. Für die überschlägige Berechnung ist die erste Variante besser geeignet, bei der die Leitung als isotroper Zylinder mit Nennquerschnitt angenommen wird und die elektrische Leitfähigkeit auf  $54 \text{ MS/m}$  reduziert wird.

Die geometrischen Abmessungen und Werkstoffeigenschaften der Leitungen zur Berechnung der Erwärmung sind im Anhang A5 in Tabelle 6-15 aufgeführt. Die Experimente werden mit Gleichstrom bei unterschiedlichen Stromwerten durchgeführt. In Abbildung 3-11 ist der Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Werten für einen Leitungsquerschnitt von  $35 \text{ mm}^2$  dargestellt.

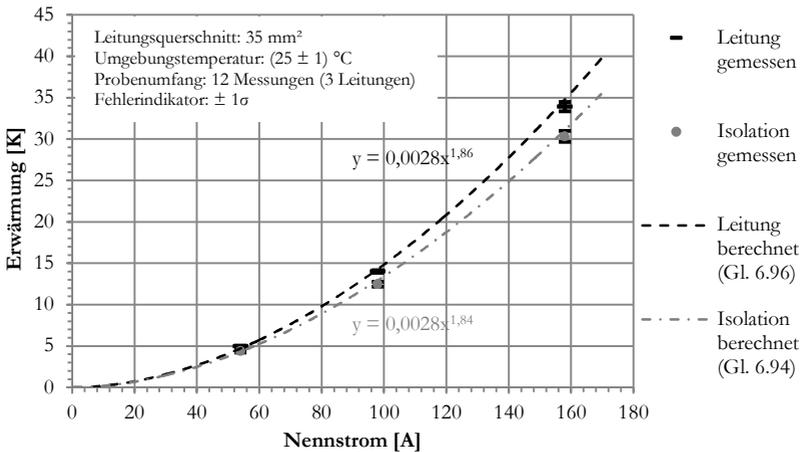


Abbildung 3-11: Erwärmung einer elektrischen Leitung (berechnet nach Anhang A3 Tabelle 6-9, Tabelle 6-10, Tabelle 6-14 und Anhang A5)

Die höhere Temperatur ist jeweils die Temperatur des Leiters auf der Innenseite der Isolierung. Eine niedrigere Temperatur ist auf der Außenseite der Isolierung zu finden. Die stationäre Endtemperatur wird für drei unterschiedliche Stromwerte (54 A, 98 A, 158 A) gemessen. Die Mittelwerte der Temperatur beinhalten 12 Messungen mit drei unterschiedlichen Leitungen aus gleicher Charge.

Der Vergleich zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der berechneten und gemessenen Werte bei diesem Leitungstyp. Für verschiedene Stromstärken beträgt die Abweichung weniger als 1 K ( $< 1\%$ ). Die Übereinstimmung ist sowohl bei verschiedenen Stromstärken, als auch bei dem Vergleich zwischen der Temperatur des Leiters und der Isolierung gegeben. Bei den Messungen tritt eine geringe Streuung der Messwerte auf.

Die in Abbildung 3-11 berechneten Exponenten  $m$  der Stromerwärmungskurve haben Werte von 1,84 bzw. 1,86. Diese Werte passen gut zu den Literaturwerten zwischen 1,5 und 1,85 [MIL91, IEC09 S.34].

Für eine Skalierung von Steckverbinderkontakten ist die Erwärmung verschiedener Leitungsquerschnitte ausschlaggebend. Um die Übereinstimmung bei unterschiedlichen Leitungsquerschnitten zu ermitteln, werden erweiterte Experimente mit Leitungsquerschnitten von 16 mm<sup>2</sup> bis 70 mm<sup>2</sup> durchgeführt. Die maximale stationäre Erwärmung wird für einadrige Leitungen bei Nennstrom nach DIN VDE 0298-4 [DIN13], für eine Umgebungstemperatur von 30 °C und der Verlegeart „frei in Luft“ gemessen bzw. berechnet.

Die berechneten und gemessenen Werte sind in Abbildung 3-12 dargestellt. Mit zunehmendem Leitungsquerschnitt verringert sich die maximale Temperatur, wenn ein Nennstrom nach DIN VDE 0298-4 [DIN13] verwendet wird. Im Gegensatz zu der Leitung mit 35 mm<sup>2</sup> ist bei den weiteren Querschnitten eine größere Abweichung zwischen berechneten und gemessenen Werten ersichtlich. Tendenziell wird eine etwas höhere Temperatur berechnet. Die maximale Abweichung liegt bei 4,1 K bzw. 12 %, womit eine grobe Abschätzung jedoch möglich ist.

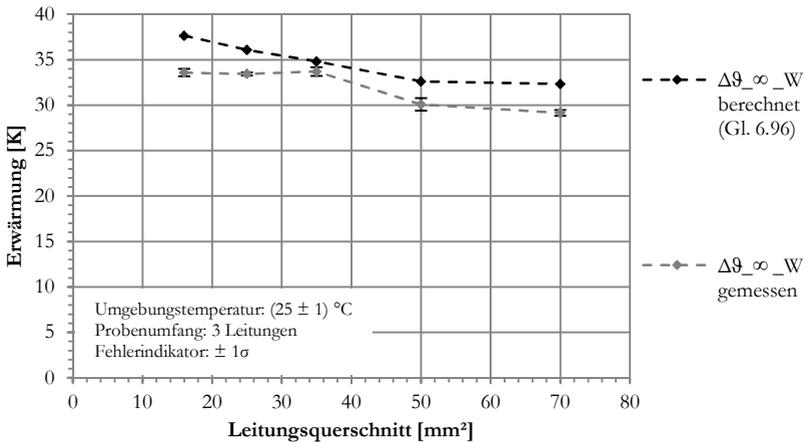


Abbildung 3-12: Maximale Erwärmung des Leiters mit verschiedenen Querschnitten bei Nennstrom nach DIN VDE 0298-4 (berechnet nach Anhang A3 Tabelle 6-9, Tabelle 6-10, Tabelle 6-14 und Anhang A5)

Die Experimente zeigen, dass die Erwärmung von Leitungen mit verschiedenen geometrisch-stofflichen Parametern durch analytische Berechnungen abgeschätzt werden kann. Im Gegensatz zu empirisch ermittelten Tabellen, welche nur für die untersuchte Leitung Gültigkeit besitzen, können auch unbekannte Systeme berechnet und skaliert werden. Ein Beispiel dafür ist die Berücksichtigung verschiedener Leiterwerkstoffe, Isolierungen oder Umgebungstemperaturen.

Zu beachten ist, dass der Nennstrom nach DIN VDE 0298-4 [DIN13] die Leitungen ohne Steckverbinder bereits um 29 K bis 34 K erwärmt. In der UL-Norm [UL 01] wird z.B. als maximale Erwärmung der Bauelemente ein Wert von 30 K angegeben. In diesem Fall erwärmt sich die Leitung aufgrund von Eigenerwärmung über diesen Wert hinaus. Ein Steckverbinder würde eine zusätzliche Erwärmung der Leitung zur Folge haben. Aus diesem Grund muss der Nennstrom der Leitung verringert werden, damit auch mit Steckverbinderkontakt eine Gesamterwärmung von z.B. 30 K nicht überschritten wird.

### 3.3 Temperaturgradient zwischen Steckverbinder und Leitung

In der Leitung kommt es in der Nähe des Steckverbinderkontaktes zu einem axialen Wärmestrom, der die Erwärmung in diesem Teilbereich beeinflusst.

#### 3.3.1 Thermische Modellbildung mit axialem Wärmestrom

Die Leitung wird als ein zylindrisches Volumenelement betrachtet, in welches an einer Seite der axiale Wärmestrom  $\dot{Q}_{cnd\_W}$  zugeführt wird (Abbildung 3-13).

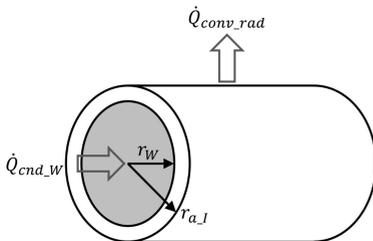


Abbildung 3-13: Modell zur Berechnung der Leitererwärmung aufgrund eines axialen Wärmestroms

In der Leistungsbilanz müssen alle Wärmeströme, inklusive des eingeleiteten und des ausgeleiteten Wärmestroms, berücksichtigt werden (Gleichung (3.1)). Für den stationären Zustand ergibt sich unter der Annahme eines konstanten Querschnitts eine lineare Differenzialgleichung mit konstanten Koeffizienten (Herleitung siehe Anhang A3 Tabelle 6-8):

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} - C \cdot \vartheta(x) = -C \cdot \vartheta_{\infty\_F} - \frac{I^2}{\lambda_{el} \cdot \lambda_{th} \cdot A_x^2} \quad (3.21)$$

mit:

$$C = \frac{h_{conv\_rad} \cdot U}{\lambda_{th} \cdot A_x} \quad (3.22)$$

Die lineare Differenzialgleichung besitzt die Form:

$$y'' + a \cdot y' + b \cdot y = g(x) \quad (3.23)$$

Sie kann daher mit folgendem Ansatz gelöst werden:

$$y = e^{\lambda \cdot x} \quad (3.24)$$

Die allgemeine Lösung der Differenzialgleichung lautet dementsprechend:

$$\vartheta(x) = a_1 \cdot e^{(x \cdot \sqrt{C})} + a_2 \cdot e^{(-x \cdot \sqrt{C})} + \frac{I^2}{C \cdot \lambda_{el} \cdot \lambda_{th} \cdot A_x^2} + \vartheta_{\infty_F} \quad (3.25)$$

Statt der Konstanten  $C$  in Gleichung (3.25) wird die thermische Ortskonstante  $b$  eingeführt:

$$b = \frac{1}{\sqrt{C}} = \sqrt{\frac{\lambda_{th} \cdot A_x}{h_{conv\_rad} \cdot U_0}} \quad (3.26)$$

Unter Verwendung der thermischen Ortskonstanten  $b$  und durch Einsetzen der Konstanten  $C$  aus Gleichung (3.22) ergibt sich:

$$\vartheta(x) = \underbrace{a_1 \cdot e^{\left(\frac{x}{b}\right)} + a_2 \cdot e^{\left(-\frac{x}{b}\right)}}_{\Delta\vartheta_{W\_con}} + \underbrace{\frac{I^2}{h_{conv\_rad} \cdot U \cdot \lambda_{el} \cdot A_x}}_{\Delta\vartheta_{\infty\_W}} + \vartheta_{\infty_F} \quad (3.27)$$

Die ersten zwei Terme in Gleichung (3.27) stellen eine Exponentialfunktion dar. Sie beschreibt den Temperaturverlauf entlang des Volumenelementes als Funktion des Abstandes  $x$  von der Wärmequelle. Dies entspricht der Erwärmung  $\Delta\vartheta_{W\_con}$  in Abbildung 3-1 und wird mit folgender Funktion beschrieben:

$$\Delta\vartheta_{W\_con} = a_1 \cdot e^{\left(\frac{x}{b}\right)} + a_2 \cdot e^{\left(-\frac{x}{b}\right)} \quad (3.28)$$

Der dritte Term ist unabhängig von dem Abstand  $x$ . Er stellt die Erwärmung aufgrund der inneren Verlustleistung dar und ist identisch mit der Erwärmung aus Gleichung (3.15). Anhand der Gleichung ist ersichtlich, dass bei der Berechnung der Temperatur das Superpositionsprinzip gültig ist und die Temperaturen linear addiert werden dürfen.

Für die spezielle Lösung der Differenzialgleichung aus Gleichung (3.28) müssen die beiden unbekanntenen Faktoren  $a_1$  und  $a_2$  aus geeigneten Randbedingungen *RB 1* und *RB 2* ermittelt werden [Hol10 S.46]. Der exponentielle Temperaturverlauf von Gleichung (3.28) und die thermische Ortskonstante  $b$  sind in Abbildung 3-14 dargestellt.

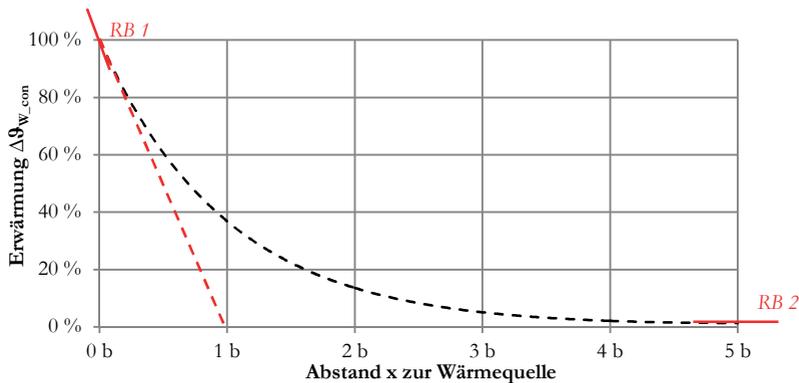


Abbildung 3-14: Exponentieller Temperaturverlauf nach Gleichung (3.28)

### 3.3.2 Thermische Ortskonstante einer Leitung

Für eine Exponentialfunktion beschreibt die thermische Ortskonstante  $b$  den Abstand von der Wärmequelle, bei dem die Temperatur auf  $1/e \approx 36,8\%$  abgesunken ist. Wird eine Leitungslänge von  $5 \cdot b$  angenommen, so liegt im Gegensatz zu einer unendlich langen Leitung theoretisch ein Fehler von  $0,7\%$  vor (Abbildung 3-14).

In Normprüfungen müssen die Leitungen oftmals eine minimale Länge aufweisen, damit die Bauelementtemperatur nicht durch die Anschlussstellen beeinflusst wird [DIN03a S.7]. Die minimale Leitungslänge wird durch die thermische Ortskonstante definiert, welche mit Gleichung (3.26) berechnet werden kann. Anhand der Gleichung ist ersichtlich, dass die thermische Ortskonstante abhängig von dem Leitungsquerschnitt ist. Aufgrund des temperaturabhängigen Wärmeübergangskoeffizienten und der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit ist sie zudem in geringem Maße von der Temperatur bzw. dem Strom abhängig.

In Abbildung 3-15 ist die Ortskonstante für verschiedene Leitungsquerschnitte berechnet worden. Anhand der thermischen Ortskonstante ist ersichtlich, dass mit zunehmendem Leitungsquerschnitt die Länge der Leitung zunehmen muss, um Randeinflüsse zu verhindern. Dies muss sowohl für die Berechnung, als auch für die Messung berücksichtigt werden.

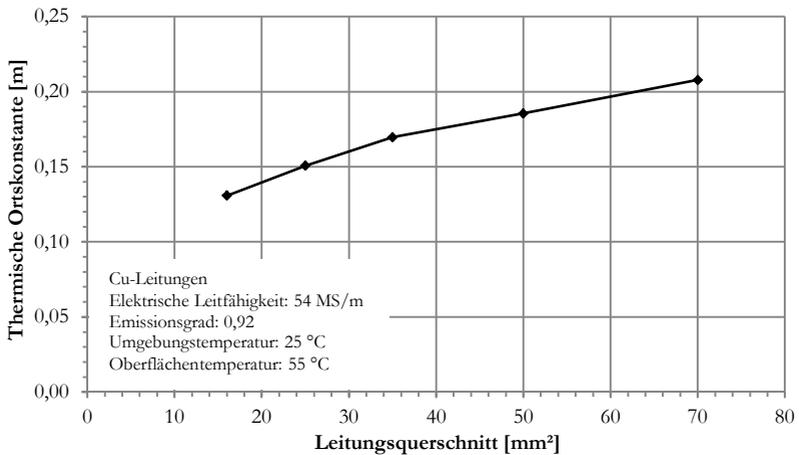


Abbildung 3-15: Berechnete thermische Ortskonstante für Leitungen mit verschiedenen Leitungsquerschnitten (berechnet nach Anhang A3 Tabelle 6-9 und Tabelle 6-10, Anhang A5 und Gleichung (3.26))

### 3.3.3 Thermische Randbedingungen

Um den Temperaturverlauf der Leitung zu berechnen, können verschiedene Randbedingungen gewählt werden. Es können bekannte Temperaturen oder Temperaturgradienten bzw. Wärmeströme vorgegeben werden. Um die beiden unbekannt Faktoren  $a_1$  und  $a_2$  zu bestimmen, werden zwei Randbedingungen 2. Art (Neumann'sche Randbedingung) gewählt. Für diese Randbedingungen wird der Temperaturgradient und damit der Wärmestrom an bestimmten Stellen vorgegeben [MaNi11 S.24] (Abbildung 3-14).

1. Randbedingung: Von einer Wärmequelle an der Fläche  $A_x$  in das Volumenelement eingeleiteter Wärmestrom bzw. Temperaturgradient an der Stirnfläche  $x_0 = 0$ :

$$\left. \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right|_{x=x_0} = M \quad (3.29)$$

2. Randbedingung: Abstand  $x = E$  von der Wärmequelle, bei dem der Temperaturgradient und damit der Wärmestrom abgeklungen ist:

$$\left. \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right|_{x=E} = 0 \quad (3.30)$$

Es wird angenommen, dass der Wärmestrom in einem Abstand von  $x = 5 \cdot b$  abgeklungen ist. Bei diesem Abstand ist theoretisch noch ein Wärmestrom von 0,7 % des eingeleiteten axialen Wärmestroms vorhanden. Dies wird allerdings vernachlässigt.

Mit den beiden Randbedingungen können die beiden Faktoren  $a_1$  und  $a_2$  berechnet werden:

$$a_1 = \frac{M \cdot b}{1 - e^{(2 \frac{E}{b})}} \quad (3.31)$$

$$a_2 = a_1 \cdot e^{(2 \frac{E}{b})} \quad (3.32)$$

Unter der Annahme, dass der Wärmestrom in der Entfernung  $x = 5 \cdot b$  von der Wärmequelle abgeklungen ist, ergibt sich:

$$a_1 = \frac{M \cdot b}{1 - e^{(10)}} \quad (3.33)$$

$$a_2 = a_1 \cdot e^{(10)} \quad (3.34)$$

Der Temperaturgradient  $M$  kann durch den Fourier'schen Wärmeleitungssatz aus Anhang A3 Gleichung (6.54) ermittelt werden, um die Abhängigkeit von dem Wärmestrom zu bekommen:

$$\left. \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right|_{x=0} = - \frac{\dot{Q}_{cnd}}{\lambda_{th} \cdot A_x} = M \quad (3.35)$$

### 3.4 Temperaturdifferenz an kurzen Teilbereichen

Um die Temperaturdifferenz an Teilbereichen zu ermitteln, welche im Gegensatz zu der thermischen Ortskonstante nur sehr kurz sind, wird ebenfalls Gleichung (3.28) verwendet. Allerdings wird der Temperaturverlauf nur auf der Länge des Teilbereiches berücksichtigt. Dies ist in Abbildung 3-16 beispielhaft für den Kontaktstift dargestellt.

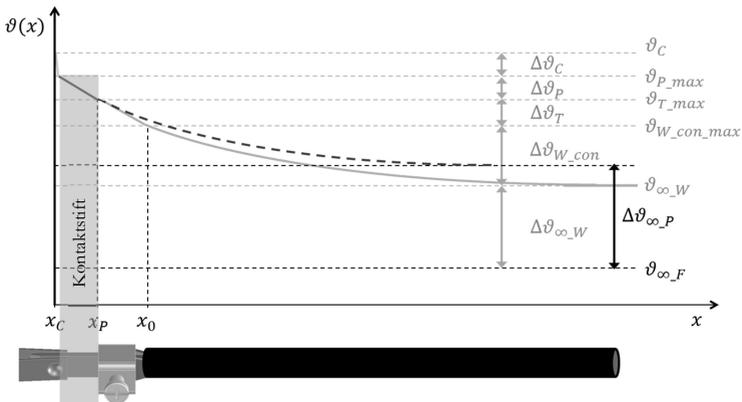


Abbildung 3-16: Schematische Darstellung des theoretischen Temperaturverlaufes eines „langen“ Kontaktstiftes (schwarz dargestellt)

Mit Gleichung (3.28) wird z.B. der Kontaktstift nur als Kühlkörper betrachtet und die inneren Wärmequellen werden nicht berücksichtigt. Innerhalb des Kontaktstiftes kommt es allerdings ebenfalls zu einer Joule'schen Verlustleistung des Bahnwiderstandes. Diese Verlustleistung kann durch Wärmestrahlung und Wärmekonvektion an die Umgebung abgegeben werden, oder durch Wärmeleitung in das nächste Bauelement fließen. Für die Berechnung wird über jedes Bauelement eine Summenbilanz gebildet, bei der alle Wärmeströme berücksichtigt werden. Dadurch wird der aus dem Bauelement fließende Wärmestrom um den Betrag der im Inneren erzeugten Verlustleistung korrigiert. Würde nur der an der Seite zugeführte Wärmestrom berücksichtigt d.h. werden die inneren Verlustleistungen vernachlässigt, so wäre der aus dem Bauelement austretende Wärmestrom zu gering.

### 3.5 Temperaturdifferenz an der Kontaktstelle

Aufgrund der starken Einschnürung der Stromlinien in der Kontaktstelle und der dadurch ansteigenden Stromdichte ist die Temperatur in der Kontaktstelle  $\vartheta_C$  höher als die Oberflächentemperatur  $\vartheta_P$  in unmittelbarer Umgebung der Kontaktstelle. In einem Abstand, welcher der Größenordnung weniger Kontaktflächen entspricht, ist diese Übertemperatur abgeklungen [Sla14 S.64]. Wegen der geringen räumlichen Ausdehnung kann die Übertemperatur in der Kontaktstelle nicht von außen gemessen werden [Hil58, MFJ07, WMT12]. Sie kann allerdings mit Hilfe der Spannungs-Temperaturbeziehung nach Kohlrausch [Koh00] (Gleichung (3.36)) aus dem Spannungsfall  $U_c$  über der Kontaktstelle berechnet werden.

Zunächst ist die Beziehung nur für den stationären Fall, isotrope Materialeigenschaften und einen zur Umgebung elektrisch und thermisch isolierten Körper gültig [Koh00]. Für symmetrische Kontakte, bei denen beide Kontaktelemente die gleiche absolute Temperatur  $T_P$  besitzen, gilt unter Berücksichtigung der Lorenzzahl  $L$  [Koh00, ScWe61, Hol67 S.64, Tim98]:

$$U_c^2 = 4 \cdot L \cdot (T_C^2 - T_P^2) \quad (3.36)$$

Durch Umformung ergibt sich die Übertemperatur in der Kontaktstelle  $\Delta\vartheta_C$ :

$$\Delta\vartheta_C = \sqrt{\frac{U_c^2}{4 \cdot L} + T_P^2} - T_P \quad (3.37)$$

Laut [Wil81] ist die Übertemperatur bei Mehrpunktkontakten nicht von den einzelnen mikroskopischen Kontaktstellen abhängig, sondern von dem gesamten Kontaktwiderstand. Sie ist zudem unabhängig von der Geometrie des Kontaktpunktes [Koh00].

Die Spannungs-Temperaturbeziehung zur Ermittlung der Erwärmung in der Kontaktstelle wurde für elektrische Kontakte bestätigt [Hol67 S.60]. Für versilberte Steckverbinderkontakte mit Kontaktlamellen wurde sie in [GLG15] validiert.

Für einen zuverlässigen Kontakt sollte laut [Tim98, Sla14 S.59] die zusätzliche Erwärmung in der Kontaktstelle 1 - 3 K nicht überschreiten. Da die Lorenzzahl für die meisten metallischen Werkstoffe annähernd konstant ist, kann die Temperatur einer Spannung über den Kontakten zugeordnet werden, die nicht überschritten werden darf. Damit lassen sich Erweichungs- und Schmelzspannungen ermitteln [Sla14 S.61]. Zudem lässt sich die Güte der Steckverbinderkontakte anhand des Spannungsfalls bei Bemessungsstrom beurteilen [Mul09].

Die Simulation der Kontakttemperatur mit der FE-Analyse oder dem thermischen Wärmenetzwerk ist ebenfalls möglich [ÖOS94, MFJ07, KoSa07, GLG14b, GLG15]. Für unterschiedliche Radien der Kontaktstelle ( $a = 1$  bis  $100 \mu\text{m}$ ) [KoSa07] und für unsymmetrische Paarungen [ÖOS94, GLG14b] konnte eine gute Übereinstimmung zwischen simulierten und analytisch berechneten Ergebnissen nachgewiesen werden.

### 3.6 Wärmeströme an dem Steckverbinderkontakt

Um mit Hilfe geeigneter thermischer Randbedingungen (Gleichung (3.29) und (3.30)) den Temperaturverlauf berechnen zu können, muss zunächst der in das Volumenelement eingebrachte axiale Wärmestrom berechnet werden. Für den Kontaktstift wird der Wärmestrom  $\dot{Q}_C$  berechnet, der aufgrund des Kontaktwiderstandes hervorgerufen wird. An einer einzelnen Kontaktstelle entsteht bei Stromfluss aufgrund des Kontaktwiderstandes  $R_{K_{Sx}}$  eine Verlustleistung:

$$P_d = R_{K_{Sx}} \cdot I^2 \quad (3.38)$$

Die Verlustleistung wird in Form eines Wärmestroms durch Wärmeleitung in den Kontaktstift und in die Kontaktfeder abgeleitet. Für die Berechnung werden folgende Annahmen getroffen:

Die gesamte in der Kontaktstelle erzeugte elektrische Verlustleistung fließt durch Wärmeleitung in die Kontaktelemente

Die erzeugte Verlustleistung teilt sich symmetrisch in beide Kontaktelemente auf

Damit ergibt sich für eine einzelne Kontaktstelle der in eine Kontaktfeder zugeführte Wärmestrom:

$$\dot{Q}_{Sx} = \frac{P_d}{2} = \frac{1}{2} \cdot R_{K_{Sx}} \cdot I_{Sx}^2 \quad (3.39)$$

Bei einem Steckverbinderkontakt mit mehreren Kontaktfedern teilt sich der Gesamtstrom  $I_{ges}$  in Teilströme auf (Tabelle 2-1). Unter der Annahme einer gleichmäßigen Aufteilung fließt über eine einzelne Kontaktfeder der Teilstrom  $I_{Sx}$ :

$$I_{Sx} = \frac{I_{ges}}{n_S} \quad (3.40)$$

Damit ergibt sich der in eine Kontaktfeder zugeführte Wärmestrom  $\dot{Q}_{Sx}$ :

$$\dot{Q}_{Sx} = \frac{1}{2} \cdot R_{K_{Sx}} \cdot \frac{I_{ges}^2}{n_s^2} \quad (3.41)$$

An dem Kontaktstift werden mehrere Wärmeströme zugeführt. Für die Berechnung wird angenommen, dass der Wärmestrom flächig in den Kontaktstift eingeleitet wird. Daher können die Wärmeströme linear addiert werden:

$$\dot{Q}_{P_{in}} = n_s \cdot \dot{Q}_{Sx} \quad (3.42)$$

So ergibt sich der von der Anzahl der Kontaktfedern abhängige Wärmestrom:

$$\dot{Q}_{P_{in}} = \frac{1}{2} \cdot R_{K_{Sx}} \cdot \frac{I_{ges}^2}{n_s} \quad (3.43)$$

### 3.7 Thermische Modellbildung des Gesamtsystems

Für die thermische Modellbildung wird das Gesamtsystem (bestehend aus Leitung, Leiteranschluss und Steckverbinderkontakt) in Teilbereiche aufgeteilt (Abbildung 3-17). Diese unterscheiden sich durch Geometrie, Werkstoff oder Wärmeübergänge. Zusätzlich müssen die Teilsysteme untereinander gekoppelt werden, um für die thermische Berechnung ein Gesamtmodell aufzubauen. Abbildung 3-17 zeigt die gekoppelten thermischen Teilsysteme. Jedes Teilsystem wird durch ein Volumenelement dargestellt.

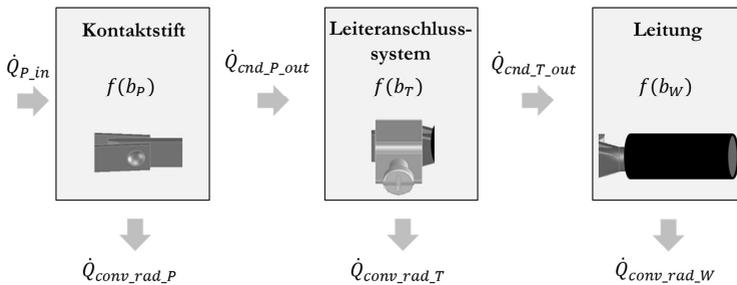


Abbildung 3-17: Unterteilung des Gesamtsystems in Teilbereiche für die analytische Berechnung

Die Verlustleistung an dem Kontaktwiderstand führt zu dem Wärmestrom  $\dot{Q}_{P,in}$  in den Kontaktstift. An dem Kontaktstift bildet sich aufgrund des Wärmestroms ein spezifischer Temperaturverlauf aus, welcher von dem Wärmestrom und der thermischen Ortskonstante  $b_P$  abhängig ist. Durch Wärmeleitung fließt der Wärmestrom  $\dot{Q}_{cnd,P,out}$  aus dem Kontaktstift in den Leiteranschlussbereich und der Wärmestrom  $\dot{Q}_{cnd,T,out}$  aus dem Leiteranschlussbereich in die angeschlossene Leitung. Für jedes Bauelement wird eine separate Ortskonstante berechnet und der eintretende und der austretende Wärmestrom berechnet. Zusätzlich tritt an jedem thermischen Teilsystem ein Wärmestrom in Form von Wärmekonvektion und Wärmestrahlung über die Oberfläche an die Umgebung.

Für die Berechnung der Maximaltemperatur am Steckverbinderkontakt werden die einzelnen Temperaturverläufe der Bauelemente linear addiert, was in Abbildung 3-1 dargestellt ist.

Das Vorgehen zur Ermittlung der Erwärmung ist in Abbildung 3-18 dargestellt.

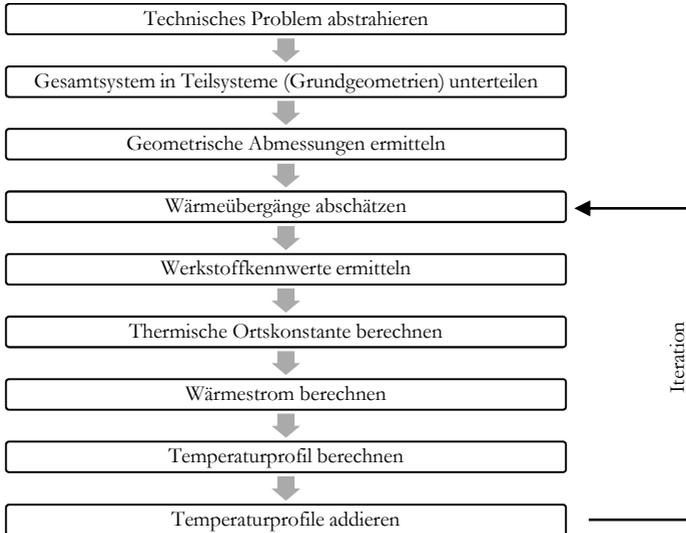


Abbildung 3-18: Vorgehen bei der analytischen Berechnung der Erwärmung

Die Temperatur hat eine Rückwirkung auf die temperaturabhängigen Werkstoffkennwerte und Wärmeübergänge. Daher ist eine iterative Berechnung notwendig.

In Abbildung 3-19 sind die wichtigsten Zusammenhänge zur Berechnung der Erwärmung dargestellt. Mit Hilfe der vorgestellten Gleichungen lassen sich die Zusammenhänge quantifizieren. Blaue Linien stellen in der Abbildung die Wirkungen der einzelnen Parameter dar, rote Linien stellen den Einfluss des Stromes dar und Rückwirkungen sind durch gelbe gestrichelte Linien gekennzeichnet.

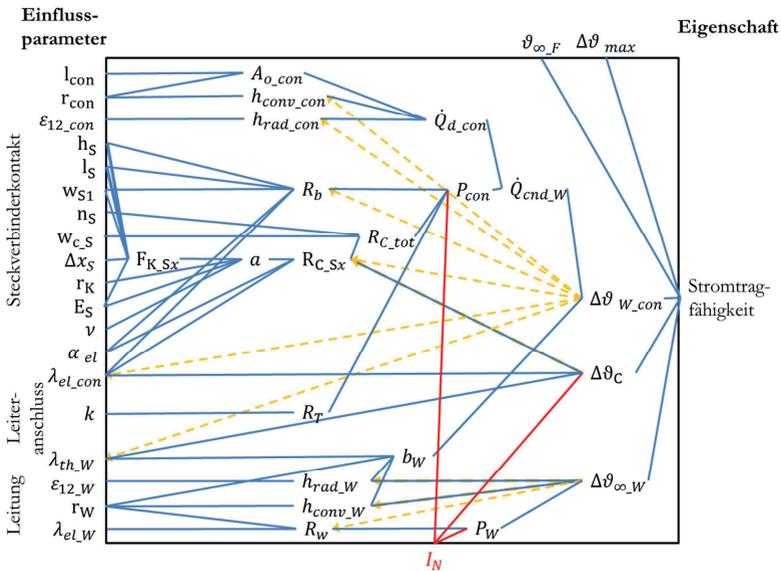


Abbildung 3-19: Darstellung der Einflussparameter auf die Stromtragfähigkeit

Anhand des Diagramms in Abbildung 3-19 sind die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Einflussparametern ersichtlich. Wenn im Konstruktionsprozess eine Änderung stattfindet, lässt sich ablesen, welche Parameter von der Änderung beeinflusst werden.

Konstruktiv lassen sich nicht alle Parameter gleichermaßen beeinflussen. Beruhend auf Erfahrung und aus Erkenntnissen aus dieser Arbeit sind in Tabelle 3-1 die Parameter von Steckverbinderkontakten für die Leistungsübertragung nach ihrer Möglichkeit der Beeinflussung dargestellt. Die Möglichkeit der Beeinflussung spielt für die Produktentwicklung eine große Rolle. Am Anfang einer Entwicklung können viele Parameter ohne großen Aufwand geändert werden. Ein Beispiel dafür ist z.B. die Systemstruktur von Steckverbinderkontakten. In einer späten Phase der Entwicklung lassen sich nur noch wenige Parameter im Nachhinein verändern, ohne das Gesamtsystem neu gestalten zu müssen. Ein Beispiel dafür ist die Oberflächenbeschichtung, die auch in einer späten Phase der Entwicklung leicht geändert werden kann.

Tabelle 3-1: Möglichkeiten der konstruktiven Beeinflussung

	Werkstoff	Geometrische Gestaltung	Systemische Größen
Leicht zu beeinflussen	Elektrische Leitfähigkeit $\lambda_{el}$ Werkstoff der Oberflächenbeschichtung	Läng $l_s$ , Breite $w_{s1}$ und Dicke $h_s$ der Kontaktfedern Auslenkung der Kontaktfeder $\Delta x_s$ Länge Bahnbereich des Kontaktstiftes $l_{bP}$	Kontaktkraft $F_K$
Bedingt zu beeinflussbar	Härte Festigkeit $R_{p0,2}$ , $R_m$ Reibungszahl $\mu$ Rauheit $R_a$	Systemstruktur Anzahl Kontaktfedern $n_s$ Geometrie Kontaktpunkt $r_K^*$ Wärmeabgebende Oberfläche $A_D$ Querschnitt von Kontaktstift und Kontaktbuchse $A_x$ Länge Strompfad Schnittbreite zwischen Kontaktfedern $w_{c,s}$ Anstellwinkel der Kontaktfedern**	Kontaktwiderstand $R_K$ Leiteranschlusswiderstand $R_T$ Verlustleistung über die Oberfläche $\dot{Q}_{d,con}$ Verlustleistung in die Leitung $\dot{Q}_{cnd,w}$ Thermische Kopplung zu dem Gehäuse
Geringe Möglichkeit der Beeinflussung	Elastizitätsmodul $E$ Querkontraktionszahl $\nu$ Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes $\alpha_{el}$ Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{th}$ Elektrische Leitfähigkeit des Leiters $\lambda_{elW}$	Kontaktfläche $a$	Temperatur der Leitung $\vartheta_{\omega,W}$ Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient $h_{conv}$ Emissionsgrad $\epsilon_{12}$ Thermische Ortskonstante $b$ Grenztemperatur $\vartheta_{max}$

\*Bei Flachkontakten leichter zu beeinflussen als bei Rundkontakten

\*\*Bei Rundkontakten leichter zu beeinflussen als bei Flachkontakten

### 3.8 Verifikation der Erwärmung von Steckverbinderkontakten

#### 3.8.1 Prüfmuster und Versuchsaufbau

Für die Verifikation der analytischen Modelle werden Prüfmuster aufgebaut, welche dem Berechnungsmodell weitgehend entsprechen. Die wesentlichen geometrischen Abmessungen des Flachkontaktes mit zwei Kontaktfedern sind in Abbildung 3-20 und im Anhang A6 Tabelle 6-17 aufgeführt.

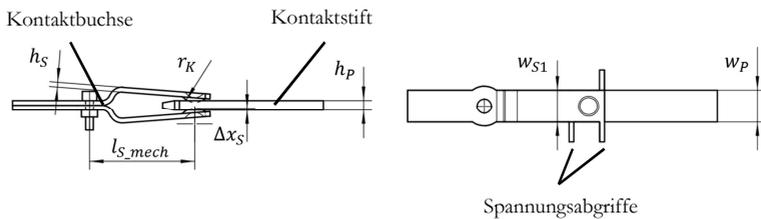


Abbildung 3-20: Geometrische Abmessungen des Steckverbinderkontaktes

Die Kontaktbuchse ist symmetrisch aufgebaut und wird durch eine Schraube zusammengehalten. Zur Berechnung der Kontaktkraft wird als mechanische Länge  $l_{s\_mech}$  der Abstand zwischen der Schraubenachse und der Kontaktstelle angenommen. Aus Symmetriegründen sind der elektrisch leitende Querschnitt von Kontaktstift und Kontaktbuchse gleich. An den Enden der Kontaktfedern und des Kontaktstifts sind zusätzliche Spannungsabgriffe angebracht. Dadurch kann die Spannung an der Kontaktstelle mit der Vier-Leiter-Messmethode gemessen werden und der Kontaktwiderstand dadurch ermittelt werden.

In [Bel12] wurde bei der Optimierung von sphärischen Kontakten ein Optimum des Radius der Kugelfläche von 3,6 mm ermittelt. Auch in [Ben02] ergeben bei erhöhten Kontaktkräften größere Radien der Kugelfläche einen verringerten Kontaktwiderstand. In Anlehnung daran wird für die Experimente der Kontaktbereich der Kontaktbuchse als Kugelfläche mit einem Radius  $r_K$  von 4 mm ausgeformt. Im Kontaktbereich ist selektiv eine Schutzschicht aus Weichgold ( $0,75 \pm 0,1$ )  $\mu\text{m}$  und einer Nickel-Zwischenschicht ( $2,25 \pm 0,4$ )  $\mu\text{m}$

aufgebracht. Durch diese Maßnahme wird der Einfluss von Oxidschichten verringert. Jede tragende Kontaktfläche kann somit als elektrisch leitfähig angesehen werden. So kann für die überschlägige Berechnung von einem rein metallischen Kontakt ausgegangen werden. Die Rauheit der Messproben für die Ebene liegt bei  $R_z = 0,81$  bis  $1,02 \mu\text{m}$  bzw.  $R_a = 0,11$  bis  $0,16 \mu\text{m}$ . Die Rauheit der Kugel ist etwas höher und liegt bei  $R_z = 1,58$  bis  $1,77 \mu\text{m}$  bzw.  $R_a = 0,28$  bis  $0,32 \mu\text{m}$ .

Es werden Steckverbinderkontakte mit verschiedenen Basismaterialien untersucht. Durch die Variation des Basismaterials wird bei konstanter Bauteilgeometrie der Einfluss der elektrischen Leitfähigkeit des Basismaterials auf die Erwärmung des Steckverbinderkontaktes untersucht. Gleichzeitig wird das analytische Modell abgesichert. Als Basismaterialien werden Kupferlegierungen gewählt, die ähnliche mechanische Eigenschaften besitzen. Die Werkstoffe unterscheiden sich vorrangig in den elektrischen und thermischen Eigenschaften. Die Werte sind im Anhang A6 Tabelle 6-18 aufgeführt. Sie werden als Grundlage für die Berechnung verwendet.

Für die Experimente soll der Leiteranschlusswiderstand möglichst gering sein, um eine annähernd ideale Kontaktstelle zwischen Steckverbinderkontakt und Leiter zu bekommen. Als Leiteranschlussystem wird ein Schraubanschluss verwendet, der hohe Kontaktkräfte aufbringen kann. Die Kontaktfläche wird zusätzlich vergrößert, indem der elektrische Leiter aufgesplittert wird und auf beiden Seiten des Steckverbinderkontaktes angeschlossen wird. Dadurch verdoppelt sich die Kontaktfläche bei gleicher Kontaktkraft. Zudem werden die Kontaktflächen im Vorhinein mit Aceton von Fremdschichten gereinigt.

Der Emissionsgrad an den Steckverbinderkontakten kann bei Kupfer je nach Zustand der Oberfläche um den Faktor 25 variieren (poliert:  $\varepsilon = 0,03$ ; oxidiert:  $\varepsilon = 0,78$  [New01][Ver06]). Um in der Berechnung bekannte Werte für den Emissionsgrad verwenden zu können, werden die Steckverbinderkontakte und das Leiteranschlussystem nach der Montage mit einer schwarzen Lackfarbe übersprüht. Durch diese Maßnahme wird ein einheitlicher und bekannter Emissionsgrad von  $\varepsilon = 0,92$  realisiert.

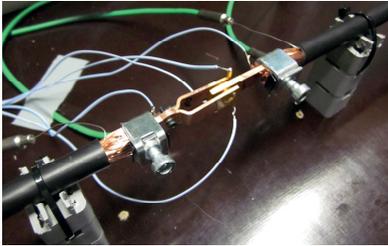


Abbildung 3-21: Steckverbinderkontakt blank

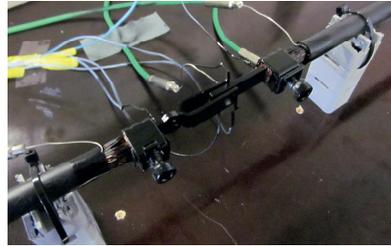


Abbildung 3-22: Steckverbinderkontakt lackiert

Der Wärmeübergang für Konvektion wird an den Bauelementen separat berechnet. Für die Bauelemente werden mittlere Temperaturen angenommen, da bei Temperaturverteilungen an der Oberfläche die Abweichungen vernachlässigbar sind, wenn auch dort mit einer gemittelten Temperaturdifferenz gerechnet wird [Ver06 S.1].

Der Prüfaufbau entspricht dem vorherigen Aufbau zur Untersuchung der Leitungen. Er wird lediglich dahin geändert, dass in der Mitte der Leitung ein Steckverbinderkontakt eingebaut wird. Der Aufbau ist in Abbildung 3-23 dargestellt. Um den Temperaturverlauf entlang der Leitung und an dem Steckverbinderkontakt abbilden zu können, werden Temperaturfühler entlang der Leitung angebracht. Es wird darauf geachtet, dass der Abstand der Thermoelemente geringer als die thermische Ortskonstante ist (Abbildung 3-15). An der Leitung werden die Thermoelemente unterhalb der Isolierung angebracht, um die Maximaltemperatur der Leitung zu ermitteln (Abbildung 3-9).

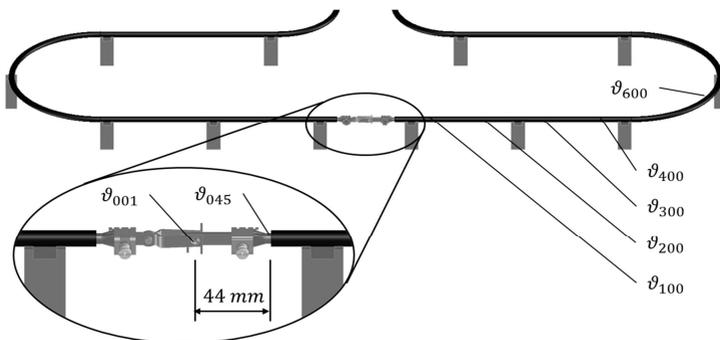


Abbildung 3-23: Prüfaufbau zur Ermittlung der Temperatur der Steckverbinderkontakte

### 3.8.2 Berechnung und Verifikation

An den Steckverbinderkontakten wird eine Kontaktkraft von  $(10,5 \pm 0,5)$  N gemessen. Die mit Anhang 3 Gleichung (6.1) und (6.2) berechneten Kontaktkräfte liegen abhängig von dem verwendeten Elastizitätsmodul aus Tabelle 6-18 bei Werten zwischen 11,5 N bis 11,9 N. Damit sind die berechneten Kontaktkräfte etwas höher als die gemessenen Werte.

In Tabelle 3-2 ist der Vergleich zwischen gemessenen und analytisch berechneten Kontaktwiderständen dargestellt. Die Werte beziehen sich auf Widerstände bei Nennstrom. Die Temperaturabhängigkeit wird berücksichtigt.

Tabelle 3-2: Gegenüberstellung gemessene Kontaktwiderstände  $R_{K\_meas}$  und berechnete Engewiderstände  $R_{C\_calc}$

Elektrische Leitfähigkeit	$\lambda_{el}$	MS/m	24	33	56
Engewiderstand bei 158 A	$R_{K\_meas}$	$\mu\Omega$	235	159	126
Standardabweichung	$1 \cdot \sigma$	$\mu\Omega$	20	10	8
Engewiderstand bei 158 A nach Holm Gl. (2.13) mit elastisch-ideal-plastischem Materialverhalten nach [JaGr05] (Tabelle 6-6)	$R_{C\_calc}$	$\mu\Omega$	274	201	124
Abweichung			16,6 %	26,4 %	-1,6 %

Bei den Steckverbinderkontakten mit einer elektrischen Leitfähigkeit von 56 MS/m besteht eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den berechneten und gemessenen Werten. Für die anderen Steckverbinderkontakte gibt es eine Abweichung von max. 26,4 %. Im Vergleich zu der Messunsicherheit, die sich bei der Messung von Kontaktwiderständen ergibt (vergleiche Abbildung 2-18) ist die Genauigkeit der Berechnung in der Phase der Grobgestaltung ausreichend genau.

Abbildung 3-24 zeigt einen Vergleich zwischen analytisch berechnetem Temperaturverlauf und gemessenen Werten. Für die analytische Berechnung der Erwärmung wurden die in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Modelle zu einem Gesamtmodell zusammengefasst. Dieses berücksichtigt die verschiedenen physikalischen Phänomene und berechnet ausgehend von der Auslenkung

der Kontaktfedern die Kontaktkraft, die Kontaktfläche, den Kontaktwiderstand, die Verlustleistung, die spezifischen Wärmeübergangskoeffizienten und schließlich die Erwärmung. Nähere Informationen zu den verwendeten Gleichungen und Randbedingungen sind in [BBS14c] zu finden. Allerdings wurde in diesem Fall das Modell erweitert und mit elastisch-ideal-plastischem Materialverhalten gerechnet.

Im Rahmen der Erwärmungsversuche wurden die Steckverbinderkontakte mit drei unterschiedlichen Basismaterialien an Leitungen mit einem Nennquerschnitt von  $35 \text{ mm}^2$  angeschlossen. Für jede Versuchsreihe werden fünf neue Steckverbinderkontakte untersucht. Es besteht eine gute Übereinstimmung der berechneten Werte mit den Messwerten. Entlang der Leitung (ab einem Abstand von  $45 \text{ mm}$  zu der Kontaktstelle in Abbildung 3-24) entspricht der gemessene Temperaturverlauf sehr gut dem exponentiell berechneten Temperaturverlauf. Am Kontaktstift wird ein größerer Temperaturgradient berechnet als an der Leitung. Dies kann physikalisch mit dem geringeren Querschnitt und der unterschiedlichen elektrischen- bzw. thermischen Leitfähigkeit des Kontaktstifts begründet werden.

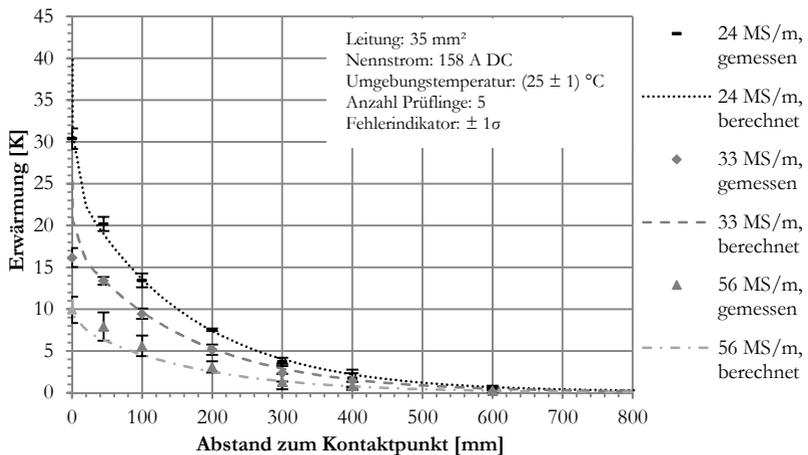


Abbildung 3-24: Gegenüberstellung berechneter und gemessener Temperaturverlauf für verschiedene Steckverbinderkontakte

Die maximale Temperaturdifferenz zwischen gemessenen und berechneten Werten der Oberflächentemperatur des Kontaktstiftes  $\vartheta_{p\_max}$  liegt bei dem Steckverbinderkontakt mit einer elektrischen Leitfähigkeit von 24 MS/m bei 1,2 K. Eine Temperaturdifferenz von 4,7 K liegt bei dem Steckverbinderkontakt mit einer elektrischen Leitfähigkeit von 33 MS/m vor und weniger als 1 K bei dem Steckverbinderkontakt mit einer elektrischen Leitfähigkeit von 56 MS/m.

Die Eigenerwärmung der Leitung liegt bei 34 K. Damit kann der Steckverbinderkontakt mit einer elektrischen Leitfähigkeit von 56 MS/m bei einer maximal zulässigen Erwärmung von 45 K noch gerade verwendet werden. Die beiden anderen Steckverbinderkontakte würden die Grenztemperatur überschreiten, da die elektrische Leitfähigkeit zu gering ist.

Die maximale Temperatur des Kontaktsystems liegt bei symmetrischen Kontakten in der Kontaktstelle [Hil56 S.8] und nicht an der Oberfläche. Sie konnte nicht gemessen werden, sondern wurde mit Gleichung (3.37) berechnet. Bei erhöhtem Kontaktwiderstand, aufgrund einer schlechten elektrischen Leitfähigkeit des Basismaterials, nimmt die Temperatur in der Kontaktstelle nochmals signifikant zu (in Abbildung 3-24 Temperaturanstieg an der Stelle  $x = 0$ ).

Um die Erwärmung in der Phase der Grobgestaltung überschlägig vorherzusagen ist das thermische Modell damit durchaus geeignet. Allerdings hat die Berechnung des Kontaktwiderstandes einen großen Einfluss auf die Erwärmung. Dies wird unter anderem in Kapitel 4.4. im Rahmen der Sensitivitätsanalyse dargestellt.

## 4 Parametrisierte Modelle für Steckverbinderkontakte

Durch die Verifikation der analytischen Modelle konnte gezeigt werden, dass die Erwärmung an einfachen Steckverbinderkontakten in einer guten Näherung analytisch berechnet werden kann. Auf Grundlage dieser Modelle lassen sich Parameterstudien durchführen. Eine Berechnung der Eigenschaften wäre ebenso mit einer FE-Analyse oder einem thermischen Wärmenetzwerk möglich. Allerdings muss mit diesen Methoden stets eine Konstruktion vorgegeben werden, deren Eigenschaften berechnet werden sollen.

Einfache analytische Modelle haben den Vorteil, dass durch Umstellen der Gleichungen aus vorgegebenen Eigenschaften die notwendigen Parameter berechnet werden können.

In Abbildung 4-1 ist anhand des aufgestellten Modells die Richtung der Berechnung von Eigenschaften und der konstruktiven Auslegung aufgezeigt.

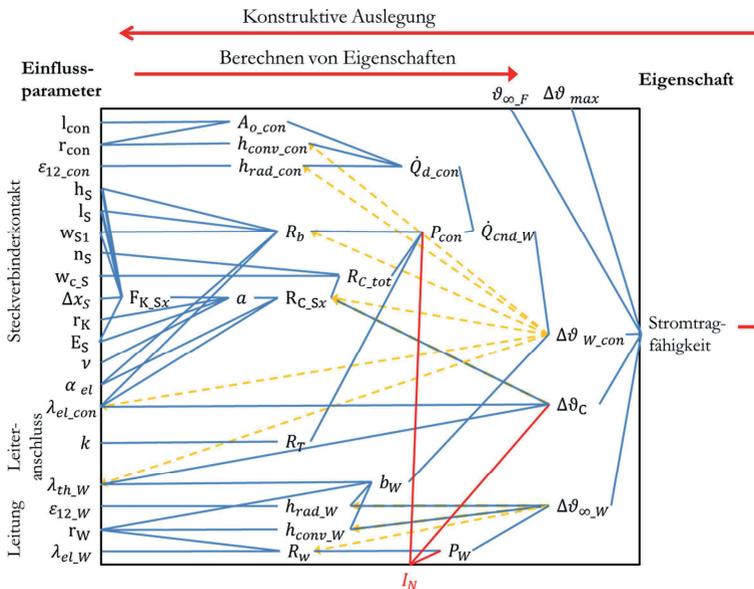


Abbildung 4-1: Berechnung und konstruktive Auslegung am Beispiel von Steckverbinderkontakten

Das Ziel der konstruktiven Auslegung besteht darin, aus neuen Eigenschaften und vorgegebenen Restriktionen die geometrisch-stofflichen Parameter des neuen Bauelements festzulegen. Sie müssen so festgelegt werden, dass die gegebenen Eigenschaften erfüllt werden. Bereits bei Federn haben die Lösungsansätze für die Dimensionierung zu wenige Parameter [Lie03 S.6]. Daher ist die Vorgabe von zusätzlichen Parametern, meist in Form von Restriktionen, notwendig.

Aufgrund der Vielzahl an Einflussparametern bei Steckverbinderkontakten kann nicht alles gleichzeitig dimensioniert bzw. optimiert werden. Die parametrisierten Modelle sollen dabei unterstützen, Zusammenhänge darzustellen, Teilbereiche zu dimensionieren und eine Groboptimierung durchzuführen. Zur konstruktiven Auslegung von Steckverbinderkontakten werden verschiedene Modelle für unterschiedliche Teilbereiche des Steckverbinderkontaktes (Anzahl an Kontaktfedern, Durchgangswiderstand etc.) verwendet. Dadurch können diese einzelnen Teilmodelle auch für unterschiedliche Systemstrukturen von Steckverbinderkontakten verwendet werden.

#### 4.1 Dimensionierung des maximalen Durchgangswiderstandes

Die Stromtragfähigkeit von Steckverbindern wird wesentlich von dem Wert des Durchgangswiderstandes der Steckverbinderkontakte  $R_{tr}$  beeinflusst. Ist der maximal zulässige Durchgangswiderstand für einen Steckverbinderkontakt berechnet, so kann dieser sehr viel einfacher elektrisch und mechanisch dimensioniert werden.

Ein beispielhaftes Vorgehen bei der Dimensionierung des maximalen elektrischen Kontaktwiderstandes von Stromschienen ist in [BrSc37, Hol67 S.176] dargestellt. Ein analytischer Ansatz wird gewählt, um den Kontaktwiderstand so auszulegen, dass aufgrund der Joule'schen Verlustleistung eine vorgegebene Grenztemperatur nicht überschritten wird. Bei Steckverbinderkontakten sind im Gegensatz zu Stromschienen verschiedene Bauelemente mit unterschiedlichen Teilwiderständen zu berücksichtigen. Zudem muss die Wärmeabfuhr über die Oberfläche der Bauelemente an die Umgebung berücksichtigt werden.

Für die Temperatur des Steckverbinderkontaktes ist das Verhältnis zwischen Wärmeerzeugung und Wärmeabfuhr entscheidend. Die Wärmeerzeugung beruht auf der Verlustleistung, welche bei Stromfluss aufgrund des Durchgangswiderstandes entsteht. Die Wärmeabfuhr geschieht durch Konvektion, Wärmestrahlung und Wärmeleitung über die Oberfläche des Steckverbinderkontaktes an die Umgebung. Weiterhin findet eine Wärmeleitung durch die Leitungsquerschnitte in die angeschlossenen Leitungen statt, was in Abbildung 4-2 dargestellt ist.

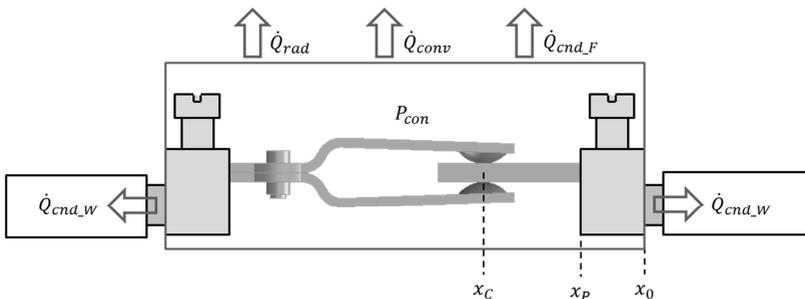


Abbildung 4-2: Wärmeströme an einem Steckverbinderkontakt

Der Wärmestrom in die Leitung  $\dot{Q}_{cnd_W}$  wird in dieser Arbeit zur Dimensionierung des maximal zulässigen Durchgangswiderstandes von einem Steckverbinderkontakt verwendet. Dieser Wärmestrom ist laut [ViKe02 S.416] für die meisten elektrischen Steckverbinderkontakte der wichtigste Wärmeabfuhrmechanismus. Bezogen auf Steckverbinderkontakte ist eine thermische Verteilung anzustreben, die auch bei einem maximal zulässigen Leitungsquerschnitt keine Wärme aus der Leitung in den Kontakt transportiert [HLS03]. Für eine optimale Auslegung sollte daher der Steckverbinderkontakt bei Nennstrom eine etwas höhere Temperatur aufweisen als die Leitung. Bei überdimensionierten Steckverbinderkontakten kann es allerdings vorkommen, dass der Wärmestrom aus der Leitung in den Steckverbinderkontakt fließt und der Steckverbinderkontakt als Wärmesenke wirkt.

In Abbildung 4-3 sind Temperaturverläufe für verschiedene Steckverbinderkontakte dargestellt, welche bei Nennstrom frei in Luft ohne Gehäuse getestet werden. Bei Steckverbinderkontakt A ist der Kontaktstift mit der Temperatur  $\vartheta_p$  die wärmste Stelle. Bei Steckverbinderkontakt B kommt es zu keiner zusätzlichen Erwärmung an dem Steckverbinderkontakt.

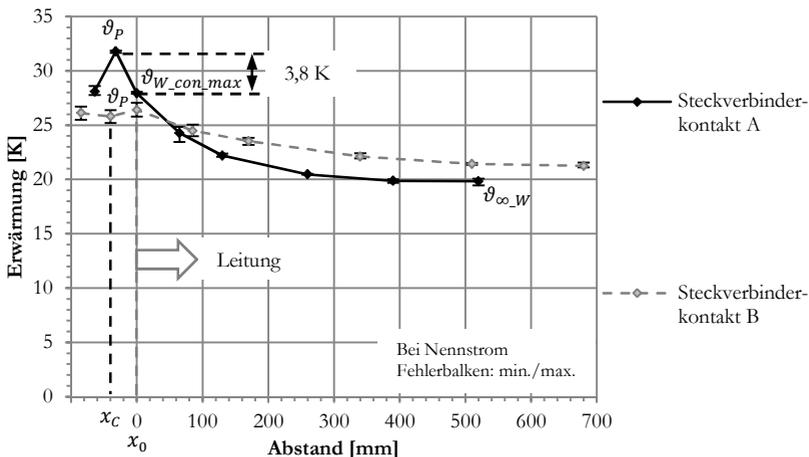


Abbildung 4-3: Temperaturverläufe verschiedener Steckverbinderkontakte

Anhand des Temperaturverlaufes ist zu erkennen, dass der wesentliche Anteil der Gesamterwärmung des Systems an der Leitung auftritt. Dieser beruht auf der Eigenerwärmung der Leitung und einem weiteren Anteil, welcher durch den axialen Wärmestrom aus dem Steckverbinderkontakt hervorgerufen wird.

Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit und der großen Querschnitte von Steckverbindern für die Leistungsübertragung ist die Temperaturdifferenz an den Steckverbinderkontakten in den meisten Fällen vernachlässigbar klein gegenüber der Temperaturdifferenz am Leiter. In Abbildung 4-3 beträgt die Temperaturdifferenz am Steckverbinderkontakt  $\Delta < 3,8$  K. Auch von anderen Autoren wird bestätigt, dass an Steckverbinderkontakten für die Leistungsübertragung die Temperaturdifferenz am Steckverbinderkontakt bei Nennstrom sehr gering ist [Bel12, AJC12, GLG14b]. Daher wird die Erwärmung bis an die Stelle  $x_0$  berechnet. Ein zusätzlicher Aufschlag (Abbildung 4-4) fasst die Erwärmung an dem Steckverbinderkontakt und an dem Leiteranschlussbereich zusammen.

Ein Sicherheitsfaktor kann zusätzlich für mögliche Änderungen der Erwärmung innerhalb der Nutzungsdauer angesetzt werden. Durch Erfahrungswerte oder durch eine systematische Betrachtung im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse (Kapitel 4.4) können geeignete Sicherheitsfaktoren ermittelt werden.

Steckverbinderkontakte sind optimal ausgelegt, wenn die Temperatur bei Nennstrom über die gesamte Nutzungsdauer nur geringfügig geringer ist als die zugelassene Grenztemperatur. Um dies zu erreichen, muss der Durchgangswiderstand des Steckverbinders bei verschiedenen Stromstärken und Leitungsquerschnitten angepasst werden. Wird z.B. eine Stromübertragung von 100 A gefordert und eine maximale Erwärmung von 45 K vorgegeben, so gibt es verschiedene Möglichkeiten diesen Strom zu übertragen (Abbildung 4-4). Wenn eine Leitung mit einem Querschnitt von 25 mm<sup>2</sup> verwendet wird, liegt die Eigenerwärmung der Leitung bei 22 K und es kann ein Steckverbinderkontakt mit einem erhöhten Durchgangswiderstand verwendet werden, da durch den Steckverbinderkontakt eine zusätzliche Erwärmung von 23 K zulässig ist.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, einen anderen Leitungsquerschnitt zu verwenden. Aufgrund der Größenabstufungen liegt der nächst kleinere Leitungsquerschnitt bei  $16 \text{ mm}^2$ . Mit einem Leitungsquerschnitt von  $16 \text{ mm}^2$  wird theoretisch bei gleichem Nennstrom bereits eine Eigenerwärmung von  $39 \text{ K}$  erreicht. Durch den Steckverbinderkontakt darf dann nur noch eine zusätzliche Erwärmung von  $6 \text{ K}$  stattfinden, damit die Grenztemperatur unterschritten wird (Abbildung 4-4). Der Steckverbinderkontakt muss daher eine hohe Güte in Form eines geringen Durchgangswiderstandes oder einer hohen Kühlleistung aufweisen. Dementsprechend muss der Steckverbinderkontakt ausgelegt werden. Der Aufwand ist dann z.B. durch eine Ersparnis beim Kabel gerechtfertigt. In Abbildung 4-4 sind die beiden Szenarien schematisch dargestellt.

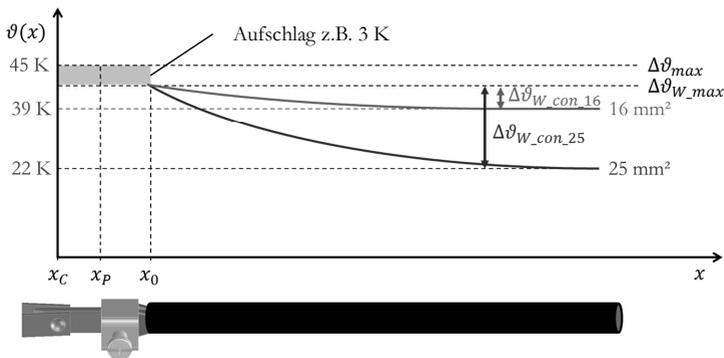


Abbildung 4-4: Theoretischer Temperaturverlauf bei unterschiedlichen Leitungsquerschnitten zur Erreichung der Grenztemperatur

Wenn die Eigenerwärmung der Leitung berechnet ist, kann die durch den axialen Wärmestrom des Steckverbinderkontaktes maximal zulässige Temperaturdifferenz am Leiter  $\Delta\vartheta_{W\_con\_max}$  ermittelt werden. Dadurch kann für verschiedene Leitungsquerschnitte und Nennströme stets eine grenzwertige Konstruktion ausgelegt werden, die nahe an der Grenztemperatur  $\Delta\vartheta_{max}$  liegt.

#### 4.1.1 Berechnung des maximalen Wärmestroms in die Leitung

Die an einem Steckverbinderkontakt angeschlossene elektrische Leitung kann aus Sicht des Steckverbinderkontaktes als Kühlkörper betrachtet werden. Der Wärmestrom fließt durch Wärmeleitung aus dem Steckverbinderkontakt in die angeschlossene Leitung und wird anschließend entlang der Leitung an die Umgebung abgegeben. Dadurch klingt die Temperatur entsprechend einer Exponentialfunktion ab [Böh05]. Dies kann mit Gleichung (3.28) und geeigneten Randbedingungen beschrieben werden [BBS14b].

Für die konstruktive Auslegung ist die maximale Temperatur am vorderen Ende der Leitung von Interesse (Stelle  $x_0$  in Abbildung 4-4). Aus Gleichung (3.28) folgt:

$$\Delta\vartheta_{W_{con,max}} = a_1 + a_2 \quad (4.1)$$

Diese Temperatur ist unter anderem von dem zugeführten Wärmestrom abhängig. Mit Randbedingungen aus Kapitel 3.3.3 kann die maximale Temperatur an der Leitung berechnet werden. Dabei werden folgende Annahmen getroffen:

Der Temperaturgradient bzw. der axiale Wärmestrom aufgrund von Wärmeleitung aus dem Steckverbinderkontakt an der Stelle  $x_0 = 0$  ist bekannt. Der Temperaturgradient bzw. der axiale Wärmestrom bei einem Abstand von  $x = 5 \cdot b$  ist abgeklungen.

Aus Gleichung (4.1) ergibt sich unter Berücksichtigung der gewählten Randbedingungen mit den Faktoren  $a_1$  (Gleichung (3.33)) und  $a_2$  (Gleichung (3.34)) die Beziehung:

$$\Delta\vartheta_{W_{con,max}} = \frac{M \cdot b}{1 - e^{(10)}} + \frac{M \cdot b}{1 - e^{(10)}} \cdot e^{(10)} = M \cdot b \cdot \left( \frac{1 + e^{(10)}}{1 - e^{(10)}} \right) \quad (4.2)$$

Der Term in Gleichung (4.2) kann vereinfacht werden:

$$\left( \frac{1 + e^{(10)}}{1 - e^{(10)}} \right) = -1,0000908 \approx -1 \quad (4.3)$$

Dadurch ergibt sich folgender vereinfachter Ausdruck:

$$\Delta\vartheta_{W\_con\_max} = -M \cdot b \quad (4.4)$$

Der Temperaturgradient  $M$  kann durch den Fourier'schen Wärmeleitungssatz aus Anhang A3 Gleichung (6.54) ermittelt werden, um die Abhängigkeit von dem Wärmestrom zu berechnen:

$$\left. \frac{\partial\vartheta}{\partial x} \right|_{x=0} = -\frac{\dot{Q}_{cnd\_W}}{\lambda_{th\_W} \cdot A_{x\_W}} = M \quad (4.5)$$

Dadurch ergibt sich:

$$\Delta\vartheta_{W\_con\_max} = \dot{Q}_{cnd\_W} \cdot \frac{b_W}{\lambda_{th\_W} \cdot A_{x\_W}} \quad (4.6)$$

Unter Verwendung der thermischen Ortskonstante der Leitung  $b_W$  folgt:

$$\Delta\vartheta_{W\_con\_max} = \dot{Q}_{cnd\_W} \cdot \frac{1}{\sqrt{\lambda_{th\_W} \cdot A_{x\_W} \cdot h_{conv\_rad\_W} \cdot U_{o\_W}}} \quad (4.7)$$

Anhand der Gleichung (4.7) lassen sich explizit die Einflussparameter auf die Erwärmung an der Leitung ermitteln. Es ist zu erkennen, dass die maximale Temperatur aufgrund des axialen Wärmestroms direkt proportional zu dem in die Leitung eingeleiteten Wärmestrom ist.

Durch Umstellen von Gleichung (4.7) kann mit Gleichung (4.8) der axiale Wärmestrom berechnet werden, der bei einer vorgegebenen Temperaturdifferenz von der Leitung abgeführt wird. Diese Art der Berechnung des Wärmestroms wird bisher nur zur Vereinfachung von Simulationen verwendet

[BaLi01]. Für die konstruktive Auslegung von Steckverbinderkontakten lässt sich dadurch der maximale Wärmestrom berechnen, der zu einer vorgegebenen Temperaturdifferenz an der Leitung führt.

$$\dot{Q}_{cnd\_W\_max} = \Delta\vartheta_{W\_con\_max} \cdot \sqrt{\lambda_{th\_W} \cdot A_{x\_W} \cdot h_{conv\_rad\_W} \cdot U_{o\_W}} \quad (4.8)$$

In Abbildung 4-5 ist der mit Gleichung (4.8) und den geometrisch-stofflichen Parametern aus Anhang A5 Tabelle 6-15 berechnete maximale Wärmestrom für verschiedene Leitungsquerschnitte dargestellt. Der Wärmestrom führt an der Leitung zu einer zusätzlichen Erwärmung von  $\Delta\vartheta_{w\_con} = 10$  K. Für die Berechnung werden temperatur- und geometrieabhängige Wärmeübergangskoeffizienten verwendet. Anhand des Diagramms ist zu sehen, dass mit zunehmendem Querschnitt ein höherer Wärmestrom zugeführt werden kann.

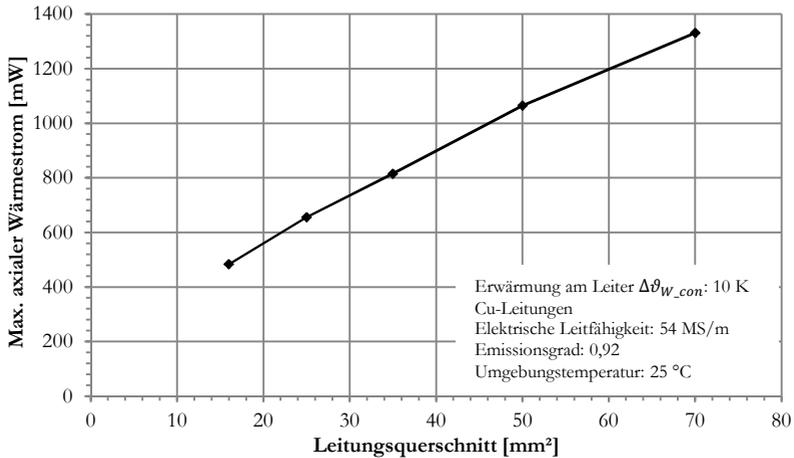


Abbildung 4-5: Maximaler Wärmestrom für Leitungen nach Anhang A5, der zu einer Erwärmung von 10 K führt (nach Gleichung (4.8))

#### 4.1.2 Maximal zulässiger Durchgangswiderstand

Um grundsätzliche Abhängigkeiten zu untersuchen, kann aus einem vorgegebenen maximalen Wärmestrom  $\dot{Q}_{cnd\_w\_max}$  der maximal zulässige Durchgangswiderstand  $R_{con\_max}$  ermittelt werden. Dazu müssen allerdings starke Vereinfachungen angenommen werden:

Die am Steckverbinderkontakt erzeugte Wärme wird nur an die Leitung abgegeben und nicht an die Umgebung (Adiabatischer Fall am Steckverbinderkontakt).

Die Verlustleistung wird symmetrisch durch zwei Leitungen abgeführt (Abbildung 4-2).

Für den Wärmestrom in die Leitung ergibt sich demzufolge:

$$\dot{Q}_{cnd\_w\_max} = \frac{1}{2} \cdot R_{con\_max} \cdot I^2 \quad (4.9)$$

Daraus kann abhängig von dem Wärmestrom der maximale Widerstand berechnet werden:

$$R_{con\_max} = \frac{2 \cdot \dot{Q}_{cnd\_w\_max}}{I^2} \quad (4.10)$$

In Abbildung 4-6 ist für den adiabatischen Fall die Abhängigkeit des maximalen Durchgangswiderstandes von verschiedenen Leitungsquerschnitten dargestellt. Dies gilt für den Betrieb mit Nennstrom nach Anhang A5 Tabelle 6-15.

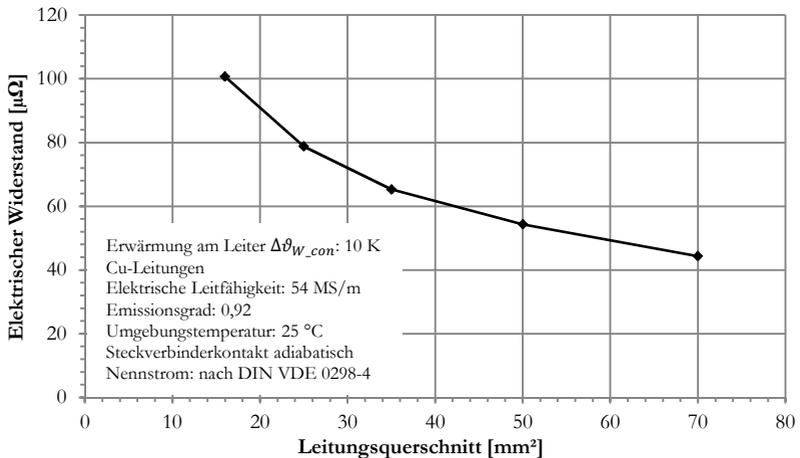


Abbildung 4-6: Maximaler Durchgangswiderstand bei Nennstrom der Leitungen nach Gleichung (4.8) und (4.10)

Der adiabatische Fall am Steckverbinderkontakt beschreibt den „Worst Case“, bei dem die gesamte am Steckverbinderkontakt erzeugte Verlustleistung in die Leitung abgeführt wird und keine Wärmeabgabe an die Umgebung stattfindet<sup>10</sup>. Für einen Steckverbinderkontakt, der frei in Luft angeordnet ist, ist eine adiabatische Betrachtung des Steckverbinderkontaktes eine starke Vereinfachung. Eine zusätzliche Wärmeabfuhr findet durch Wärmekonvektion und Wärmestrahlung zur Umgebung statt. Diese ist allerdings stark von der Geometrie des Steckverbinderkontaktes und von dem Leiteranschlusssystem abhängig. Bei vorgegebener Grenztemperatur und bei einem vorgegebenen Bauraum kann dieser Anteil allerdings im Voraus abgeschätzt werden. Im Gehäuse ist die von dem Steckverbinderkontakt abgegebene Wärmemenge zudem stark von der thermischen Kopplung zu dem Gehäuse abhängig. Je größer der Anteil der Wärmeabfuhr an die Umgebung ist, desto höher kann bei gleichbleibender Erwärmung der Durchgangswiderstand des Steckverbinderkontaktes sein.

<sup>10</sup> Durch angeschlossene Geräte kann ebenfalls ein zusätzlicher Wärmestrom erzeugt werden, der über den Leiter abgeführt werden muss.

## 4.2 Zusammenhang zwischen Durchgangswiderstand und Erwärmung

Wesentlich für die konstruktive Auslegung von Steckverbinderkontakten ist der Zusammenhang zwischen Durchgangswiderstand, Stromstärke, angeschlossener Leitung und der Erwärmung des Steckverbinderkontaktes. Folgende Vereinfachungen werden für die Darstellung dieser Zusammenhänge angenommen:

Adiabatischer Fall am Steckverbinderkontakt, bei dem die gesamte erzeugte Verlustleistung in die angeschlossenen Leitungen fließt.

Die Maximaltemperatur setzt sich aus der Leiterübertemperatur einer langen Leitung und der durch den axialen Wärmestrom erzeugten Temperaturdifferenz zwischen Steckverbinder und Leitung zusammen.

Vernachlässigung der Erwärmung an der Isolierung.

Für die maximale Temperatur gilt demzufolge:

$$\Delta\vartheta_{W\_max} = \Delta\vartheta_{\infty\_W} + \Delta\vartheta_{W\_con\_max} \quad (4.11)$$

Mit Gleichung (6.94), (4.7) und (4.10) kann die maximale Erwärmung an der Leitung berechnet werden:

$$\Delta\vartheta_{W\_max} = \frac{I^2}{\lambda_{el\_W} \cdot A_{x\_W} \cdot h_{conv\_rad\_W} \cdot U_{o\_W}} + \frac{R_{con}}{2} \cdot I^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{\lambda_{th\_W} \cdot A_{x\_W} \cdot h_{conv\_rad\_W} \cdot U_{o\_W}}} \quad (4.12)$$

Durch Umstellen kann der maximale Strom berechnet werden:

$$I_{max} = \sqrt{\frac{\Delta\vartheta_{\infty\_W} + \Delta\vartheta_{W\_con\_max}}{\frac{1}{\lambda_{el\_W} \cdot A_{x\_W} \cdot h_{conv\_rad\_W} \cdot U_{o\_W}} + \frac{R_{con}/2}{\sqrt{\lambda_{th\_W} \cdot A_{x\_W} \cdot h_{conv\_rad\_W} \cdot U_{o\_W}}}}} \quad (4.13)$$

In Abbildung 4-7 ist die Stromtragfähigkeit in Abhängigkeit von dem Leitungsquerschnitt und dem Durchgangswiderstand dargestellt. Für die Gesamterwärmung  $\Delta\vartheta_{W\_max}$  wird ein Wert von 30 K angenommen.

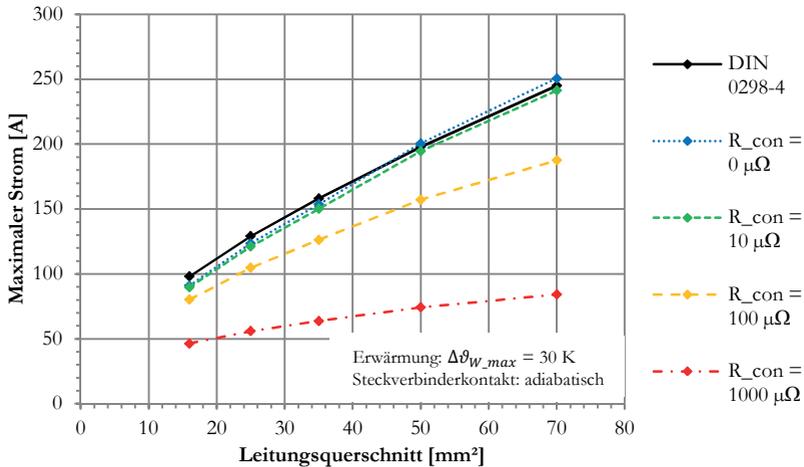


Abbildung 4-7: Maximaler Strom verschiedener Leitungsquerschnitte und Durchgangswiderstände nach Gleichung (4.13)

Um den Einfluss eines sich erhöhenden Widerstandes auf die Erwärmung darzustellen, wird für die Berechnung der Durchgangswiderstand des Steckverbinderkontaktes  $R_{con}$  in dem Bereich von  $0 \mu\Omega$  bis  $1000 \mu\Omega$  variiert. Ohne Steckverbinderkontakt ( $0 \mu\Omega$ ) wird nur die Erwärmung der Leitung betrachtet. Die berechneten Werte zeigen den gleichen Verlauf wie die aus der Norm DIN VDE 0298-4 [DIN13] definierten Werten für Leitungen. Anhand des Diagramms ist zu erkennen, dass mit steigendem Leitungsquerschnitt der zulässige Strom zunimmt. Bei einem Steckverbinderkontakt mit geringem Durchgangswiderstand entspricht der maximale Strom in etwa dem Strom der Leitung. Ein Kontaktsystem mit hohem Durchgangswiderstand verringert den maximalen Strom des Systems. Bei großen Leitungsquerschnitten ist diese Änderung sehr viel stärker als bei kleinen Leitungsquerschnitten. Die Stromtragfähigkeit eines Steckverbinderkontaktes mit hohem Durchgangswiderstand kann selbst durch einen viel größeren Leitungsquerschnitt nicht erheblich verbessert werden. Allerdings kann auch ein Steckverbinder mit erhöhtem Durchgangswiderstand eine gute Stromtragfähigkeit besitzen, wenn die Wärme über die Oberfläche des Steckverbinders abgegeben wird.

### 4.3 Ermittlung der optimalen Anzahl an Kontaktfedern

Wenn der maximale Durchgangswiderstand eines Steckverbinderkontaktes vorgegeben ist, so können die einzelnen Bereiche des Steckverbinderkontaktes dimensioniert werden. Der Durchgangswiderstand wird wesentlich durch den Kontaktwiderstand und den Bahnwiderstand der Kontaktfedern bestimmt. Mehrere Kontaktstellen bzw. mehrschenkelige Kontaktfedern werden verwendet, um die Kontaktredundanz und damit die Kontaktsicherheit zu erhöhen. Zudem verringern sie den Durchgangswiderstand des Kontaktsystems [Gro88, Ric00 S.13, MJG13 S.265]. Daher ist die Anzahl der Kontaktfedern ein wichtiger Konstruktionsparameter.

Laut [Ric00 S.13] erfordert eine Halbierung des Engewiderstandes die vierfache Kontaktkraft. Wird jedoch eine zusätzliche Kraft nicht derselben, sondern einer zweiten Kontaktstelle zugeführt, so bewirkt eine Verdoppelung der Gesamtkraft die Halbierung des Gesamtwiderstandes. Ab einer bestimmten Mindestkraft, die zur Gewährleistung der Kontaktsicherheit erforderlich ist, kann es daher zweckmäßig sein, die verfügbare Kontaktkraft auf eine definierte Anzahl paralleler Kontaktfedern zu verteilen [Ric00 S.13].

In [Gro88] wurde der Widerstand von Stromschienen mit mehreren parallelen Kontaktelementen untersucht. Bei vorgegebener Gesamtkontaktkraft bringt eine Aufteilung des Stroms auf mehr als 10 parallele Kontaktelemente (Kontaktfedern) hinsichtlich einer Verminderung des Gesamtwiderstandes der Verbindung im Vergleich zu dem Aufwand keinen erheblichen Vorteil [Gro88 S.16]. In der dazugehörigen Konstruktion war der Kontaktwiderstand dominierend, wodurch der Bahnwiderstand des Teilstücks vernachlässigt werden konnte.

Bei Steckverbinderkontakten hat das Basismaterial oftmals eine geringere elektrische Leitfähigkeit als bei Stromschienen, da neben elektrischen Anforderungen auch mechanischen Anforderungen zu erfüllen sind. Zudem sind die Querschnitte bei Kontaktfedern von Steckverbindern sehr viel geringer. Daraus folgt ein höherer Anteil des Bahnwiderstandes bei Steckverbindern, der nicht mehr vernachlässigt werden kann. Im Rahmen dieser Arbeit [BBS14a] wurde daher zusätzlich der Einfluss des Bahnwiderstandes und der Einfluss

verschiedener Szenarien der Kontaktkraft auf den Widerstand der Kontaktfedern untersucht.

Der Steckverbinderkontakt wird durch eine elektrische Ersatzschaltung vereinfacht. Dabei werden die einzelnen Teilwiderstände berücksichtigt. Dies ist in Abbildung 2-6 dargestellt. Sowohl der Bahnbereich der Kontaktbuchse, als auch der des Kontaktstiftes sind unabhängig von der Anzahl der Kontaktfedern. Sie werden für die Optimierung nicht berücksichtigt.

Für die Berechnung der Abhängigkeit zwischen dem Durchgangswiderstand und der Anzahl der Kontaktfedern müssen gewisse Randbedingungen und Restriktionen vorgegeben werden:

Maximale Breite des Steckverbinderkontaktes  $w_{con,max}$ , die z.B. durch einen vorgegebenen Bauraum bzw. durch das Rastermaß vorgegeben ist (Abbildung 4-8).

Minimale Schnittbreite  $w_{c,s}$  zwischen den einzelnen Kontaktfedern, die fertigungstechnisch herstellbar ist.

Gleicher Widerstand an jeder Kontaktstelle.

Laut [GrBö87] bleibt bei versilberten Kontakten die anfangs gleiche Stromaufteilung aufgrund gleicher Widerstände erhalten. Bei unversilberten Kontakten kann die Stromaufteilung mit zunehmender Alterung ungleichmäßig werden, wodurch einige Kontaktfedern überlastet werden können [GrBö87]. Aufgrund von unterschiedlichen Kontaktkräften an den einzelnen Kontaktfedern kann es zusätzlich zu unterschiedlichen Kontaktwiderständen an den einzelnen Kontaktfedern kommen [ASF11, ECB13]. In [Yos74] und [GLG13] wurde die Stromverteilung in parallelen Kontaktfedern untersucht, da diese nicht in jeder Kontaktfeder gleich ist. Ein erhöhter Kontaktwiderstand und die Verwendung von Gleichstrom führen zu einer gleichmäßigeren Verteilung des Stroms. Für die Steckverbinderkontakte wird davon ausgegangen, dass die Kontaktwiderstände sehr ähnlich sind und dass daher die Stromaufteilung gleichmäßig ist.

### 4.3.1 Szenarien zur Bestimmung des Durchgangswiderstandes der Kontaktfedern

Der Widerstand  $R_{SC}$  berücksichtigt die Parallelschaltung der  $n_S$  Kontaktfedern mit den dazugehörigen Bahnwiderständen  $R_{b_{sx}}$  und den Kontaktwiderständen  $R_{K_{sx}}$  (Abbildung 2-6).

$$R_{SC} = \frac{1}{n_S} (R_{b_{sx}} + R_{K_{sx}}) \quad (4.14)$$

Abhängig davon, welcher Widerstand an dem Steckverbinderkontakt dominant ist und welches Modell zur Bestimmung des Kontaktwiderstandes bzw. Engewiderstandes verwendet wird, können mehrere Szenarien unterschieden werden.

Beispielhaft werden unterschiedliche Szenarien für einen Flachkontakt gezeigt, dessen geometrische Abmessungen in Abbildung 4-8 und Anhang A6 Tabelle 6-16 dargestellt sind.

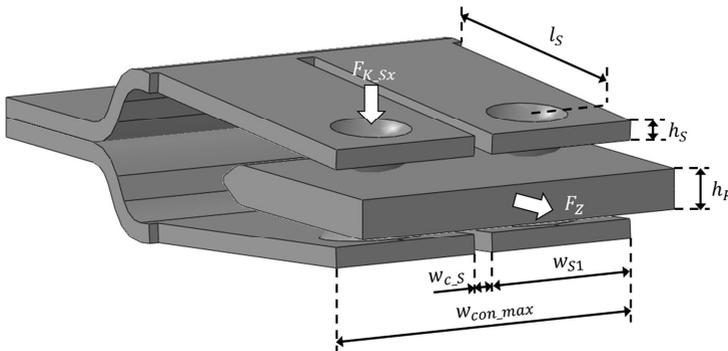


Abbildung 4-8: Abmessungen des Steckverbinderkontaktes

**Szenario 1 ( $R_b$ )**

Das erste Szenario stellt den einfachsten Fall dar. Der Kontaktwiderstand wird vernachlässigt und nur der Bahnwiderstand der Kontaktfedern wird berücksichtigt. Aus den geometrischen Abmessungen lässt sich der resultierende Bahnwiderstand der Kontaktfedern bestimmen:

$$R_{SC} = \frac{1}{n_S} \cdot \frac{l_S}{\lambda_{el} \cdot h_S \cdot w_{S1}} \quad (4.15)$$

Ausschlaggebend für den Bahnwiderstand einer einzelnen Kontaktfeder sind deren Länge, Dicke, Breite und elektrische Leitfähigkeit. Wenn die Gesamtbreite des Steckverbinderkontaktes, die Anzahl der Kontaktfedern und die Schnittbreite vorgegeben sind, kann die Breite einer einzelnen Kontaktfeder berechnet werden:

$$w_{S1} = \left[ \frac{2}{n_S} \cdot (w_{con\_max} + w_{c\_S}) \right] - w_{c\_S} \quad \text{für } n_S = \{2, 4, 6, \dots\} \quad (4.16)$$

Daraus ergibt sich:

$$R_{SC} = \frac{l_S}{\lambda_{el} \cdot h_S} \cdot \frac{1}{(2 \cdot (w_{con\_max} + w_{c\_S}) - n_S \cdot w_{c\_S})} \quad (4.17)$$

**Szenario 2 ( $R_K$  ( $F_{K\_Sx} = \text{const.}$ ;  $F_Z \neq \text{const.}$ ))**

Im Szenario 2 wird der Bahnwiderstand vernachlässigt und nur der resultierende Kontaktwiderstand berücksichtigt. Dies ist z.B. der Fall, wenn der Kontaktwiderstand um ein Vielfaches größer ist als der Bahnwiderstand. Gründe dafür können unter anderem sein:

Geringere Kontaktkräfte

Fremdschichten

Geringerer Bahnwiderstand der Kontaktfedern aufgrund großer Querschnitte oder kurzer Kontaktfedern

In diesem Fall muss nur der Kontaktwiderstand berücksichtigt werden. Wirkt an jeder Kontaktstelle stets die gleiche Kontaktkraft  $F_{K_{Sx}}$  und ist dadurch der einzelne Kontaktwiderstand  $R_{K_{Sx}}$  unabhängig von der Anzahl der Kontaktfedern, so kann der gesamte Kontaktwiderstand berechnet werden:

$$R_{SC} = \frac{1}{n_S} \cdot R_{K_{Sx}} \quad (4.18)$$

Die Steck- und Ziehkräfte sind eine sehr wichtige Eigenschaft von Steckverbinderkontakten. Bei diesem Szenario werden sie stark von der Anzahl der Kontaktstellen beeinflusst. Es ergibt sich eine steigende Ziehkraft  $F_Z$  mit erhöhter Anzahl der Kontaktfedern, da die Ziehkraft proportional der Summe der Kontaktkräfte ist.

### Szenario 3 ( $R_b + R_K$ ( $F_{K_{Sx}} = \text{const.}; F_Z \neq \text{const.}$ ))

Dieses Szenario ist eine Kombination aus Szenario 1 und Szenario 2. Hier werden sowohl der Bahnwiderstand als auch der Kontaktwiderstand berücksichtigt:

$$R_{SC} = \frac{1}{n_S} \cdot R_{K_{Sx}} + \frac{l_S}{\lambda_{el} \cdot h_S} \cdot \frac{1}{(2 \cdot (w_{con\_max} + w_{c_S}) - n_S \cdot w_{c_S})} \quad (4.19)$$

### Szenario 4 ( $R_K$ ( $F_Z = \text{const.}; F_{K_{Sx}} \neq \text{const.}$ ))

Die maximale Anzahl an Steckverbinderkontakten in einem Steckverbinder ist oftmals durch die maximal zulässige Steck- oder Ziehkraft begrenzt [SaSp92]. Ebenso kann die maximal zulässige Ziehkraft auch die maximale Anzahl der Kontaktfedern begrenzen. Daher wird in diesem Szenario von einer konstanten Ziehkraft  $F_Z$  ausgegangen, die unabhängig von der Anzahl der Kontaktfedern ist. In diesem Fall ist die Summe der Kontaktkräfte  $F_{K_{tot}}$  konstant. Bei einer Änderung der Anzahl der Kontaktfedern verändert sich dementsprechend die Kontaktkraft an den Kontaktfedern.

Um den Kontaktwiderstand bzw. Engewiderstand in Abhängigkeit von der Kontaktkraft zu berechnen, werden die elastische Kontaktfläche nach Hertz (Gleichung (6.26)) und das Ellipsoid-Modell nach Holm (Gleichung (2.13)) verwendet. Damit ergibt sich der resultierende Engewiderstand bei mehreren Kontaktpunkten:

$$R_{c\_tot} = \frac{\sqrt[3]{E_s}}{\lambda_{el} \cdot 2 \cdot \sqrt[3]{n_s^2 \cdot \frac{3}{2} \cdot F_{K\_tot} \cdot (1 - \nu^2)} \cdot r_K} \quad (4.20)$$

**Szenario 5 ( $R_b + R_K(F_Z = \text{const.}; F_{K\_Sx} \neq \text{const.})$ )**

Wird zusätzlich zu Szenario 4 der Bahnwiderstand aus Szenario 1 berücksichtigt, ergibt sich daraus Szenario 5. Der Bahnwiderstand und Kontaktwiderstand werden berücksichtigt, wobei die Ziehkraft annähernd konstant bleibt, da die Summe der Kontaktkräfte  $F_{K\_tot}$  konstant ist:

$$R_{SC} = \frac{\sqrt[3]{E_s}}{\lambda_{el} \cdot 2 \cdot \sqrt[3]{n_s^2 \cdot \frac{3}{2} \cdot F_{K\_tot} \cdot (1 - \nu^2)} \cdot r_K} + \frac{l_s}{\lambda_{el} \cdot h_s} \cdot \frac{1}{(2 \cdot (w_{con\_max} + w_{c\_s}) - n_s \cdot w_{c\_s})} \quad (4.21)$$

### 4.3.2 Beispielhafte Berechnung des Einflusses der Anzahl an Kontaktfedern

Die verschiedenen Szenarien aus Kapitel 4.3.1 können dazu verwendet werden, den Einfluss der Anzahl an Kontaktfedern auf den Durchgangswiderstand zu berechnen. Für einen Flachkontakt wird beispielhaft eine konstruktive Auslegung vorgenommen. Die geometrisch-stofflichen Parameter zu dem in Abbildung 4-8 dargestellten Steckverbinderkontakt sind in Tabelle 6-16 (Anhang A6) dargestellt.

Nach der Erstellung des Modells lassen sich in kürzester Zeit Parametervariationen durchführen. Eine vergleichbare FE-Analyse der verschiedenen Parameter würde einen vielfachen Berechnungsaufwand benötigen [BBS14a]. Die Berechnungen für verschiedene Szenarien sind in Abbildung 4-9 dargestellt.

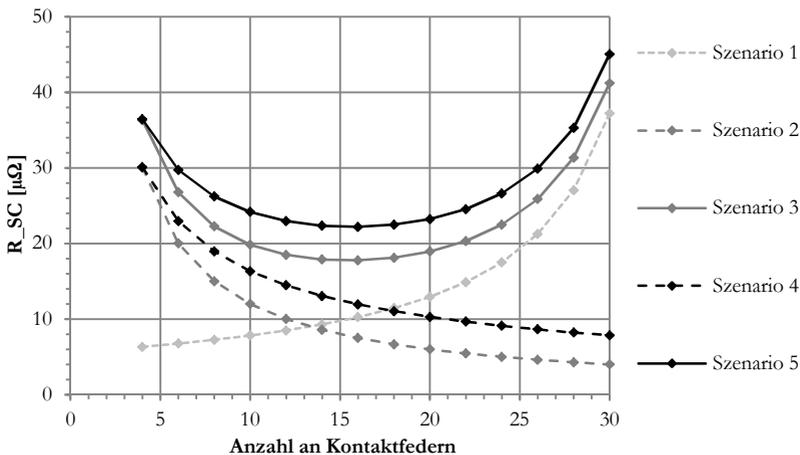


Abbildung 4-9: Einfluss der Anzahl der Kontaktfedern auf den Durchgangswiderstand

Wird nur der Bahnwiderstand bei konstanter Gesamtbreite betrachtet (Szenario 1), so steigt dieser mit zunehmender Anzahl an Kontaktfedern. Der Grund dafür ist die Verringerung des elektrisch leitenden Querschnitts aufgrund der notwendigen Schnitte zwischen den einzelnen Kontaktfedern. Mit zunehmender Anzahl an Kontaktfedern nimmt demgegenüber in Szenario 2 der resultie-

rende Engewiderstand asymptotisch ab. Dabei nimmt der resultierende Engewiderstand stärker ab, wenn die Kontaktkraft an den einzelnen Kontaktstellen konstant auf einem hohen Wert bleibt (Szenario 2). Wenn eine konstante Ziehkraft erzeugt wird (Szenario 4), nimmt die Kontaktkraft mit zunehmender Anzahl an Kontaktfedern weniger stark ab.

Bei Steckverbinderkontakten treten sowohl der Effekt des Bahnwiderstandes als auch der Effekt des Engewiderstandes auf. Diese sind in Szenario 3 und 5 dargestellt. Der Verlauf entspricht einer Badewannenkurve. Zunächst nimmt der Gesamtwiderstand ab. Dabei ist die Abnahme bei den ersten Kontaktfedern am stärksten. In einem weiteren Bereich hat die Änderung der Anzahl an Kontaktfedern nur einen geringen Einfluss auf den Gesamtwiderstand. Bei zu vielen Kontaktfedern steigt der Gesamtwiderstand wieder an, da der resultierende Querschnitt sehr gering wird. Trotz sehr unterschiedlicher Randbedingungen (konstante Kontaktkraft bzw. von der Anzahl der Kontaktfedern abhängige Kontaktkraft) ergibt sich ein ähnlicher Verlauf der Kurven. In Abbildung 4-9 ist zu sehen, dass es in diesem Beispiel ein globales Minimum für die Anzahl der Kontaktfedern gibt. Das Optimum der Kurve kann berechnet werden, indem das Minimum analytisch berechnet wird. Für Szenario 3 wird Gleichung (4.19) hinsichtlich der Anzahl der Kontaktfedern abgeleitet. Daraus lässt sich das globale Minimum berechnen:

$$n_S = \frac{2 \cdot (w_{con\_max} + w_{c\_S})}{\sqrt{\frac{l_S}{\lambda_{el} \cdot h_S} \cdot w_{c\_S} \cdot \frac{1}{R_{K\_Sx}} + w_{c\_S}}} \quad (4.22)$$

### 4.3.3 Restriktionen für die optimale Anzahl an Kontaktfedern

Bezogen auf die Anzahl an Kontaktfedern gibt es bei Steckverbinderkontakten neben dem Durchgangswiderstand weitere fertigungstechnische und funktionale Randbedingungen, die einen Einfluss auf die optimale Anzahl der Kontaktfedern besitzen. Aufgrund folgender Parameter kann nicht immer das theoretisch ermittelte globale Minimum erreicht werden:

- Maximal zulässiger Widerstand
- Minimale Kontaktkräfte
- Verhältnis zwischen Breite und Dicke der Kontaktfedern
- Maximale Auslenkung
- Theoretische Erwärmung in der Kontaktstelle
- Minimale Flächenpressung

Der zulässige Widerstand wird durch den maximalen Durchgangswiderstand bzw. die maximal zulässige Erwärmung vorgegeben. Einfluss darauf hat allerdings auch die elektrische Leitfähigkeit des Basismaterials. Wird eine elastische Verformung der Kontaktstelle angenommen, so nimmt der Gesamtwiderstand proportional zu der elektrischen Leitfähigkeit ab (Gleichung (4.21)).

Abhängig z.B. von der Oberflächenbeschichtung dürfen bestimmte minimale Kontaktkräfte nicht unterschritten werden (Abbildung 2-7). Die minimal zulässige Kontaktkraft stellt ebenfalls eine mögliche Restriktion dar, welche in Abbildung 4-10 dargestellt ist. Um eine ausreichende Kontaktkraft zu erzeugen und um die Kontaktfedern fertigungstechnisch herstellen zu können, dürfen die Kontaktfedern nicht zu schmal sein. Dies kann durch das Verhältnis zwischen Breite und Dicke überprüft werden. Wenn z.B. ein minimales Verhältnis von 2 vorgegeben wird, dürften in dem Beispiel aus Abbildung 4-10 nicht mehr als 10 Kontaktfedern realisiert werden.

Zur Erzeugung der Kontaktkraft ist bei vorgegebener Federkonstante eine spezifische Auslenkung der Kontaktfeder notwendig. Die maximale Auslenkung ist durch die Dicke des Kontaktstiftes limitiert. Mit zunehmender Anzahl der Kontaktfedern nimmt die Breite der einzelnen Kontaktfedern aufgrund der geforderten Schnittbreite überproportional ab.

Um eine konstante Gesamtkraft zu bekommen, müssen die einzelnen Kontaktfedern stärker vorgespannt werden. Dieses führt zu einer notwendigen Erhöhung der Auslenkung. Allerdings kann die maximale Auslenkung bei Flachkontakten nur der halben Dicke des Kontaktstiftes entsprechen.

Auch die theoretische Erwärmung in der Kontaktstelle, die abhängig von dem Kontaktwiderstand und dem Strom ist (Gleichung (3.37)), kann in Abhängigkeit zu der Anzahl der Kontaktfedern dargestellt werden.

In Abbildung 4-10 ist ein Beispiel dargestellt, bei dem die Ziehkraft konstant gehalten wird (Szenario 3 in Abbildung 4-9). Die verschiedenen Restriktionen können über die Anzahl der Kontaktfedern aufgetragen werden. Das Kriterium, welches zuerst eintritt, ist ausschlaggebend für die Beschränkung der minimalen und maximalen Anzahl der Kontaktfedern. Fertigungstechnisch sollten so wenige Kontaktfedern wie möglich realisiert werden. Zudem ist eine Abwägung zwischen Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit oder Erhöhung der Anzahl an Kontaktfedern zu treffen. Unter der Berücksichtigung verschiedener Restriktionen wird ein Fenster mit möglichen Lösungen aufgezeigt (rote Umrandung).

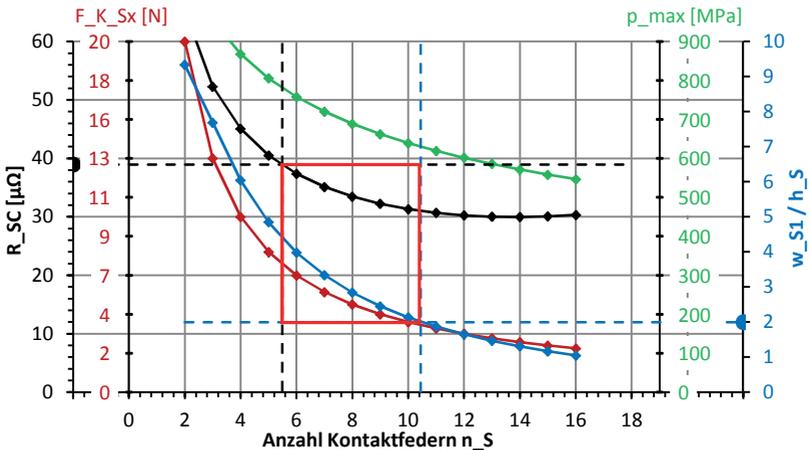


Abbildung 4-10: Restriktionen bei der Anzahl der Kontaktfedern ( $r_{1S}$ : 7 mm;  $r_{aS}$ : 8,9 mm;  $l_S$ : 38 mm;  $w_{cS}$ : 1,5 mm;  $r_K$ : 4 mm;  $\lambda_{el,con}$ : 56 MS/m)

#### 4.4 Sensitivitätsanalyse bezüglich der Erwärmung von Steckverbinderkontakten

Im Folgenden wird mit Hilfe des analytischen Gesamtmodells (Kapitel 3.8 und [BBS14c]) eine Sensitivitätsanalyse bezüglich der Erwärmung durchgeführt.

Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse kann der Einfluss wichtiger Parameter wie z.B. der Änderung der Kontaktkraft, des Kontaktwiderstandes oder des Emissionsgrades auf die Erwärmung systematisch untersucht werden. Die Sensitivitätsanalyse kann des Weiteren für folgende Zielstellungen verwendet werden:

- Ableitung von konstruktiven Maßnahmen bzw. Optimierungen
- Verständnis des Systems
- Darstellung der Unschärfe von Berechnungen
- Identifikation kritischer Einflussparameter
- Untersuchung von Toleranzen
- Untersuchung des Einflusses der Alterung
- Untersuchung der Auswirkung möglicher Fehler

In [Bre99] und [Bre09] wurde mit Hilfe der FE-Analyse und der analytischen Berechnung eine Sensitivitätsanalyse der Stromtragfähigkeit durchgeführt. Im Rahmen der Studie wurden für zwei unterschiedliche Steckverbinder mit Gehäuse wichtige Einflussparameter geändert. Die Sensitivitätsanalyse ist allerdings stark von dem jeweiligen System und von dem Arbeitspunkt abhängig. Daher kann sie nicht verallgemeinert werden. Am Beispiel eines Flachkontaktes mit den Parametern aus Tabelle 6-17 wird die Untersuchung durchgeführt. Dazu werden die Parameter isoliert betrachtet. Das Referenzmuster (100 %) hat die in Tabelle 6-19 (Anhang A6) dargestellten Parameter. Folgende Parameter werden in physikalisch sinnvollen Bereichen variiert:

- Emissionsgrad
- Konvektive Wärmeübergang
- Kontaktwiderstand
- Kontaktkraft
- Elektrische Leitfähigkeit

In Abbildung 4-11 sind die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse dargestellt. Es ist erkennbar, dass die Parameter einen unterschiedlich starken Einfluss besitzen. Es sind sowohl nahezu lineare, als auch stark nichtlineare Abhängigkeiten erkennbar. Zudem ist der prozentuale Einfluss auf die Erwärmung nicht symmetrisch zu dem Arbeitspunkt.

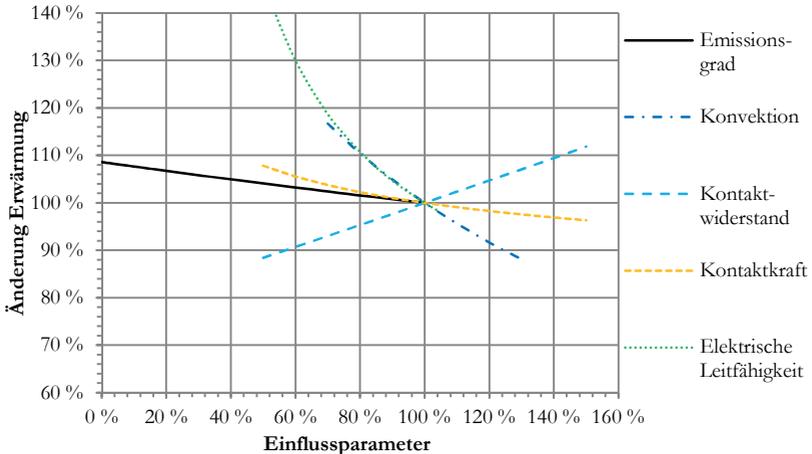


Abbildung 4-11: Einfluss ausgewählter Parameter auf die Erwärmung

Bei Steckverbinderkontakten kann sich der Emissionsgrad  $\epsilon$  je nach Zustand der Oberfläche ändern. Saubere, metallische Oberflächen haben einen sehr geringen Emissionsgrad (Silber poliert: 0,01; Kupfer poliert: 0,03 [New01]), der gegen null tendieren kann. Im Betrieb oder durch Alterung kann sich der Emissionsgrad z.B. durch Oxidbildung, Öle oder Fremdschichten erhöhen, wodurch die Wärmeabfuhr aufgrund von Wärmestrahlung verbessert wird (Kupfer oxidiert: 0,78; Öl: 0,72 [New01]). Bei lackierten Steckverbinderkontakten liegt der Emissionsgrad bei 0,92. Im Rahmen der Sensitivitätsbetrachtung wird der Emissionsgrad in dem Bereich von 0 bis 1 variiert. Dabei wird nur der Emissionsgrad von dem Steckverbinderkontakt und dem Leiteranschlusssystem geändert. Der Emissionsgrad der angeschlossenen Leitungen liegt aufgrund der Isolierung bei etwa 0,92 und wird nicht geändert. Eine Änderung des Emissionsgrades von Steckverbinderkontakt und Leiteranschlusssystem

hat einen Einfluss auf die Erwärmung. Da die Wärmestrahlung der Leitung konstant gehalten wird, ist dieser Einfluss allerdings relativ gering. Für den Steckverbinderkontakt, der frei in Luft angeordnet ist, kann eine blanke Oberfläche mit einem Emissionsgrad von null theoretisch zu einer 9 % höheren Erwärmung führen als eine lackierte Oberfläche mit einem Emissionsgrad von 0,92.

Der konvektive Wärmeübergang kann konstruktiv nur sehr schwer beeinflusst werden (Tabelle 3-1). Die Genauigkeit der Berechnung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten liegt bei bis zu  $\pm 20 - 30 \%$ . In diesem Bereich soll der Einfluss auf die Erwärmung untersucht werden. Der konvektive Wärmeübergang wird an allen Bauelementen inkl. der Leitung variiert. Eine Verringerung der Wärmekonvektion um 30 % führt zu einer Erhöhung der Erwärmung um 17 %. Eine Erhöhung der Wärmekonvektion um 30 % führt zu einer Verringerung der Temperatur um 12 %.

Der Kontaktwiderstand kann sich im Betrieb unter anderem durch eine Verringerung der Kontaktkraft oder durch Fremdschichtwachstum ändern. Auch für konstruktive Änderungen eines bestehenden Systems ist es oftmals hilfreich im Vorhinein den Einfluss einer Widerstandsänderung auf die Erwärmung zu untersuchen. Beispiele dafür sind das Aufbringen einer anderen Oberflächenbeschichtung oder einer Ni-Zwischenschicht und die Änderung der Dicke von Oberflächenbeschichtungen. In der Norm DIN EN 61984 wird z.B. bei den Produktprüfungen eine Änderung von bis zu 50 % des Ausgangswertes zugelassen [DIN09a]. Der Kontaktwiderstand wird in dem Bereich  $\pm 50 \%$  untersucht, was einem Wert von  $65 \mu\Omega - 204 \mu\Omega$  entspricht. Der Kontaktwiderstand hat einen nahezu linearen Einfluss auf die Erwärmung. Dieses lässt sich damit begründen, dass die Temperaturdifferenz zwischen Steckverbinderkontakt und Leitung direkt proportional zu dem zugeführten Wärmestrom ist (Gleichung (4.6)). Der Wärmestrom ist wiederum proportional zu der Verlustleistung im Steckverbinderkontakt (Gleichung (4.9)).

Durch Relaxation kann sich die Kontaktkraft im Betrieb ändern. Bei einer plastischen Verformung der Kontaktstelle ist eine Änderung der Kontaktkraft weniger kritisch, da durch die Hysterese eine Änderung der Kontaktkraft zunächst nur zu einer geringen Änderung des Kontaktwiderstandes führt. Bei der

Annahme einer elastischen Verformung führt eine Kontaktkraftänderung direkt zu einer Änderung des Kontaktwiderstandes. Die Kontaktkraft wird für die Sensitivitätsanalyse um  $\pm 50\%$  variiert, was eine Kontaktkraft in dem Bereich 5,9 N - 17,8 N bedeutet und einen sehr weiten Bereich darstellt. Der angenommene Arbeitspunkt ist ausschlaggebend für den Einfluss der Kontaktkraft auf den Kontaktwiderstand bzw. die Erwärmung. In diesem Beispiel besitzen die Steckverbinderkontakte eine hohe Kontaktkraft. Sie befinden sich im stabilen Bereich und die kritische Kontaktkraft ist überschritten (Abbildung 2-7). Dadurch hat eine Änderung der Kontaktkraft nur einen geringen Einfluss auf den Kontaktwiderstand und auf die Erwärmung. Eine um 50 % erhöhte Kontaktkraft führt nur zu einer 4 % verringerten Erwärmung. Eine 50 % verringerte Kontaktkraft führt zu einer 8 % höheren Erwärmung. Damit hat eine mögliche Relaxation einen geringen Einfluss, zumal die Hysterese nicht betrachtet wird.

In [Mro98 S.4] wird für Steckverbinderkontakte der Leistungsübertragung eine elektrische Leitfähigkeit  $> 40 \text{ MS/m}$  empfohlen. Allerdings können auch Kupferlegierungen mit geringerer elektrischer Leitfähigkeit oder Aluminiumlegierungen verwendet werden. Im Rahmen der konstruktiven Auslegung muss stets ein Kompromiss zwischen elektrischer Leitfähigkeit und mechanischen Eigenschaften gefunden werden. Kupferwerkstoffe mit einer geringeren elektrischen Leitfähigkeit haben im Gegensatz zu hoch leitfähigen Werkstoffen typischerweise sowohl preisliche als auch fertigungstechnische Vorteile. Daher ist die Betrachtung des Einflusses der elektrischen Leitfähigkeit auf die Erwärmung ein wichtiger Punkt bei der Dimensionierung und Optimierung von Steckverbinderkontakten. Des Weiteren gibt es verschiedene Gründe, bei einer bestehenden Bauteilgeometrie das Basismaterial zu ändern. Diese können z.B. mögliche Kosteneinsparungen durch ein günstigeren Werkstoff sein oder Änderungen in Vorschriften. Die EU-Richtlinie 2011/65/EU (RoHS) [EU11] beschränkt z.B. die Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektroenergie-technik. Zu den beschränkten Stoffen zählt u.a. Blei, was besonders in Kupferlegierungen für die spanende Verarbeitung verwendet wird. Dadurch müssen auch bei Steckverbinderkontakten bleihaltige Kupferwerkstoffe durch bleifreie Kupferwerkstoffe ersetzt werden. Dies beeinflusst

neben der Fertigung auch die elektrische Leitfähigkeit des Basismaterials. Eine Halbierung der elektrischen Leitfähigkeit führt in dem Beispiel bei ansonsten gleichen Parametern zu einer 47 % höheren Temperatur. Bei diesem System kann die Leitfähigkeit nicht mehr wesentlich erhöht werden. Wenn eine spezifische Grenztemperatur vorgegeben ist, kann die minimal notwendige elektrische Leitfähigkeit für den Steckverbinderkontakt ermittelt werden und dadurch der Werkstoff mit den optimalen Eigenschaften verwendet werden.

In Abbildung 4-12 ist der Einfluss der elektrischen Leitfähigkeit an dem Beispiel des flachen Steckverbinderkontaktes mit zwei Kontaktfedern dargestellt. Die Geometrie des Steckverbinderkontaktes wird nicht geändert. Wenn eine spezifische Grenztemperatur vorgegeben wird, kann das Basismaterial unter Gesichtspunkten der elektrischen Leitfähigkeit entsprechend ausgewählt werden.

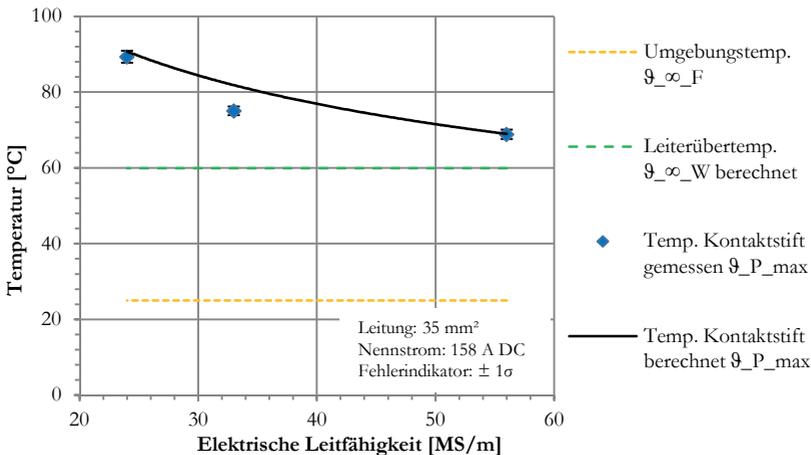


Abbildung 4-12: Einfluss der elektrischen Leitfähigkeit auf die Erwärmung

Für die konstruktive Auslegung von Steckverbinderkontakten und für ein Verständnis des Systems können zusätzlich verschiedene Fragestellungen und Einflüsse mit Hilfe der Modelle untersucht werden. Diese sind beispielhaft im Anhang A7 aufgeführt.

## **5 Vorgehen zur konstruktiven Auslegung von Steckverbinderkontakten**

Anhand der in Kapitel 2 bis 4 beschriebenen Modelle und Überlegungen lässt sich ein systematisches und berechnungsgestütztes Vorgehen bei der konstruktiven Auslegung von Steckverbinderkontakten ableiten. Dadurch können in der Phase der Grobgestaltung, ähnlich wie bei Schrauben, individuelle Steckverbinderkontakte als skalierbare Baureihen mit angepassten Eigenschaften und einer grenzwertigen Auslegungen entwickelt werden. Zudem lässt sich eine einheitliche Entwurfsmethodik anwenden. Mit Hilfe der verschiedenen parametrisierten Modelle können schließlich die geometrisch-stofflichen Parameter in einer guten Näherung berechnet werden. Dies wurde in [BBS15a, BBS16] gezeigt.

In Abbildung 5-1 ist der Ablauf bei der thermischen Auslegung von Steckverbinderkontakten dargestellt. Dabei handelt es sich um einen zweistufigen Prozess. Zunächst wird in der ersten Stufe die maximal zulässige Verlustleistung des Steckverbinderkontaktes ermittelt. Anschließend werden in der zweiten Stufe die Widerstände den verschiedenen Bereichen zugeordnet.

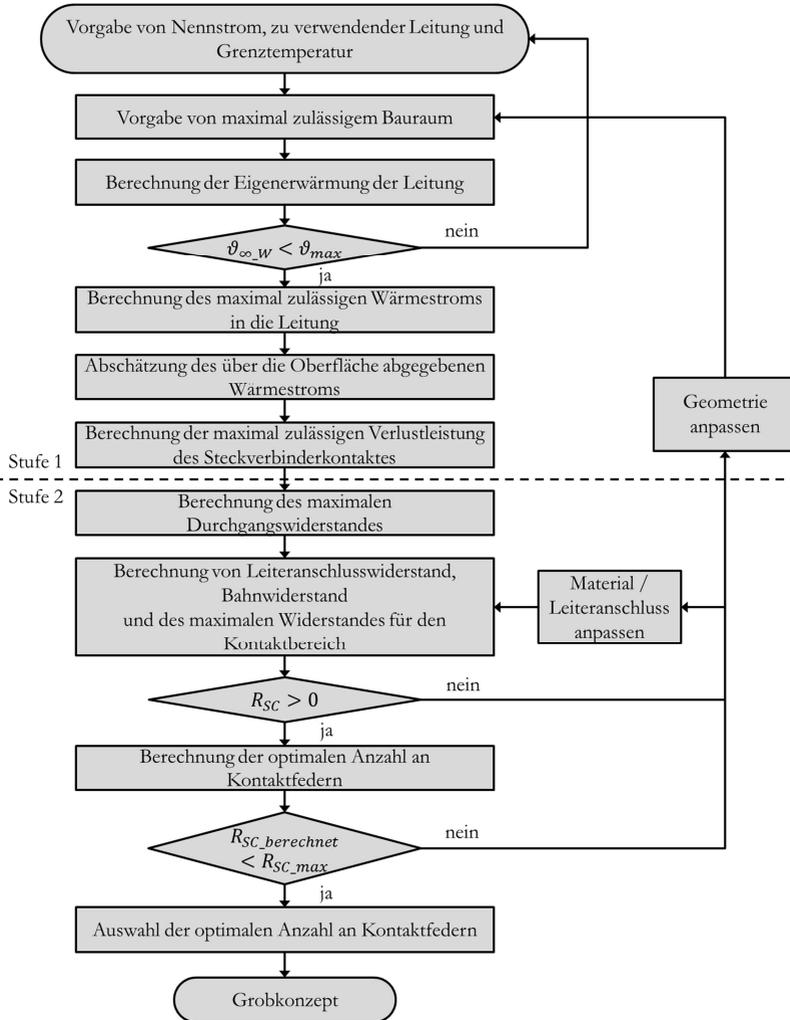


Abbildung 5-1: Ablauf bei der thermischen Auslegung von Steckverbinderkontakten

Dem Ablauf aus Abbildung 5-1 werden in Abbildung 5-2 und Abbildung 5-3 die parametrisierten Modelle zugeordnet. Diese sind für die Berechnung notwendig und wurden in den verschiedenen Kapiteln erläutert. Parametrisierte

Modelle, die innerhalb dieser Arbeit entwickelt wurden, sind mit einem roten Rahmen gekennzeichnet. Eingangs- und Ausgangsgrößen der parametrisierten Modelle sind durch Pfeile dargestellt.

In der ersten Stufe (Abbildung 5-2) wird die maximal zulässige Verlustleistung eines Steckverbinderkontaktes  $P_{con\_max}$  berechnet.

Die Steckverbinderkontakte sollen hinsichtlich einer bestimmten Stromtragfähigkeit ausgelegt werden. Deshalb müssen folgende Parameter vorgegeben werden, welche oftmals durch Kundenanforderungen definiert sind:

Zulässiger Bauraum

Zu übertragender Nennstrom  $I_N$

Zu verwendende Leitung  $A_{x\_W}$

Maximal zulässige Temperatur  $\vartheta_{max}$  bei vorgegebener Umgebungstemperatur  $\vartheta_{\infty\_F}$

Maximale Ziehkraft  $F_{Z\_max}$

Geometrische und stoffliche Parameter wie z.B. der Querschnitt  $A_{x\_W}$  und die elektrische Leitfähigkeit von dem Basismaterial des Leiters  $\lambda_{el\_W}$ , sind meistens im Vorhinein bekannt. Zunächst wird aus den Vorgaben die Leiterüber-temperatur  $\Delta\vartheta_{\infty\_W}$  berechnet. Ist diese bekannt, so lässt sich die maximal zulässige Temperaturdifferenz am Leiter  $\Delta\vartheta_{W\_con}$  ermitteln, welche durch den axialen Wärmestrom des Steckverbinderkontaktes zusätzlich erzeugt werden darf, bevor die maximal zulässige Grenztemperatur  $\vartheta_{max}$  überschritten wird. Dadurch kann für verschiedene Leitungsquerschnitte und Nennströme stets eine grenzwertige Konstruktion ausgelegt werden.

Bei vorgegebener Temperaturdifferenz am Leiter  $\Delta\vartheta_{W\_con}$  kann der maximal zulässige Wärmestrom in den Leiter  $\dot{Q}_{cnd\_W\_max}$  berechnet werden. Um die maximal zulässige Verlustleistung des Steckverbinderkontaktes  $P_{con\_max}$  zu ermitteln, muss zusätzlich der über die Oberfläche des Steckverbinderkontaktes abgegebene Wärmestrom  $\dot{Q}_{d\_con}$  berücksichtigt werden.

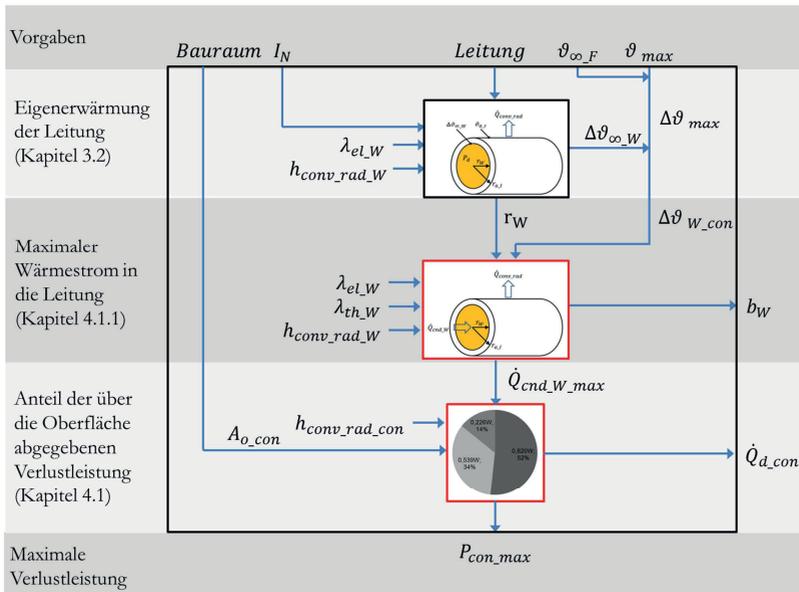


Abbildung 5-2: Parametrisierte Modelle zur systematischen Auslegung der maximal zulässigen Verlustleistung eines Steckverbinderkontaktes, Stufe 1

Aus der maximal zulässigen Verlustleistung des Steckverbinderkontaktes  $P_{con,max}$  kann in der zweiten Stufe (Abbildung 5-3) der maximal zulässige Durchgangswiderstand  $R_{con,max}$  berechnet werden. Der Durchgangswiderstand von Steckverbinderkontakten teilt sich in unterschiedliche Teilwiderstände auf. Bereiche, welche von dem Entwickler nur wenig beeinflusst werden können, sollten zuerst abgeschätzt werden. Einige Bereiche können mit einer guten Näherung analytisch berechnet werden. Dazu zählt der Bahnwiderstand  $R_b$ . Der Leiteranschlusswiderstand  $R_T$  ist hingegen von verschiedenen Einflussparametern abhängig. Daher ist es schwierig den absoluten Leiteranschlusswiderstand vorherzusagen. Dieser kann z.B. über den Gütefaktor grob abgeschätzt werden.

Wenn der Bahnwiderstand und der Leiteranschlusswiderstand berechnet wurden, darf der verbleibende Widerstand von dem Widerstand der Kontakt-

federn und den Kontaktstellen  $R_{SC}$  nicht überschritten werden. Um den Widerstand in Abhängigkeit von der Anzahl an Kontaktfedern zu berechnen, müssen geeignete Restriktionen wie z.B. eine maximal zulässige Breite  $w_{c,S}$  und eine maximal zulässige Ziehkraft  $F_{Z,max}$  vorgegeben werden. Dadurch wird die optimale Anzahl an Kontaktfedern  $n_S$  ermittelt

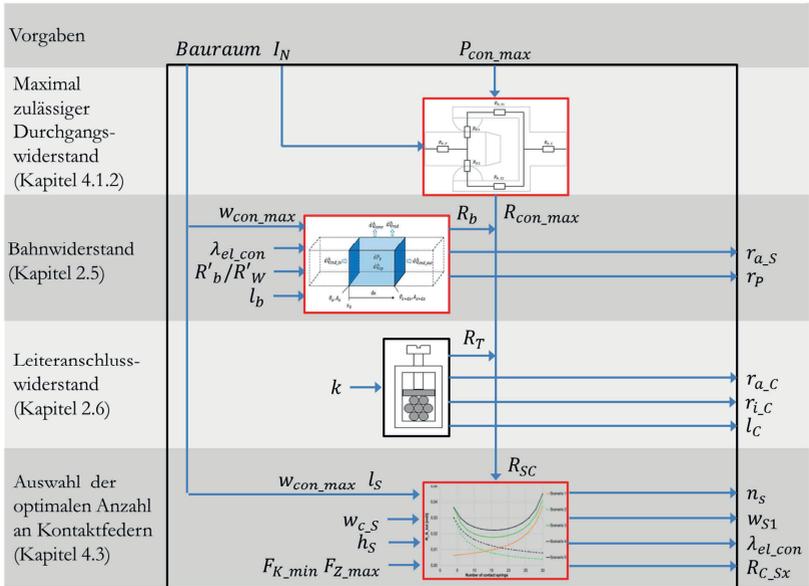


Abbildung 5-3: Vorgehen zur systematischen Auslegung des Widerstandes eines Steckverbinderkontaktes, Stufe 2

Durch das gezeigte Vorgehen ist eine Berechnung der wichtigsten geometrisch-stofflichen Parameter für ein Grobkonzept von Steckverbinderkontakten möglich.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Stromtragfähigkeit ist eine sehr wichtige Eigenschaft von Steckverbindern für die Leistungsübertragung. Im Rahmen der konstruktiven Auslegung müssen Steckverbinderkontakte so ausgelegt werden, dass die Stromerwärmung eine vorgegebene Grenztemperatur nicht überschreitet.

Die Erwärmung von elektrischen Bauelementen wird in den meisten Fällen numerisch mit der FE-Analyse oder mit Hilfe der Wärmenetzmethode berechnet. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Stromerwärmung von Steckverbinderkontakten rein analytisch berechnet. Zudem wurde eine systematische und berechnungsgestützte Vorgehensweise zur thermischen Auslegung von Steckverbinderkontakten erarbeitet.

Zunächst wurden analytische Modelle aus der Literatur vorgestellt, mit denen die Kontaktkraft, die Kontaktfläche, der Engewiderstand, die Verlustleistung, die spezifischen Wärmeübergangskoeffizienten und die Erwärmung berechnet werden können. Typische Parameter für Steckverbinderkontakte und vereinfachende Annahmen der Modelle wurden aufgezeigt und bewertet.

Mit einem FE-Modell des elektrischen Kontaktes wurde der Einfluss verschiedener Materialmodelle (elastisch, elastisch-ideal-plastisch und elastisch-plastisch) auf die Kontaktfläche berechnet. Dazu wurden aus einem gemessenen Spannungs-Dehnungs-Diagramm die Materialparameter extrahiert. Zudem wurden verschiedene Simulationsbedingungen (Einfluss der Netzfeinheit und Kontaktkraft) dargestellt, um zusätzlich die Vereinfachungen zu bewerten und Unterschiede zwischen analytisch berechneten und simulierten Ergebnissen darzustellen. Die Kontaktfläche von idealisierten sphärischen Geometrien konnte anstatt mit aufwendigen und zeitintensiven FE-Analysen auch analytisch mit einem Tabellenkalkulationsprogramm berechnet werden. Auch die Verteilung der elektrischen Spannung im Kontaktpunkt wurde durch FE-Analysen und analytische Berechnungen ermittelt. Der Vergleich zeigt eine gute Übereinstimmung bei den ellipsenförmigen Äquipotentialflächen.

Der berechnete Kontaktwiderstand wurde zudem mit experimentell ermittelten Werten verglichen. Für den Sonderfall einer sphärischen Kontakthälfte mit Goldoberfläche können bei erhöhten Kontaktkräften (ab etwa 5 N) der Enge-widerstand mit dem Ellipsoid-Modell nach Holm und die Kontaktfläche mit elastisch-ideal-plastischem Materialverhalten mit dem Modell nach Jackson und Green gut approximiert werden. Der Fokus dieser Arbeit liegt nicht darin, den Kontaktwiderstand für verschiedene Einflussparameter möglichst genau zu ermitteln. Es wurde eine Anordnung mit definierten Bedingungen (vergoldeter Kontakt mit hoher Kontaktkraft) gewählt, um reproduzierbare und berechenbare Werte als Eingangsgrößen für das thermische Gesamtmodell zu bekommen.

Um die Erwärmung von Steckverbinderkontakten incl. der angeschlossenen Leitung analytisch berechnen und optimieren zu können, wurden schließlich die verschiedenen physikalischen Phänomene auf mathematisch-physikalischer Abstraktionsebene zu einem Gesamtmodell gekoppelt. Die Kopplung der elektrischen mit den thermischen Eigenschaften fand über die Leistungsbilanz an einem Volumenelement statt. Es wurde eine Differenzialgleichung zweiter Ordnung aufgestellt und für Spezialfälle wurden analytische Lösungen berechnet. Unter Berücksichtigung von geeigneten Randbedingungen in Form von Wärmeströmen zwischen den Bauteilen ließ sich die Erwärmung des Gesamtsystems berechnen.

Wichtig für die Abfuhr der Wärme über die Oberfläche des Steckverbinderkontaktes ist die Kenntnis der Wärmeübergangskoeffizienten. Daher wurden die Wärmeübergangskoeffizienten von Konvektion und Strahlung für verschiedene geometrische Anordnungen berechnet. Die Bauteiltemperatur, die Bauteilgeometrie, die charakteristische Länge der Bauteile und der Zustand der Oberfläche müssen für die Berechnung berücksichtigt werden.

Das Gesamtmodell zur Berechnung der Erwärmung wurde ebenfalls durch Experimente verifiziert. Dazu wurden Steckverbinderkontakte gebaut, die eine gleiche Geometrie besitzen, sich jedoch in dem Basismaterial unterscheiden. Die Experimente haben gezeigt, dass die Erwärmung verschiedener Steckverbinderkontakte analytisch berechnet werden kann. Die Temperaturdifferenz zwischen gemessenen und berechneten Werten lag bei maximal 5 K.

Aufgrund der Erkenntnisse wurden den verschiedenen Konstruktionsphasen Berechnungsmethoden (analytische Berechnung und FE-Analyse) zugeordnet und bewertet. Speziell in der frühen Phase des Konstruktionsprozesses von Steckverbinderkontakten können viele wichtige Erkenntnisse mit der analytischen Methode ermittelt werden.

Im Gegensatz zu der traditionell verwendeten FE-Analyse sind durch analytische Gleichungen die Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen geometrisch-stofflichen Parametern und den Eigenschaften ersichtlich. Zudem ist eine einfache Berechnung durch ein Tabellenkalkulationsprogramm möglich. Dadurch sind weder ein teures Simulationsprogramm, noch fachspezifische Kenntnisse mit dem Simulationsprogramm nötig und die Berechnungszeit wird wesentlich verkürzt. Weil für das analytische Modell allgemeingültige Gleichungen verwendet wurden, ist mit dem Modell eine Skalierung in weiten Bereichen durchführbar. Zudem ist eine schnelle Parametervariation und Sensitivitätsbetrachtung möglich, was für eine systematische Optimierung und als Entscheidungsgrundlage im Rahmen der konstruktiven Auslegung dienen kann. Die durchgeführte Sensitivitätsanalyse zeigte eindeutig den Einfluss verschiedener konstruktiver Parameter auf die Erwärmung. Damit stellt das analytische Modell ein zusätzliches Hilfswerkzeug für die Unterstützung des Entwicklers in dem Konstruktionsprozess dar.

Im zweiten Teil der Arbeit wurden mit Hilfe von parametrisierten Modellen grundlegende Fragestellungen zur Erwärmung von Steckverbinderkontakten berechnet, die wesentlich für die konstruktive Auslegung sind.

Zunächst wurde der Einfluss der elektrischen Leitfähigkeit des Basismaterials auf die Erwärmung von Steckverbinderkontakten berechnet und experimentell untersucht. Damit können bei einer vorgegebenen Bauteilgeometrie die Mindestanforderungen an die elektrische Leitfähigkeit ermittelt werden.

Auch der Einfluss der Anzahl an Kontaktfedern auf den Widerstand des Steckverbinderkontaktes wurde systematisch untersucht. Dazu wurden bestehende Modelle erweitert und umgeformt, damit die Abhängigkeit zwischen Widerstand und Anzahl an Kontaktfedern berechnet werden kann. Im Gegensatz zu vorherigen Arbeiten wurde der Bahnwiderstand der Kontaktfedern

berücksichtigt. Es konnte gezeigt werden, dass für Steckverbinderkontakte mit beschränktem Bauraum zu viele Kontaktfedern einen negativen Effekt auf den Durchgangswiderstand haben. Unter der Verwendung geeigneter Restriktionen kann der Lösungsraum zur Auswahl der optimalen Anzahl an Kontaktfedern eingeschränkt werden, um eine Entscheidungshilfe für die optimale Anzahl an Kontaktfedern zu geben.

Bei der Erwärmung ist stets das Gesamtsystem zu betrachten. Die angeschlossene Leitung ist ein wesentliches Element im Rahmen der konstruktiven Auslegung von Steckverbinderkontakten. Der axiale Wärmestrom in die Leitung wurde in dieser Arbeit zur Dimensionierung verwendet. Dadurch lässt sich der maximal zulässige Durchgangswiderstand von Steckverbinderkontakten berechnen. Wenn dieser vorgegeben ist, kann der Steckverbinderkontakt in einfacher Weise elektrisch und mechanisch ausgelegt werden. Als Erweiterung wurden Modelle abgeleitet, um bei verschiedenen Leitungsquerschnitten den Einfluss des Durchgangswiderstandes auf die Erwärmung darzustellen. Zudem konnte der Zusammenhang zwischen Durchgangswiderstand, Stromstärke, angeschlossener Leitung und der Erwärmung des Steckverbinderkontaktes aufgezeigt werden. Demzufolge kann die Stromtragfähigkeit eines Steckverbinderkontaktes mit hohem Durchgangswiderstand selbst durch einen viel größeren Leitungsquerschnitt nicht erheblich verbessert werden.

Die Wärmeerzeugung und die Wärmeabfuhr sind nichtlineare Prozesse, bei denen eine Extrapolation schwierig vorherzusagen ist. Deshalb wurde zur thermischen Auslegung von Steckverbinderkontakten eine systematische und berechnungsgestützte Vorgehensweise aufgezeigt, welche die wesentlichen Schritte und Überlegungen berücksichtigt. Dieses nutzt die beschriebenen parametrisierten Modelle, sodass eine skalierbare Baureihenkonstruktion von Steckverbinderkontakten für verschiedene Stromstärken möglich ist. Dadurch können optimierte elektrische Steckverbinderkontakte ausgelegt werden, die bei vorgegebenem Nennstrom stets die gleiche Grenztemperatur erreichen sollen. Die Arbeit stellt damit einen Ansatz zur parametrischen Konstruktion von Steckverbindern dar. Mit den parametrisierten Modellen zur konstruktiven Auslegung von Steckverbinderkontakten ist eine schnelle und zuverlässige Generierung von Grobkonzepten möglich. Im Anhang A8 werden beispielhaft

Rundkontakte für verschiedene Stromstärken konstruktiv ausgelegt. Von dem Entwickler müssen nur noch wenige Parameter und Randbedingungen vorgegeben werden. Anschließend findet eine automatische Berechnung der geometrischen und stofflichen Parameter statt. Dadurch ist eine rationelle Optimierung des Systems möglich. Aufgrund der Baureihenkonstruktion lässt sich die Teilevielfalt unterschiedlicher Arten von Steckverbinderkontakten verringern. Gleichzeitig können die Anzahl an Produktvarianten und die Produktqualität erhöht werden. Zudem ist eine schnelle Reaktion bei neuen konstruktiven Auslegungen möglich.

Der Steckverbinderkontakt wurde im Rahmen dieser Arbeit vereinfacht betrachtet. Da der Kontaktwiderstand einen großen Einfluss auf die Genauigkeit der Ergebnisse hat, sollte dieser in Bezug auf z.B. Fremdschichten, Oberflächenbeschichtungen oder Veränderungen im Betrieb untersucht und mathematisch beschrieben werden. Zudem kann im Gegensatz zu dem Fall eines frei in Luft getesteten Bauteils das Gehäuse von Steckverbindern unter Berücksichtigung von thermischen Widerständen modelliert werden.

## Formelzeichen und Abkürzungen

### Lateinische Buchstaben

Symbol	Physikalische Größe
<b>A</b>	Fläche, allgemein
<i>a</i>	Radius einer kreisförmigen Kontaktfläche, allgemein Große Halbachse einer elliptischen Kontaktfläche Konstante in einer Differenzialgleichung
<i>a</i> <sub>1</sub>	Konstante
<i>a</i> <sub>2</sub>	Konstante
<i>a</i> <sub>el,K/E</sub>	Radius einer kreisförmigen Kontaktfläche eines rein elastischen verformten Kontaktes bei der Kombination Kugel/Ebene
<i>A</i> <sub>el,pl</sub>	Elastisch-plastische Kontaktfläche
<i>A</i> <sub>F</sub>	Angepasste Kontaktfläche
<i>A</i> <sub>O</sub>	Wärmeabgebende Oberfläche eines Bauelements
<i>A</i> <sub>O,1</sub>	Oberfläche von Bauelement 1
<i>A</i> <sub>O,2</sub>	Oberfläche von Bauelement 2
<i>A</i> <sub>O,con</sub>	Oberfläche eines Steckverbinderkontaktes
<i>a</i> <sub>pl</sub>	Radius einer kreisförmigen Kontaktfläche eines rein plastischen verformten Kontaktes
<i>A</i> <sub>s</sub>	Scheinbare Kontaktfläche
<i>A</i> <sub>t</sub>	Tragende Kontaktfläche
<i>A</i> <sub>w</sub>	Wirksame Kontaktfläche
<i>A</i> <sub>x</sub>	Elektrisch bzw. thermisch leitender Querschnitt
<i>A</i> <sub>x+dx</sub>	Elektrisch bzw. thermisch leitender Querschnitt an der Stelle dx
<i>A</i> <sub>x,b</sub>	Elektrisch bzw. thermisch leitender Querschnitt des Bahnbereiches
<i>A</i> <sub>x,p</sub>	Elektrisch bzw. thermisch leitender Querschnitt des Kontaktstiftes
<i>A</i> <sub>x,w</sub>	Elektrisch bzw. thermisch leitender Querschnitt der Leitung
<b>B</b>	Empirisch ermittelter Koeffizient
<i>b</i>	Thermische Ortskonstante, allgemein Kleine Halbachse einer elliptischen Kontaktfläche Konstante in einer Differenzialgleichung
<i>b</i> <sub>p</sub>	Thermische Ortskonstante des Kontaktstiftes
<i>b</i> <sub>T</sub>	Thermische Ortskonstante des Leiteranschlussystems
<i>b</i> <sub>w</sub>	Thermische Ortskonstante der Leitung

<b>C</b>	Empirisch ermittelter Koeffizient Federkonstante, allgemein Werkstoff-, geometrie- und temperaturabhängige Konstante für die Erwärmung Konstante in einer Differenzialgleichung
$c_1$	Empirisch ermittelter Koeffizient für natürliche Konvektion
$c_p$	Wärmekapazität
$C_{S1}$	Federkonstante einer Kontaktfeder
$C(x)$	Federrate
<b>d</b>	Durchmesser, allgemein
$dP_b$	Differenzielle Verlustleistung
$d\dot{Q}_{cnd\_in}$	In das Volumenelement zugeführter differenzieller Wärmestrom aufgrund von Wärmeleitung
$d\dot{Q}_{cnd\_out}$	Aus dem Volumenelement austretender differenzieller Wärmestrom aufgrund von Wärmeleitung
$d\dot{Q}_{conv}$	Differenzieller Wärmestrom aufgrund von Wärmekonvektion
$d\dot{Q}_{conv\_rad}$	Differenzieller Wärmestrom aufgrund von Wärmekonvektion und Wärmestrahlung
$d\dot{Q}_{cp}$	Differenzielle gespeicherte Wärme
$d\dot{Q}_{rad}$	Differenzieller Wärmestrom aufgrund von Wärmestrahlung
<b>E</b>	Elastizitätsmodul, allgemein Abstand von der Wärmequelle, bei dem der Wärmestrom als abgeklungen betrachtet werden kann
$e_{1,2}$	Maximaler Abstand zwischen der neutralen Faser und der Randfaser
$E'$	Resultierendes Elastizitätsmodul
$E_S$	Elastizitätsmodul des Basismaterials der Kontaktfeder
$e_y$	Abstand der Y-Achse zu dem Schwerpunkt eines Körpers Uniaxiale Dehngrenze
<b>F</b>	Kraft, allgemein
$f_1(Pr)$	Einfluss der Prandtl-Zahl
$f_2(Pr)$	Einfluss der Prandtl-Zahl
$f_3(Pr)$	Einfluss der Prandtl-Zahl
$F^*$	Normierte Kontaktkraft
$F_c$	Kritische Kontaktkraft
$F_c^*$	Dimensionslose Kontaktkraft
$F_K$	Kontaktkraft
$F_{K\_max}$	Maximale Kontaktkraft
$F_{K\_min}$	Minimale Kontaktkraft
$F_{K\_tot}$	Summe der Kontaktkräfte
$F_{K\_Sx}$	Kontaktkraft einer Kontaktfeder

$F_T$	Kontaktkraft am Leiteranschluss
$F_Z$	Ziehkraft
$F_{Z,max}$	Maximale Ziehkraft
$g$	Erdbeschleunigung (9,81 m/s <sup>2</sup> )
$Gr$	Grashof-Zahl
$g(x)$	Störfunktion
$h$	Höhe, allgemein
$h_{conv}$	Gemittelter konvektiver Wärmeübergangskoeffizient
$h_{conv,con}$	Gemittelter konvektiver Wärmeübergangskoeffizient an dem Steckverbinderkontakt
$h_{conv,rad}$	Gemittelter Gesamtwärmeübergangskoeffizient
$h_{conv,rad,con}$	Gemittelter Gesamtwärmeübergangskoeffizient an dem Steckverbinderkontakt
$h_{conv,rad,W}$	Gemittelter Gesamtwärmeübergangskoeffizient an der Leitung
$h_{conv,W}$	Gemittelter konvektiver Wärmeübergangskoeffizient der Leitung
$H_G$	Geometricabhängige Härte
$H_K$	Kontakthärte
$h_p$	Höhe des Kontaktstiftes
$h_{rad}$	Gemittelter Wärmeübergangskoeffizient für Wärmestrahlung
$h_{rad,con}$	Gemittelter Wärmeübergangskoeffizient für Wärmestrahlung an dem Steckverbinderkontakt
$h_{rad,W}$	Gemittelter Wärmeübergangskoeffizient für Wärmestrahlung an der Leitung
$h_s$	Höhe der Kontaktfeder
$I$	Strom, allgemein
$I_b$	Axiales Flächenmoment 2. Grades
$I_{by}$	Axiales Flächenmoment 2. Grades um die Y-Achse
$I_{ges}$	Gesamtstrom, der über einen Steckverbinderkontakt fließt
$I_{max}$	Maximal zulässiger Strom
$I_N$	Nennstrom
$I_{SX}$	Teilstrom durch eine Kontaktfeder
$k$	Gütefaktor für die Qualität des Leiteranschlusses (k-Wert)
$K_C$	Empirisch ermittelter Faktor für den Kontaktwiderstand
$k_C$	Empirisch ermittelter Faktor für den Kontaktwiderstand (Ohne spezifischen Widerstand)
$L$	Lorenzzahl (2,44·10 <sup>-8</sup> V <sup>2</sup> /K <sup>2</sup> )
$l$	Länge, allgemein
$l_b$	Länge Bahnbereich
$l_{b,P}$	Länge Bahnbereich Kontaktstift (Kontaktpunkt bis Übergang)
$l_C$	Länge des Crimpbereiches

$l_{char}$	Charakteristische Länge
$l_{con}$	Länge des Steckverbinderkontaktes
$l_e$	Elementkantenlänge
$l_s$	Länge einer Kontaktfeder
$l_{s\_mech}$	Mechanische Länge einer Kontaktfeder zur Berechnung der Kontaktkraft
$l_T$	Länge Leiteranschlussbereich
$l_{tr}$	Länge Übergangsbereich
$l_{tr\_F}$	Länge Übergangsbereich Leiteranschluss bis Kontaktfeder
$l_W$	Länge des Leiters
$M$	Temperaturgradient an der Stirnfläche eines Volumenelementes
$m$	Exponent der Stromerwärmungskurve Masse
$M_{b\_max}$	Maximales Drehmoment
$n$	Empirisch ermittelter Exponent für den Kontaktwiderstand
$n_1$	Empirisch ermittelter Koeffizient für natürliche Konvektion
$n_s$	Anzahl Kontaktfedern
$Nu$	Nußelt-Zahl
$P_{ab\_spez}$	Spezifische abgeführte Leistung
$P_b$	Verlustleistung des Bahnbereiches
$P_{con}$	Verlustleistung des Steckverbinderkontaktes
$P_{con\_max}$	Maximal zulässige Verlustleistung des Steckverbinderkontaktes
$P_d$	Verlustleistung
$p_{max}$	Maximale Flächenpressung
$Pr$	Prandtl-Zahl
$P_W$	Verlustleistung des Leiters
$p(x)$	Flächenpressung an der Stelle x
$P_{zu\_spez}$	Spezifische erzeugte Leistung
$\dot{Q}$	Wärmestrom, allgemein
$\dot{Q}_C$	Wärmestrom aufgrund des Engwiderstandes
$\dot{Q}_{cnd\_F}$	Wärmestrom aufgrund von Wärmeleitung an die Umgebung
$\dot{Q}_{cnd\_P\_out}$	Von dem Kontaktstift abgegebener Wärmestrom aufgrund von Wärmeleitung
$\dot{Q}_{cnd\_T\_out}$	Von dem Leiteranschlussbereich abgegebener Wärmestrom aufgrund von Wärmeleitung
$\dot{Q}_{cnd\_W}$	Wärmestrom aufgrund von Wärmeleitung in den Leiter
$\dot{Q}_{cnd\_W\_max}$	Maximaler Wärmestrom aufgrund von Wärmeleitung in den Leiter
$\dot{Q}_{conv}$	Wärmestrom aufgrund von Wärmeleitung
$\dot{Q}_{conv\_rad}$	Wärmestrom aufgrund von Wärmeleitung und Wärmestrahlung

$\dot{Q}_{conv\_rad\_P}$	Von dem Kontaktstift abgegebener Wärmestrom aufgrund von Wärme- konvektion und Wärmestrahlung
$\dot{Q}_{conv\_rad\_T}$	Von dem Leiteranschlussbereich abgegebener Wärmestrom aufgrund von Wärme- konvektion und Wärmestrahlung
$\dot{Q}_{conv\_rad\_W}$	Von dem Leiter abgegebener Wärmestrom aufgrund von Wärme- konvektion und Wärmestrahlung
$\dot{Q}_{cp}$	Gespeicherte Wärme
$\dot{Q}_{d\_con}$	Wärmestrom über die Oberfläche des Steckverbinderkontaktes
$\dot{Q}_{p\_in}$	In den Kontaktstift zugeführter Wärmestrom aufgrund des Kontakt- widerstandes
$\dot{Q}_{rad}$	Wärmestrom aufgrund von Wärmestrahlung
$\dot{Q}_{rad\_12}$	Wärmestrom aufgrund von Wärmestrahlung von Fläche 1 zu Fläche 2
$\dot{Q}_{Sx}$	In eine einzelne Kontaktfeder zugeführter Wärmestrom
<b>R</b>	Elektrischer Widerstand, allgemein
$R_0$	Elektrischer Widerstand bei Referenztemperatur
$r_{11}$	Hauptkrümmungsradius Körper 1 eines Ellipsoiden
$r_{12}$	Hauptkrümmungsradius Körper 2 eines Ellipsoiden
$r_{21}$	Nebenkrümmungsradius Körper 1 eines Ellipsoiden
$r_{22}$	Nebenkrümmungsradius Körper 2 eines Ellipsoiden
$Ra$	Rayleigh-Zahl
$R_a$	Mittenrauwert
$r_a$	Außenradius
$T_{a,C}$	Außenradius der Crimpung
$T_{a,I}$	Außenradius der Isolierung
$T_{a,S}$	Außenradius einer Kontaktfeder
$R_b$	Bahnwiderstand
$R'_b$	Spezifischer Bahnwiderstand
$R_{b,P}$	Bahnwiderstand Kontaktstift
$R_{b,S}$	Bahnwiderstand Kontaktbuchse
$R_{b,Sx}$	Bahnwiderstand der Kontaktfeder x
$R_C$	Doppelseitiger Engewiderstand
$R_{C_0}$	Engewiderstand bei Referenztemperatur
$R_{C1}$	Einseitiger Engewiderstand
$R_{C1}(\mu)$	Einseitiger Engewiderstand als Funktion von der Eindringtiefe
$R_{c\_calc}$	Berechneter Engewiderstand
$R_{con}$	Durchgangswiderstand des Steckverbinderkontaktes
$r_{con}$	Radius des Steckverbinderkontaktes zur Abschätzung der Oberfläche
$R_{con\_max}$	Maximaler Durchgangswiderstand des Steckverbinderkontaktes
$R_{C\_Sx}$	Engewiderstand der Kontaktstelle x

$R_{C\_tot}$	Resultierender Engewiderstand bei mehreren Kontaktpunkten
$R_C(\vartheta)$	Temperaturabhängiger Engewiderstand
$R_F$	Fremdschichtwiderstand
$R_{F\_Sx}$	Fremdschichtwiderstand der Kontaktstelle x
$r_i$	Innenradius
$r_{i1}$	Hauptkrümmungsradien
$\frac{1}{r_{i1}} + \frac{1}{r_{i2}}$	Ersatzradien aus Hauptkrümmungsradien
$\frac{1}{r_{i1}} - \frac{1}{r_{i2}}$	Ersatzradien
$r_{i\_C}$	Innenradius der Crimpung
$r_{i\_I}$	Innenradius der Isolierung
$r_{i\_S}$	Innenradius einer Kontaktfeder
$R_K$	Kontaktwiderstand
$r_K$	Radius der Kugelfläche des Kontaktpunktes
$R_{K\_meas}$	Gemessener Kontaktwiderstand
$R_{K\_Sx}$	Kontaktwiderstand Kontaktstelle x
$R_m$	Zugfestigkeit
$r_P$	Radius des Kontaktstiftes
$R_{p0,2}$	Dehngrenze 0,2 %
$R_{SC}$	Resultierender Widerstand der Kontaktfedern und der Kontaktstellen
$R_{SC\_calc}$	Berechneter resultierender Widerstand der Kontaktfedern und der Kontaktstellen
$R_T$	Leiteranschlusswiderstand
$R_{T\_P}$	Leiteranschlusswiderstand Stiftseite
$R_{T\_S}$	Leiteranschlusswiderstand Buchsenseite
$R_{tr}$	Durchgangswiderstand von Leiteranschluss zu Leiteranschluss
$R(\vartheta)$	Temperaturabhängiger elektrischer Widerstand
$R_W$	Leiterwiderstand
$R'_W$	Spezifischer Leiterwiderstand
$r_W$	Nennradius des Leiters
$R_Z$	Gemittelte Rautiefe
$T$	Absolute Temperatur, allgemein
$t$	Zeit
$T_1$	Absolute Temperatur von Bauelement 1
$T_2$	Absolute Temperatur von Bauelement 2
$T_C$	Absolute Temperatur im Kontaktpunkt
$T_m$	Mittlere absolute Temperatur

---

$T_p$	Absolute Temperatur des Kontaktstiftes (in der Nähe des Kontaktpunktes)
$U$	Umfang, allgemein
$U_1$	Messspannung 1
$U_2$	Messspannung 2
$U_c$	Kontaktspannung
$U_{o,W}$	Umfang der Leitung auf der Außenseite
$U_{proj}$	Umfang der Projektionsfläche in Strömungsrichtung
$w$	Breite, allgemein
$W_b$	Widerstandsmoment bei Biegung
$w_{c,S}$	Schnittbreite zwischen den Kontaktfedern
$w_{con,max}$	Maximale Breite des Steckverbinderkontaktes
$w_p$	Breite des Kontaktstiftes
$w_{S1}$	Breite einer Kontaktfeder
$x$	Weg, allgemein
	Ort, allgemein
	x-Koordinate
$x_0$	Ort des Übergangs zwischen Steckverbinderkontakt und Leitung Stelle $x = 0$
$x_c$	Ort des Kontaktpunktes zwischen Kontaktstift und Kontaktbuchse
$x_{max}$	Maximale Auslenkung
$x_p$	Ort des Übergangs zwischen Kontaktstift und Leiteranschluss
$y$	Variable
	y-Koordinate
$y'$	Erste Ableitung
$y''$	Zweite Ableitung
$z$	z-Koordinate

## Griechische Buchstaben

Symbol	Physikalische Größe
$\alpha$	Winkel
$\alpha_{el}$	Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes
$\beta_p$	Thermischer Ausdehnungskoeffizient des Fluids
$\Delta\vartheta$	Temperaturdifferenz, allgemein
$\Delta\vartheta_{\infty_P}$	Theoretische Übertemperatur eines „langen“ Kontaktstiftes
$\Delta\vartheta_{\infty_W}$	Leiterübertemperatur einer „langen“ Leitung
$\Delta\vartheta_{a,l}$	Erwärmung auf der Außenseite der Isolierung des Leiters
$\Delta\vartheta_C$	Temperaturdifferenz in der Kontaktstelle
$\Delta\vartheta_I$	Temperaturdifferenz an der Isolierung
$\Delta\vartheta_{max}$	Maximal zulässige Temperaturdifferenz
$\Delta\vartheta_p$	Temperaturdifferenz am Kontaktstift
$\Delta\vartheta_T$	Temperaturdifferenz am Leiteranschlussbereich
$\Delta\vartheta_{W_{con}}$	Temperaturdifferenz am Leiter aufgrund des axialen Wärmestroms von dem Steckverbinderkontakt
$\Delta\vartheta_{W_{con}_{16}}$	Temperaturdifferenz aufgrund des axialen Wärmestroms von dem Steckverbinderkontakt am Leiter mit einem Querschnitt von 16 mm <sup>2</sup>
$\Delta\vartheta_{W_{con}_{25}}$	Temperaturdifferenz aufgrund des axialen Wärmestroms von dem Steckverbinderkontakt am Leiter mit einem Querschnitt von 25 mm <sup>2</sup>
$\Delta\vartheta_{W_{con}_{max}}$	Maximal zulässige Temperaturdifferenz am Leiter aufgrund des axialen Wärmestroms von dem Steckverbinderkontakt
$\Delta\vartheta_{W_{max}}$	Maximale Erwärmung an der Leitung
$\Delta F$	Kraftänderung
$\Delta x$	Wegänderung, allgemein
$\Delta x_S$	Auslenkung der Kontaktfeder
$\Delta x_{S_{max}}$	Maximal zulässige Auslenkung der Kontaktfeder
$\epsilon$	Dehnung, allgemein
$\epsilon_1$	Emissionsgrad Bauelement 1
$\epsilon_2$	Emissionsgrad Bauelement 2
$\epsilon_{12}$	Resultierender Emissionsgrad
$\epsilon_{12_{con}}$	Resultierender Emissionsgrad des Kontaktsystems
$\epsilon_{12_W}$	Resultierender Emissionsgrad der Leitung
$\epsilon_F$	Spezifische Dehnung
$\eta$	Koeffizient Dynamische Viskosität
$\vartheta$	Temperatur, allgemein
$\vartheta_{001}$	Temperatur in der Nähe des Kontaktpunktes
$\vartheta_{045}$	Temperatur im Abstand von 45 mm zu dem Kontaktpunkt

$\vartheta_1$	Temperatur von Bauelement 1
$\vartheta_{100}$	Temperatur im Abstand von 100 mm zu dem Kontaktpunkt
$\vartheta_{200}$	Temperatur im Abstand von 200 mm zu dem Kontaktpunkt
$\vartheta_{300}$	Temperatur im Abstand von 300 mm zu dem Kontaktpunkt
$\vartheta_{400}$	Temperatur im Abstand von 400 mm zu dem Kontaktpunkt
$\vartheta_{600}$	Temperatur im Abstand von 600 mm zu dem Kontaktpunkt
$\vartheta_{\infty_F}$	Umgebungstemperatur
$\vartheta_{\infty_P}$	Theoretische Temperatur eines „langen“ Kontaktstiftes
$\vartheta_{\infty_W}$	Leitertemperatur einer „langen“ Leitung
$\vartheta_{a_I}$	Temperatur auf der Außenseite der Isolierung des Leiters
$\vartheta_C$	Temperatur in der Kontaktstelle
$\vartheta_{con}$	Mittlere Temperatur des Steckverbinderkontaktes
$\theta_i$	Hertz-Koeffizienten
$\vartheta_m$	Gemittelte Temperatur
$\vartheta_{max}$	Maximal zulässige Temperatur
$\vartheta_P$	Temperatur am Kontaktstift in der Nähe des Kontaktpunktes
$\vartheta_{P_{max}}$	Maximale Temperatur am Kontaktstift
$\vartheta_{T_{max}}$	Maximale Temperatur am Leiteranschlussbereich
$\vartheta_{W_{con_{max}}}$	Maximale Temperatur am Leiter aufgrund des axialen Wärmestroms
$\vartheta_x$	Temperatur an der Stelle x
$\vartheta(x)$	Temperaturverlauf
$\vartheta_{x+dx}$	Temperatur an der Stelle x+dx
$\lambda_{el}$	Elektrische Leitfähigkeit
$\lambda_{el_b}$	Elektrische Leitfähigkeit des Basismaterials
$\lambda_{el_{con}}$	Elektrische Leitfähigkeit des Basismaterials des Steckverbinderkontaktes
$\lambda_{el_P}$	Elektrische Leitfähigkeit des Basismaterials des Kontaktstiftes
$\lambda_{el_T}$	Resultierende elektrische Leitfähigkeit des Leiteranschlussbereiches
$\lambda_{el_W}$	Elektrische Leitfähigkeit des Basismaterials des Leiters
$\lambda_{th}$	Wärmeleitfähigkeit
$\lambda_{th_F}$	Wärmeleitfähigkeit der Luft
$\lambda_{th_I}$	Wärmeleitfähigkeit der Isolierung
$\lambda_{th_W}$	Wärmeleitfähigkeit des Leiters
$\mu$	Reibungszahl
$\sqrt{\mu}$	Abstand der Potentialfläche zu der Kontaktfläche
$\nu$	Querkontraktionszahl
	Kinematische Viskosität
$\xi$	Koeffizient
$\rho$	Spezifischer elektrischer Widerstand
	Dichte

$\sigma$	Stefan-Boltzmann Konstante $5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ [Ver06 S.1] Standardabweichung Druckverteilung Mechanische Spannung, allgemein
$\sigma_{12}$	Strahlungskonstante der Anordnung
$\sigma_{b\_max}$	Maximale Randfaserspannung
$\sigma_F$	Spezifische mechanische Spannung
$\Phi$	Empirisch ermittelter Faktor
$\varphi$	Elektrisches Potential, allgemein
$\varphi_{12}$	Sichtfaktor
$\Omega$	Hilfswinkel
$\omega$	Winkel zwischen den Ebenen von $r_{11}$ und $r_{21}$ Eindringtiefe, allgemein
$\omega^*$	Normierte Eindringtiefe
$\omega_c$	Kritische Eindringtiefe
$\omega_t^*$	Eindringtiefe des Übergangs von rein elastisch zu plastisch

---

## Literaturverzeichnis

- [Ada02a] Adam, J.: Strombelastbarkeit von Leiterbahnen. Teil I Grundlagen. In: PLUS, 10 (4), 2002, S. 1669–1673.
- [Ada02b] Adam, J.: Strombelastbarkeit von Leiterbahnen. Teil II IPC-Richtlinie IPC-D-275: Mythos und Wirklichkeit. In: PLUS, 10 (11), 2002, S. 1817–1823.
- [Ada07] Adam, J.: Strombelastbarkeit von Leiterbahnen. Tagung Elektronik Kühlung, Essen, 2007.
- [AGS13] Aristizabal, E.; Günter, F.; Schaaf, P.: Challenges in design and simulation of cold-joined connectors for high current applications. 4. Symposium Connectors, Lemgo, 2013.
- [AJC12] Angadi, S. V.; Jackson, R. L.; Choe, S.-y.; Flowers, G. T.; Lee, B.-Y.; Zhong, L.: A Multiphysics Finite Element Model of a 35A Automotive Connector Including Multiscale Rough Surface Contact. In: Journal of Electronic Packaging, 134 (1), 2012, S. 1–12.
- [AMP04a] AMP Incorporated: Golden Rules: Guidelines For The Use Of Gold On Connector Contacts. In: Technical Report, 2004.
- [AMP04b] AMP Incorporated: The Tin Commandments: Guidelines For The Use Of Tin On Connector Contacts. In: Technical Report, 2004.
- [ASF11] Anheuser, M.; Siegel, D.; Ferre, J.: Magnetische und Thermische Einflüsse auf die Kontaktsysteme in der Anschlusstechnik. 21. Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe, 2011.
- [AtTe09] Atayilmaz, S. Ö.; Teke, I.: Experimental and numerical study of the natural convection from a heated horizontal cylinder. In: International Communications in Heat and Mass Transfer, 2009, S. 731–738.

- [Bab54] Babikow, M.: Wichtige Bauteile elektrischer Apparate. Theoretische Einführung. VEB Verlag Technik, Berlin, 1954.
- [BAK95] Berger, F.; Anheuser, M.; Krätzschmar, A.: Modellbildung, Simulation und Verifikation am Beispiel strombegrenzender Leistungsschalter. 13. Kontaktseminar „Kontaktverhalten und Schalten“, Karlsruhe, 1995.
- [Bal09] Balzer Kabel: Product data sheed. H07V-K, 2009.
- [BAL14] BALSEAL: BAL Contact springs. <http://www.balseal.com/springs>, 29.08.2015.
- [BaLi01] Barcikowski, F.; Lindmayer, M.: Wärmehaushalt von Schaltgeräten. 16. Fachtagung „Kontaktverhalten und Schalten“, Karlsruhe, 2001.
- [BaLi99] Barcikowski, F.; Lindmayer, M.: Untersuchungen zur Simulation des Wärmehaushaltes von Schaltgeräten. 15. Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe, 1999.
- [Bar03] Barcikowski, F.: Numerische Berechnung zur Wärme- und Antriebsauslegung von Schaltgeräten. Dissertation, TU Braunschweig, 2003.
- [Bau99] Bauer, H.: Kraftfahrtechnisches Taschenbuch. Vieweg, Braunschweig, 1999.
- [BBS13] Blauth, M.; Berger, F.; Song, J.: Berechnung der Stromtragfähigkeit von Kontaktsystemen. 4. Symposium Connectors, Lemgo, 2013.
- [BBS14a] Blauth, M.; Berger, F.; Song, J.: Optimization of the Number of Contact Springs in a Connector by means of Analytical and Numerical Analysis. 27th International Conference on Electrical Contacts, Dresden, 2014.

- 
- [BBS14b] Blauth, M.; Berger, F.; Song, J.: Influence of the Electrical Resistance and Wire Size on the Current Carrying Capacity of Connectors. 60th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, New Orleans, LA, USA, 2014.
- [BBS14c] Blauth, M.; Berger, F.; Song, J.: Analytical and Experimental Investigation of the Electrical-Thermal Behaviour of Electrical Contact Systems. In: British Journal of Applied Science & Technology, 4 (1), 2014, S. 18–39.
- [BBS15a] Blauth, M.; Berger, F.; Song, J.: Parametrisierte Modelle zur Grobdimensionierung von Steckverbinderkontakten für die Leistungsübertragung. 60. Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe, 2015.
- [BBS15b] Blauth, M.; Berger, F.; Song, J.: Untersuchung zum Einfluss der natürlichen Konvektion auf die Erwärmung von Kontaktsystemen. 5. Symposium Connectors, Lemgo, 2015.
- [BBS16] Blauth, M.; Berger, F.; Song, J.: A Systematic Approach for the Design of Electrical Connection Systems with Respect to the Current Carrying Capacity. 28th International Conference on Electrical Contacts, Edinburgh, UK, 2016.
- [BEB10] Ben Jemaa, N.; El Abdi, R.; Beloufa, M. A.; Carvou, E.: Numerical and experimental study of the contact resistance for high copper alloys in force domain 1-100 N. In: The European Physical Journal Applied Physics, 49 (2), 2010.
- [Bei93] Beil, F.: KFZ-Steckverbinder- Schlüsselkomponenten für zuverlässige Automobile. 12. VDE Seminar „Kontaktverhalten und Schaten“, Karlsruhe, 1993.
- [Bel12] Beloufa, M. A.: Design Optimization of Electrical Power Contact Using Finite Element Method. In: Journal of Heat Transfer, 134 (1), 2012, S. 1–15.

- [Ben02] Ben Jemaa, N.: Contacts Conduction and Switching in DC Levels. 48th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Orlando, Florida USA, 2002.
- [Ber14] Berger, F.: Elektrische Energieverteilung der Zukunft. Sichere Stromversorgung für die digitale Fabrik. In: E-Installation - Das Fachmagazin für die Niederspannungs-Energieverteilung und Elektroinstallationstechnik, 2014, S. 6–9.
- [Ber96] Bergmann, R.: Zum Langzeitverhalten des Widerstands elektrischer Stromschienenverbindungen. Dissertation, TU Dresden, 1996.
- [BIM92] Beyer, W.; Iancu, P.; Merkel, M.: Verbindungen und Anschlüsse in der Elektrotechnik. Verlag Technik, Berlin, 1992.
- [Bin12] Binder, L.: Der Widerstand von Kontakten. In: Elektrotechnik und Maschinenbau, 1912, S. 781–788.
- [BKM07] Braunovic, M.; Končić, V. V.; Myškin, N. K.: Electrical contacts. Fundamentals, applications and technology. CRC Press, Boca Raton, Fla, 2007.
- [Blil88] Blume, D.; Illgner, K. H.: Schrauben Vademecum, 1988.
- [BLS09] Blumenroth, F.; Lücke, N.; Schlegel, S.; Großmann, S.; Löbl, H.: Untersuchungen zum Langzeitverhalten von ruhenden Verbindungen in der Elektroenergie-technik. 20. Fachtagung Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe, 2009.
- [Blu09] Blumenroth, F.: Zum Langzeitverhalten von Steckverbindungen mit Schraubenfedern in Anlagen der Elektroenergie-technik. Dissertation, TU Dresden, 2009.
- [BöBö11] Böge, A.; Böge, G.: Technische Mechanik. Statik - Dynamik - Fluidmechanik - Festigkeitslehre. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2011.

- 
- [Böh04] Böhme, M.: Ein methodischer Ansatz zur parametrischen Modellierung in der Fahrzeugentwicklung. VDI Verlag, Düsseldorf, 2004.
- [Böh05] Böhme, H.: Mittelspannungstechnik. Schaltanlagen berechnen und entwerfen. Huss-Medien Verl. Technik, Berlin, 2005.
- [BöWe11] Böckh, P. von; Wetzel, T.: Wärmeübertragung. Grundlagen und Praxis. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [Bre08] Brenner, A.: Simulation elektromechanischer Eigenschaften am Steckverbinder. In: Aktuelle Technik, 2008, S. 58–59.
- [Bre09] Brenner, A.: Einflussfaktoren auf die Stromtragfähigkeit und das Impulsstromverhalten von Steckverbindern. 2. Symposium Connectors, Lemgo, 2009.
- [Bre99] Brenner, A.: Anforderungen an Leistungssteckverbinder und Steckverbinder in der Informationselektronik. 15. Albert-Keil-Kontaktseminar „Kontaktverhalten und Schalten“, Karlsruhe, 1999.
- [BrNo06] Brenner, A.; Nowacki, H.: Calculation and Optimization of uniform flexible and tapered Cantilever Beams for electrical Connectors analyzing the maximum of Safety against Overstressing the Material Yield Strength Limit. 23rd International Conference on Electrical Contacts, Sendai, Japan, 2006.
- [BrSc37] Brügger, W.; Schoch, E.: Thermische Beanspruchung von elektrischen Kontakten. In: Schweizerische technische Zeitschrift, 1937, S. 385–392.
- [BSM88] Brockman, I.; Sieber, C.; Mroczkowski, R. S.: A Limited Study of the Effects of Contact Normal Force, Contact Geometry and Wipe Distance on Contact Resistance of Gold-Plated Contacts. In: IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 11 (4), 1988, S. 393–400.

- [Buc81] Buckley, D. H.: Surface effects in adhesion, friction, wear, and lubrication. Elsevier, Amsterdam, 1981.
- [Bun13] Bungartz, H.-J.: Modellbildung und Simulation. Eine anwendungsorientierte Einführung. Springer Spektrum, Berlin, 2013.
- [Bur11] Buresch, I.: Effekte intermetallischer Phasen auf die Eigenschaften von Zinnoberflächen auf Kupferlegierungen. 21. Fachtagung Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe, 2011.
- [Bur15] Buresch, I.: Verschleißigenschaften gemischter Kontaktpaarungen - Zinn-Silber im Vergleich zu Zinn-Zinn und Silber-Silber-. 5. Symposium Connectors, Lemgo, 2015.
- [CER12] Carvou, E.; El Abdi, R.; Razafiarivelo, J.; Ben Jemaa, N.; Zindine, E.: Thermo-mechanical study of a power connector. In: Measurement, 45 (5), 2012, S. 889–896.
- [Cha14] Chapman, D.: Copper for Busbars. European Copper Institute, 2014.
- [CHC10] Czichos, H.; Habig, K.-H.; Celis, J.-P.: Tribologie-Handbuch. Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2010.
- [ChCh75] Churchill, S. W.; Chu, H. H.: Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a horizontal cylinder. In: International Journal of Heat and Mass Transfer, 18 (9), 1975, S. 1323–1329.
- [CRS13] Callister, W. D.; Rethwisch, D. G.; Scheffler, M.: Materialwissenschaften und Werkstofftechnik. Eine Einführung. Wiley-VCH, Weinheim, 2013.
- [Dee92] Deeg, E. W.: New Algorithms for Calculating Hertzian Stresses, Deformations, and Contact Zone Parameters, 1992.
- [Des14a] Dessault Systems: ABAQUS 6.14. GETTING STARTED WITH ABAQUS: INTERACTIVE EDITION, 2014.

- 
- [Des14b] Dessault Systems: Abaqus 6.14. ANALYSIS USER'S GUIDE VOLUME IV: ELEMENTS, 2014.
- [Deu05] Deutsches Kupferinstitut: CuFe2. Werkstoff-Datenblätter. <https://www.kupferinstitut.de/de/persoeneleberatung/shop-verlag-downloads/downloads/werkstoffe/werkstoff-datenblaetter.html>, 29.08.2015.
- [Dij00] Dijk van, P.: Contact Spots. 20th International Conference on Electrical Contacts, Stockholm, 2000.
- [Dij02] Dijk van, P.: Critical Aspects of Electrical Connector Contacts. 21st International Conference on Electrical Conatacts, 2002.
- [Dij04] Dijk van, P.: Beratung für Steckverbinderentwurf. Vortrag, 2004.
- [Dij07a] Dijk van, P.: A Novel Method for Accurate Measurement of Elastic and Plastic Properties of Contact Spring Materials, 2007.
- [Dij07b] Dijk van, P.: Critical Reliability Aspects of Electrical Contacts, 2007.
- [Dij98] Dijk van, P.: Contacts in Motion, 1998.
- [DIN03a] DIN EN 60512-5-2: Steckverbinder für elektronische Einrichtungen - Mess- und Prüfverfahren - Teil 5-2: Prüfungen der Strombelastbarkeit; Prüfung 5b: Strombelastbarkeit (Derating-Kurve). Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2003.
- [DIN03b] DIN EN 60512-5-1: Steckverbinder für elektronische Einrichtungen Mess- und Prüfverfahren Teil 5-1: Prüfungen der Strombelastbarkeit Prüfung 5a: Temperaturerhöhung. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2003.
- [DIN04] DIN EN 60228: Leiter für Kabel und isolierte Leitungen. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2004.

- [DIN09a] DIN Deutsches Institut für Normung (Berlin) 61984: Steckverbinder - Sicherheitsanforderungen und Prüfungen. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2009.
- [DIN09b] DIN EN 62271-1: Hochspannungs-Schaltgeräte und -Schaltanlagen – Teil 1: Gemeinsame Bestimmungen. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2009.
- [DIN11] DIN EN 50525-2-31: Kabel und Leitungen - Starkstromleitungen mit Nennspannungen bis 450/750 V (U<sub>o</sub>/U) - Teil 2-31: Starkstromleitungen für allgemeine Anwendungen - Ader- und Verdrahtungsleitungen mit thermoplastischer PVC-Isolierung. VDE VERLAG, Berlin, 2011.
- [DIN12] DIN EN 62196-1: Stecker, Steckdosen, Fahrzeugkupplungen und Fahrzeugstecker – Konduktives Laden von Elektrofahrzeugen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2012.
- [DIN13] DIN VDE 0298-4: Verwendung von Kabeln und isolierten Leitungen für Starkstromanlagen - Teil 4: Empfohlene Werte für die Strombelastbarkeit von Kabeln und Leitungen für feste Verlegung in und an Gebäuden und von flexiblen Leitungen. VDE VERLAG, Berlin, 2013.
- [DoCo09] Do, T.K.; Cohen, T.: Coupled Thermal Electrical Finite Element Analysis of Power Contacts Used in High Speed Differential Connectors. 55th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 2009.
- [ECB13] Esson-Obame, H.; Carvou, E.; Ben Jemaa, N.; Cousin, B.; El Abdi, R.: Implementation of a Diagnostic Tool for Semi Permanent Electrical Contacts for a Direct Contact Force Measurement. 59th Holm Conference on Electrical Contacts, Newport, USA, 2013.

- 
- [Ehr04] Ehrenstein, G. W.: Handbuch Kunststoff-Verbindungstechnik. Carl Hanser Verlag, München, 2004.
- [EKL07] Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U.: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren. Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [Ele16] Electrical Contacts Wiki: Faustregeln für die Kontaktdimensionierung. [http://www.electrical-contacts-wiki.com/index.php?title=Faustregeln\\_f%C3%BCr\\_die\\_Kontaktdimensionierung](http://www.electrical-contacts-wiki.com/index.php?title=Faustregeln_f%C3%BCr_die_Kontaktdimensionierung), 21.05.2016.
- [ESE74] Erk, A.; Schmelzle, M.; Erk-Schmelzle: Grundlagen der Schaltgerätetechnik. Kontaktglieder und Löscheinrichtungen elektrischer Schaltgeräte der Energietechnik. Springer, Berlin, 1974.
- [EU11] EU 2011/65/EU: Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates vom 8. Juni 2011 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten, 2011.
- [Flu90] Fluss, H.: Hertzian Stresses as A Predictor of Contact Reliability. In: Connection Technology, 6 (12), 1990, S. 12–21.
- [FoTa13] Fok, S. C.; Tan, F. L.: Intelligent tool for the design of electrical connectors. In: Applied Mechanics and Materials, 2013, S. 1344–1348.
- [FoYa02] Fok, S. C.; Yap, W. P.: A Case-Based Design System for the Conceptual Design of Electrical Connectors. In: International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 20 (11), 2002, S. 787–798.
- [FrLi09] Friedrich, W.; Lipsmeier, A.: Friedrich Tabellenbuch. Elektrotechnik, Elektronik. Bildungsverl. EINS, Troisdorf, 2009.
- [FrSc10] Fritz, A. H.; Schulze, G.: Fertigungstechnik. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010.

- [FrWe04] Frei, P.U.; Weichert, H.O.: Advanced thermal simulation of a circuit breaker. 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Seattle, Washington, USA, 2004.
- [Geb11] Gebhardt, C.: Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench. Carl Hanser Verlag, München, 2011.
- [Geb12] Gebhardt, C.: Zuverlässige Verbindung. Anwenderkongress Steckverbinder, Würzburg, 2012.
- [Geb13] Gebhardt, C.: Parametric Multiphysics Simulation. CADFEM GmbH, 2013.
- [Geb14] Gebhardt, C.: Parametrische Multiphysik-Simulation. In: Konstruktion, 66 (7/8), 2014, S. 63–67.
- [Geh04] Gehlert, B.: Empfindliche Kontaktwiderstandsmessung. In: Test Kompendium, 2004, S. 68–70.
- [GKM00] Grill, R.; Kösters, R.; Müller, F.; Stenzel, P.: Material Optimized Design of Contact Tulips. 21st International Conference on Electrical Contacts, Zürich, Schweiz, 2000.
- [GLG13] Gatzsche, M.; Lücke, N.; Großmann, S.: Untersuchungen zur Stromaufteilung in Hochstrom-Steckverbindungen mit mehreren parallelen Kontaktelementen. 22. Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe, 2013.
- [GLG14a] Gatzsche, M.; Lücke, N.; Großmann, S.; Ledermann, T.; Freudiger, G.: Impact of the Temperature-Induced Reduction of Joint Force on the Long-Term Behavior of Contact Elements with Material-Allocated Electrical and Mechanical Function. 27th International Conference on Electrical Contacts, Dresden, 2014.

- 
- [GLG14b] Gatzsche, M.; Lücke, N.; Großmann, S.; Kufner, T.; Hagen, B.; Freudiger, G.: Electrical-Thermal Performance of Contact Elements in High Power Plug-In Connections. 60th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, New Orleans, LA, USA, 2014.
- [GLG15] Gatzsche, M.; Lücke, N.; Großmann, S.; Kufner, T.; Freudiger, G.: Validity of the Voltage-Temperature Relation for Contact Elements in High Power Applications. 61st IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, San Diego, CA USA, 2015.
- [Gra05] Gramsch, C.: Thermische Dimensionierung von Geräten der elektrischen Energietechnik. Vortrag, Dresden, 2005.
- [GrBö87] Großmann, S.; Böhme, H.: Zum Langzeitverhalten des Widerstandes von Steckverbindungen der Elektroenergietechnik. 8. Kontakttagung der DDR, 1987.
- [GrFe07] Grote, K.-H.; Feldhusen, J.: Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2007.
- [Gro88] Großmann, S.: Zur Gestaltung und zum Betriebsverhalten von Steckverbindungen der Elektroenergietechnik. Dissertation, TU Dresden, 1988.
- [GrWi66] Greenwood, J.; Williamson, J. B. P.: Contact of Nominally Flat Surfaces. In: Proceedings of the Royal Society of London, 295 (1442), 1966, S. 300–319.
- [HAR15] HARTING KGaA: Produktkatalog. HARTING Industrie-Steckverbinder Han. <http://www.harting.com/service/katalogebroschuerenflyer/downloads/katalog-industriesteckverbinder-han/>, 28.08.2015.
- [Hau13] Hauswald, T.: FEM Analysis Concept for Contact Systems. 4. Symposium Connectors, Lemgo, 2013.

- [Her81] Hertz, H.: Über die Berührung fester elastischer Körper. In: Journal für die reine und angewandte Mathematik, 1881, S. 156–171.
- [Her82] Hertz, H.: Über die Berührung fester elastischer Körper und über die Härte. In: Journal für die reine und angewandte Mathematik, 1882.
- [Hil56] Hilgarth, G.: Über die Grenzstromstärken von ruhenden Starkstromkontakten. Dissertation, TH Carole-Wilhelmina zu Braunschweig, 1956.
- [Hil58] Hilgarth, G.: Zusammenhang zwischen Kontaktspannung und Kontaktstellentemperatur bei kurzzeitig belasteten Starkstromkontakten. In: ETZ-A, 79 (13), 1958, S. 464–468.
- [HLS03] Horn, J.; Lippmann, B.; Steinhäuser, H.: Strombelastbarkeit von Steckverbinderkontakten. 17. Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe, 2003.
- [Höf63] Höft, H.: Physikalische Untersuchung an ruhenden Starkstromkontakten. Dissertation, TU Ilmenau, 1963.
- [Höf77] Höft, H.: Elektrische Kontakte. Physikalische Grundlagen. VEB Verlag Technik, Berlin, 1977.
- [Hol10] Holman, J. P.: Heat Transfer. McGraw-Hill Higher Education, Boston, Mass, 2010.
- [Hol29] Holm, R.: Über metallische Kontaktwiderstände. In: Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus dem Siemens-Konzern (7/2), 1929, S. 217–258.
- [Hol41] Holm, R.: Die technische Physik der elektrischen Kontakte. Springer, Berlin, 1941.
- [Hol67] Holm, R.: Electric Contacts. Theory and Application. Springer-Verlag, Berlin, 1967.

- 
- [Hor85] Horn, J.: Mechanische Eigenschaften von Kontaktsystemen und Kontaktflächen und deren Einfluß auf die Funktion von Steck-Kontakten. Dissertation, TH Karl-Marx-Stadt, 1985.
- [Hor87] Horn, J.: Berechnungsgrundlagen für Biegefederelemente von Kontakten. 8. Kontakttagung der DDR, 1987.
- [HöVo02] Höhne, G.; Volz, A. K.: Parametrische Karosseriekonstruktion: Neue Wege in der frühen Phase der Fahrzeugentwicklung. In: Konstruktion (3), 2002, S. 91–95.
- [HSE03] Hernot, X.; Senouci, A.; El Manfalouti, A.; Ben Jemaa, N.; El Abdi, R.: Contact resistance law for elasto-plastic domains in the force range 1mN-10N. In: IEICE Trans. Electron, E86-C (6), 2003.
- [HST16] Hübner, F.; Schmidt, H.; Thies, S.; Dvorsky, K.: Thermal Simulation of an Automotive HV Wiring Harness. 28th International Conference on Electric Contacts, Edinburgh, UK, 2016.
- [IEC09] IEC 60943: Guidance concerning the permissible temperature rise for parts of electrical equipment, in particular for terminals, 2009.
- [IEC96] IEC 1545: Connecting devices - Devices for the connection of aluminium conductors in clamping units of any material and copper conductors in aluminium bodied clamping units, 1996.
- [Ilg04] Ilgevcicus, A.: Analytical and numerical analysis and simulation of heat transfer in electrical conductors and fuses. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, 2004.
- [Jäg81a] Jäger, K.-W.: Schaltgeräte methodisch konstruiert. Gesichtspunkte zur konstruktiven Entwicklung von Schaltgeräten der elektrischen Energietechnik, Teil 1. In: Elektrotechnik und Maschinenbau, 63 (15/16), 1981, S. 24–28.

- [Jäg81b] Jäger, K.-W.: Schaltgeräte methodisch konstruiert. Gesichtspunkte zur konstruktiven Entwicklung von Schaltgeräten der elektrischen Energietechnik, Teil 2. In: Elektrotechnik und Maschinenbau, 63 (18), 1981, S. 24–29.
- [JaGr05] Jackson, R. L.; Green, I.: A Finite Element Study of Elasto-Plastic Hemispherical Contact Against a Rigid Flat. In: Journal of Tribology, 127 (2), 2005, S. 343–354.
- [JDL14] Jackson, R.L.; Down, M.P.; Liu, H.; McBridge, J.W.: A Comparison of the Predictions of a Multiscale Model and Optical Real Area of Contact Measurements. 60th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, New Orleans, LA, USA, 2014.
- [Joh03] Johnson, K. L.: Contact mechanics. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2003.
- [JuLa01] Jung, M.; Langer, U.: Methode der finiten Elemente für Ingenieure. Eine Einführung in die numerischen Grundlagen und Computersimulation. Teubner, Stuttgart, 2001.
- [Kah04] Kahlert, J.: Simulation technischer Systeme. Vieweg + Sohn Verlag, Wiesbaden, 2004.
- [KaHo89] Kantner, E.; Hobgood, L.: Hertz Stress as an Indicator for Connector Reliability. In: Connection Technology, 1989, S. 14–22.
- [Kam09] Kammer, C.: Aluminium-Taschenbuch. 3 Weiterverarbeitung und Anwendung. Aluminium-Verl, Düsseldorf, 2009.
- [Kas96] Kassman Rudolphi, A.: Tribology of Electrical Contacts - Deterioration of Silver Coated Copper. Dissertation, Uppsala University, 1996.
- [Kat12] Katzier, H.: Elektrische Steckverbinder. Technologien, Anwendungen und Anforderungen. Leuze, Bad Saulgau, 2012.

- 
- [KHD06] Kreimeyer, M.; Herfeld, U.; Deubzer, F.; Lindemann, U.: Effiziente Zusammenarbeit von Konstruktions- und Simulationsabteilungen in der Automobilindustrie. In: CiDaD Working Paper Series, 2 (1), 2006.
- [KlTh07] Kloos, K. H.; Thomala, W.: Schraubenverbindungen. Grundlagen, Berechnung, Eigenschaften, Handhabung. Springer-Verlag, Berlin, 2007.
- [KoEt02] Kogut, L.; Etsion, I.: Elastic-Plastic Contact Analysis of a Sphere and a Rigid Flat. In: Journal of Applied Mechanics, 69 (5), 2002, S. 657–662.
- [Koh00] Kohlrausch, F.: Über den stationären Temperaturzustand eines elektrisch geheizten Leiters. In: Annalen der Physik, 306 (1), 1900, S. 132–158.
- [KoSa07] Koibuchi, K.; Sawa, K.: Numerical study on current and thermal distributions of electrical contacts by FEM. 53rd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Pittsburgh, PA, USA, 2007.
- [KöSo15] Kösters, J.; Song, J.: Einfluss der Schichtdicke auf die Lebensdauer, den Reibungskoeffizienten und die Verschleißrate von Kontakten mit Silberschicht. 5. Symposium Connectors, Lemgo, 2015.
- [Kra00] Krause, W.: Gerätekonstruktion. In Feinwerktechnik und Elektronik. Hanser, München, 2000.
- [Kra04] Krause, W.: Konstruktionselemente der Feinmechanik. Hanser, München, 2004.
- [Kra12] Krause, W.: Grundlagen der Konstruktion. Elektronik - Elektrotechnik - Feinwerktechnik - Mechatronik. Hanser, München, 2012.

- [KrBü04] Krause, W.; Bürger, E.: Gerätekonstruktion. In *Feinwerktechnik und Elektronik*. Hanser, München, 2004.
- [Kru66] Krum, A.: Printed Circuit Board Insertion and Withdrawal Forces for Card-Edge Connectors. In: Elco Corporation, 1966, S. 119–126.
- [KuWa87] Kussy, F. W.; Warren, J. L.: *Design Fundamentals for Low-Voltage Distribution and Control*. MARCEL DEKKER, New York, 1987.
- [Lan00] Langer, J.: *Kupferwerkstoffe für Steckverbinder, Kontaktfedern und Systemträger*. Sundwiger Messingwerk, 2000.
- [Lec14] Lecheler, S.: *Numerische Strömungsberechnung. Schneller Einstieg durch anschauliche Beispiele mit ANSYS 15.0*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014.
- [Lei09] Leidner, M. G.: *Kontaktphysikalische Simulation von Schichtsystemen*. Dissertation, TU Darmstadt, 2009.
- [LeSc03] Leidner, M. G.; Schmidt, H.: Kontaktaufnahme. Berechnung des mechanischen Verhaltens elektrischer Kontakte. In: *Elektromechnik*, 111 (8-9), 2003, S. 34–36.
- [Lie03] Liebermann, K.: *Rechnerunterstütztes Entwurfs- und Optimierungssystem für Schraubendruckfedern*. Dissertation, TU Ilmenau, 2003.
- [Lie06] Liebermann, K.: *Optimierung von Schraubendruckfedern*. Seminar Kaltgeformte Federn, Technische Akademie Esslingen, 2006.
- [Lie12] Lienig, J.: *Geräteentwicklung. Grundwissen für Studenten der Elektrotechnik, Mechatronik und Regenerative Energiesysteme*. Initial, Dresden, 2012.

- 
- [Liu90] Liu, H.-y.: The characteristic research of contact insertion and separation force in connector. 36th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Montreal, Kanada, 1990.
- [LLW96] Leung, C.; Lee, A.; Wang, B.-J.: Thermal Modeling of Electrical Contacts in Switches and Relays. In: IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, 19 (3), 1996, S. 346–352.
- [Löb85] Löbl, H.: Zur Dauerstrombelastbarkeit und Lebensdauer der Geräte der Elektroenergieübertragung. Dissertation, TU Dresden, 1985.
- [LSM10] Leidner, M. G.; Schmidt, H.; Myers, M.; Schlaak, H. F.: A new simulation approach to characterize the mechanical and electrical qualities of a connector contact. In: The European Physical Journal Applied Physics, 49 (2), 2010.
- [LSM13] Leidner, M.G.; Schmidt, H.; Myers, M.: Reduzierung des Engwiderstandes durch nicht Hertzsche Kontaktpaare. 22. Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe, 2013.
- [LSS07] Leidner, M.G.; Schmidt, H.; Schlaak, F.: Simulation elektrischer und mechanischer Kennwerte von Steckverbinder Kontaktpunkten. 19. Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe, 2007.
- [Mag07] Magier, T.: Untersuchungen zur Strombelastbarkeit und Erwärmung von Hochstromanlagen. Dissertation, TU Dresden, 2007.
- [MaNi11] Marek, R.; Nitsche, K.: Praxis der Wärmeübertragung. Grundlagen; Anwendungen; Übungsaufgaben. Carl Hanser Fachbuchverlag, München, 2011.
- [Mar03] Marketing Services LEONI AG: Starkstromleitungen. [http://www.leoni.com/uploads/tx\\_downloadleoni/de\\_starkstrom.pdf](http://www.leoni.com/uploads/tx_downloadleoni/de_starkstrom.pdf), 29.05.2012.

- [May03] Mayr, M.: Technische Mechanik. Carl Hanser Verlag, München, 2003.
- [McG08] McGowman, D.: Power Connector Evaluation for Thermal Performance. Applied Power Electronics Conference and Exposition, Austin, TX, USA, 2008.
- [Mer87] Merker, G. P.: Konvektive Wärmeübertragung. Springer, Berlin, Heidelberg, 1987.
- [MeWa93] Meissner, M.; Wanke, K.: Handbuch Federn. Berechnung und Gestaltung im Maschinen- und Gerätebau. Verlag Technik, Berlin, 1993.
- [MFJ07] Monnier, A.; Froidurot, B.; Jarringe, C.; Teste, P.; Meyer, R.: A Mechanical, Electrical, Thermal Coupled-Field Simulation of a Sphere-Plane Electrical Contact. In: IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 30 (4), 2007, S. 787–795.
- [Mic61] Michejew, M.: Grundlagen der Wärmeübertragung. VEB Verlag Technik, Berlin, 1961.
- [MIL91] MIL HDBK-217F: Military Handbook Reliability prediction of electronic equipment, 1991.
- [MJG13] Mroczkowski, R. S.; Jugy, R.; Gerfer, A.: Trilogie der Steckverbinder. Applikationshandbuch zur optimierten Steckverbinderwahl. Steckverbindergrundlagen und Designkriterien. Swiridoff Verlag, Waldenburg, 2013.
- [MOK96] Morita, T.; Ochuchi, K.; Kaji, M.: Numerical model of crimping by finite element method. 42nd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Chicago, USA, 1996.
- [MoSo98] Moritz, W.; Song, J.: Methodical Approach to the Improvement of Connector Performance. 20th International Conference on Electrical Contacts, Nürnberg, 1998.

- 
- [MRM05] Matek, W.; Roloff, H.; Muhs, D.: Roloff/Matek Maschinenelemente. Vieweg, Wiesbaden, 2005.
- [Mro11a] Mroczkowski, R. S.: Hertz Stress as a Connector Design Parameter. <http://www.connectorsupplier.com/hertz-stress-connector-design-parameter/>, 05.07.2016.
- [Mro11b] Mroczkowski, R. S.: Hertz Stress II - Achieving the Right Degree of Resistance. <http://www.connectorsupplier.com/hertz-stress-ii-achieving-right-degree-resistance/>.
- [Mro91] Mroczkowski, R. S.: Concerning “Hertz Stress” as a Connector Design Parameter. In: AMP Technical Paper, 1991.
- [Mro93] Mroczkowski, R. S.: Connector Design/Materials and Connector Reliability. In: AMP Technical Paper, 1993, S. 1–14.
- [Mro98] Mroczkowski, R. S.: Electronic Connector Handbook. Theory and Applications. McGraw Hill, New York, 1998.
- [MSW07] Meissner, M.; Schorcht, H.-J.; Wanke, K.: Metallfedern. Grundlagen, Werkstoffe, Berechnung und Gestaltung. Springer, Berlin Heidelberg New York, 2007.
- [Mul09] Multi-Contact: MultilamTechnology. Das MC Kontaktlamellen Prinzip. [http://www.multi-contact.com/acrofiles/catalogues/SZ\\_Multilam\\_\(de\)\\_hi.pdf](http://www.multi-contact.com/acrofiles/catalogues/SZ_Multilam_(de)_hi.pdf), 25.05.2012.
- [Mye09] Myers, M.: Overview of the Use of Silver in Connector Applications. In: Technical Paper, 2009.
- [N.N96] N.N.: Connector Engineering Design Guide. Material Selection In The Design Of Spring Contacts And Interconnections. Brush Wellman, 1996.
- [Nas10] Nasdala, L.: FEM-Formelsammlung Statik und Dynamik. Hintergrundinformationen, Tipps und Tricks. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2010.

- [New01] Newport Electronics GmbH: Emissionsfaktoren. <http://www.omega.de/pdf/ir-book/ti1008.pdf>, 26.04.2012.
- [Obe08] Oberender, L.: Die Berechnung der Stromtragfähigkeit auf Leiterplatten. <http://www.hausermann.at/upload/content/downloads/Presse/ATT00051.pdf>, 24.07.2012.
- [ODU13] ODU-Steckverbindingssysteme GmbH & Co. KG: ODU Einzelkontakte, 2013.
- [ÖOS94] Öberg, A.; Olsson, K.-E.; Saksvik, O.: Computer Simulation of the Electrical and Thermal Behaviour of Electrical Contacts. 17th International Conference on Electrical Contacts, Nagoya, Japan, 1994.
- [OTH06] Ogihara, S.; Takata, K.; Hattori, Y.: Mechanical Analysis of the Crimping Connection. 52nd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Montreal, QC, USA, 2006.
- [PAJ10] Polchow, J.R.; Angadi, S.V.; Jackson, R.L.; Choe, S.-y.; Flowers, G.T.: A Multi-Physics Finite Element Analysis of Round Pin High Power Connectors. 25th International Conference on Electrical Contacts, Charleston, SC, USA, 2010.
- [PBF07] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [PBL81] Philippow, E.; Böhme, H.; Löbl, H.; Mau, H.-J.: Taschenbuch Elektrotechnik. Band 5. Carl Hanser Verlag, München, 1981.
- [Pho13] Phoenix Contact GmbH & Co. KG: Produktkatalog. Leiterplatten-Anschlusstechnik und Elektronikgehäuse, 2013/2014.
- [Pho16] Phoenix Contact GmbH & Co. KG: Produktkatalog. <https://www.phoenixcontact.com>.

- 
- [PoKo09] Polifke, W.; Kopitz, J.: Wärmeübertragung. Grundlagen, analytische und numerische Methoden. Pearson Studium, München, 2009.
- [Pop10] Popov, V. L.: Kontaktmechanik und Reibung. Von der Nanotribologie bis zur Erdbebendynamik. Springer-Verlag, Heidelberg, 2010.
- [POS16] Parlow, J.; Otto, M.; Stahl, K.: Vom Lastenheft zur Verzahnung – anwendungsflexible Dimensionierung von Zahnradgetrieben mittels expliziten Entwurfsmodells. In: Konstruktion, 68 (3), 2016, S. 64–69.
- [PSG13] Pfeifer, S.; Schlegel, S.; Großmann, S.: Alterung stationärer Verbindungen durch Diffusion. 4. Symposium Connectors, Lemgo, 2013.
- [PWS02a] Paulke, J.; Weichert, H.; Steinhäuser, P.: Thermal simulation of switchgear. In: IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 25 (3), 2002, S. 434–439.
- [PWS02b] Paulke, J.; Weichert, H.O.; Steinhäuser, P.: Simulation of Contact Spots. 21st International Conference on Electrical Contacts, Zürich, 2002.
- [QBT91] Queffelec, J. L.; Ben Jemaa, N.; Travers, D.; Pethieu, G.: Materials and Contact Shape Studies for Automobile Connectors Development. In: IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 14 (1), 1991, S. 90–94.
- [Rie00] Rieder, W.: Elektrische Kontakte. Eine Einführung in ihre Physik und Technik. VDE-Verl, Berlin, 2000.
- [RoHo08] Roos, D.; Hoffmann, R.: Successive robust design optimization of an electronic connector. Weimar Optimization and Stochastic Days, Weimar, 2008.

- [Rot82] Roth, K.: Konstruieren mit Konstruktionskatalogen. Systematisierung und zweckmäßige Aufbereitung technischer Sachverhalte für das methodische Konstruieren. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1982.
- [SaSp92] Sawchyn, L.; Sproles, E.: Optimizing force and geometry parameters in design of reduced-insertion force connectors. In: IE-EE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, 15 (6), 1992, S. 1025–1033.
- [Sch06] Schorcht, H.-J.: Berechnung und Gestaltung von Flach- und Flachformfedern. Seminar Kaltgeformte Federn, Technische Akademie Esslingen, 2006.
- [Sch12] Schmidt, H.: Moderne Steckverbinder - Anforderungen an Materialien und Oberflächen für den funktionellen Einsatz. Vortrag, TU Ilmenau, 2012.
- [Sch13] Schumacher, A.: Optimierung mechanischer Strukturen. Grundlagen und industrielle Anwendungen. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2013.
- [ScTh11] Schmidt, H.; Thoss, S.: Elektrisches Overstressing von Kontakten oberhalb der Spezifikation. 3. Symposium Connectors, Lemgo, 2011.
- [ScWe61] Schreiner, H.; Wendler, F.: Erwärmung elektrischer Kontakte im stationären Zustand. In: Zeitschrift für angewandte Physik, 13 (3), 1961, S. 117–120.
- [SDA01] Stammberger, H.; Dehning, C.; Anheuser, M.; Zacharias, A.: Temperaturberechnungen für Schaltgeräte. 16. Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe, 2001.
- [SHB11] Schmidt, H.; Hauswald, T.; Blümmel, U.: Kontaktierung von Aluminium-Litzenleitern mittels Crimptechnologie. 21. Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe, 2011.

- 
- [SiAn14] Siegel, D.; Anheuser, M.: Significance of resistances of switching contacts for the temperature rise of LV circuit breakers. 27th International Conference on Electrical Contacts, Dresden, 2014.
- [Sla14] Slade, P. G.: Electrical contacts. Principles and applications. CRC Press, Boca Raton, 2014.
- [Son07] Song, J.: Herausforderung Steckverbindungen. 1. Symposium Connectors, Lemgo, 2007.
- [SoSc09] Song, J.; Schmidt, H.: Electrical Resistance of Connectors with Different Contact Finishes under Low Level Conditions. 55th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Vancouver, BC, Kanada, 2009.
- [SrYo93] Sridhar, M. R.; Yovanovich, M.: Elastoplastic Constriction Resistance of Sphere/Flat Contacts: Theory and Experiment. In: ASME-PUBLICATIONS-HTD, 263 1993.
- [SSH10] Sawada, S.; Shimizu, K.; Hattori, Y.; Tamai, T.; Iida, K.: Analysis of contact resistance behavior for electric contacts with plating layer. 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Charleston, SC, USA, 2010.
- [SSL04] Schoenemann, T.; Schenk, M.; Löbl, H.; Pleines, M.; Magier, T.: Optimal Design of Generator Circuit Breakers up to a Capacity of 2000 MVA using Thermal Models. 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Seattle, Washington, USA, 2004.
- [SSS09] Shimizu, K.; Shimada, S.; Sawada, S.; Hattori, Y.: Contact Area Analysis by FEM with plating Layer for Electrical Contact. In: IEICE Trans. Electron, E92-C (8), 2009, S. 1013–1019.

- [SSW14] Song, J.; Silbernagel, E.; Wang, L.: Degradation of Contact Materials - Effects of Time, Temperature and Wear. 60th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, New Orleans, LA, USA, 2014.
- [StLö72] Stoye, H.-J.; Löbl, H.: Beitrag zur Optimierung elektrotechnischer Schalt- und Verteileranlagen hinsichtlich ihrer thermischen Dauerstrombeanspruchung. Dissertation, TU Dresden, 1972.
- [Sum15] Sumitomo Electric Bordnetze: Eckdaten. <http://www.sebn.com/unsere-produkte/eckdaten/>, 10.08.2015.
- [Tab51] Tabor, D.: The Hardness of Metals. Oxford University Press, Oxford, 1951.
- [TaJö07] Taschke, H.; Jörgens, S.: Das virtuelle Labor. Möglichkeiten und Grenzen numerischer Simulationsverfahren im Entwicklungsumfeld von Steckverbindern. 1. Symposium Connectors, Lemgo, 2007.
- [Tat10] Tatarinov, D.: Berechnung und Simulation elektrischer Kontaktverbindungen. Verhalten lösbarer energietechnischer Kontaktverbindungen im Normalbetrieb. VDM Verlag Dr. Müller, Saarbrücken, 2010.
- [TiGo51] Timoshenko, S.; Goodier, J. N.: Theory of Elasticity. McGraw-Hill, New York Toronto London, 1951.
- [Tim98] Timsit, R.S.: Electrical Contact Resistance: Properties Of Stationary Interfaces. 44th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Arlington, VA, USA, 1998.
- [UL 01] UL Standards 1059: Standard for Terminal Blocks, 2001.
- [VDI14] VDI-Richtlinien 2230-1: Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen. Zylindrische Einschraubenverbindungen. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2014.

- 
- [Ver06] Verein Deutscher Ingenieure VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC): VDI-Wärmeatlas. Springer-Verlag, Berlin, 2006.
- [ViKe02] Vinaricky, E.; Keil, A.: Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen. Grundlagen, Technologien, Prüfverfahren. Springer-Verlag, Berlin, 2002.
- [Vin09] Vinaricky, E.: Datenbuch der elektrischen Kontakte. Stieglitz-Verl, Mühlacker, 2009.
- [Vin16] Vinaricky, E.: Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen. Grundlagen, Technologien, Prüfverfahren. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2016.
- [Wac06] Wack, M.: Der Kontakt macht den Unterschied. In: Mechatronik F&M, 2006, S. 46–47.
- [WaXu07] Wang, X.; Xu, L.-j.: Finite element model analysis of thermal failure in connector. In: Journal of Zhejiang University SCIENCE A, 8 (3), 2007, S. 297–402.
- [Wie99] Wieland: Wieland-Kupferwerkstoffe. Herstellung, Eigenschaften und Verarbeitung, 1999.
- [Wil81] Williamson, J.B.P.: The Microworld of the Contact Spot. 27th Holm Conference on Electrical Contacts, Chicago, IL, USA, 1981.
- [WMT12] Wilson, C.; McIntosh, G.; Timsit, R.S.: Contact Spot Temperature and the Temperature of External Surfaces in an Electrical Connection. 26th International Conference on Electrical Contacts, Peking, China, 2012.
- [Wut91] Wutz, M.: Wärmeabfuhr in der Elektronik. Vieweg, Braunschweig, 1991.

- [Yos74] Yoshioka, Y.: Calculation of current distribution in heavy current contacts with many parallel finger contacts. 7th International Conference on Electrical Contact Phenomena, Paris, 1974.
- [Yun98] Yun, L.: Mating Mechanics and Stubbing of Separable Connectors. 48th IEEE Electronic Components and Technology Conference, Seattle, Washington, USA, 1998.
- [ZBD14] Zimmer, M.; Batel, D.; Deters, L.: Lebensdauerberechnung von konzentrierten Kontakten unter Berücksichtigung von rauen Oberflächen am Beispiel von Axialzylinderrollenlagern. Tribologie Fachtagung, Göttingen, 2014.
- [ZCC08] Zhmurkin, D.V.; Corman, N.E.; Copper, C.D.; Hilty, R.D.: 3-Dimensional Numerical Simulation of Open-Barrel Crimping Process. 54th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Orlando, FL, USA, 2008.
- [ZVE06] ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e.V.: Steckverbinder - Technologien und Trends, 2006.
- [ZVE15] ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e.V.: Die Welt der Steckverbinder. Technologien und Trends, 2015.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Ladestecker der Automobiltechnik, Photovoltaik- Steckverbinder und Industrie-Steckverbinder [Pho16].....	1
Abbildung 1-2: Bauelemente einer Steckverbindung, die zwei Leitungen verbindet.....	3
Abbildung 1-3: Systemparameter in Anlehnung an [Kra00 S.22, Vin16 S.970].....	5
Abbildung 1-4: Vorgehen bei der Berechnung von Eigenschaften und bei der konstruktive Auslegung am Beispiel der Stromtragfähigkeit.....	7
Abbildung 2-1: Funktionsstruktur eines Steckverbinders mit kraftschlüssigen Verbindungen .....	12
Abbildung 2-2: Arten von Steckverbinderkontakten .....	13
Abbildung 2-3: Abstraktionsgrad und Modelltiefe bei der Simulation von Steckverbinderkontakten.....	21
Abbildung 2-4: Möglichkeiten der Optimierung.....	27
Abbildung 2-5: Modelle zur Berechnung des Wärmestroms.....	29
Abbildung 2-6: Teilwiderstände eines Steckverbinderkontaktes.....	30
Abbildung 2-7: Schematische Darstellung zur Auslegung der Kontaktkraft und begrenzende Faktoren auf die minimale und maximale Kontaktkraft vgl. [Mro98 S.7, Dij98, Lan00 S.10, Lei09 S.9, MJG13 S.103].....	32
Abbildung 2-8: Schematische Darstellung einer realen Kontaktfläche .....	42

Abbildung 2-9: Kontaktfläche bei der Kombination Kugel/Ebene.....	44
Abbildung 2-10: Spannungs-Dehnungs-Diagramm am Beispiel von Kupfer mit unterschiedlich abstrahiertem Materialverhalten .....	48
Abbildung 2-11: Spannungsverteilung an der Kontaktstelle ( $r_K = 4$ mm; $F_K = 10$ N; Elementkantenlänge grob: 100 $\mu\text{m}$ , fein: 5 $\mu\text{m}$ ; $E_S$ : 127 GPa) .....	49
Abbildung 2-12: Vergleich der Ergebnisse von unterschiedlichen Berechnungsverfahren .....	51
Abbildung 2-13: Kontaktfläche bei grober Vernetzung (10 $\mu\text{m}$ ) .....	51
Abbildung 2-14: Kontaktfläche bei feiner Vernetzung (1 $\mu\text{m}$ ) .....	51
Abbildung 2-15: Einfluss der Elementkantenlänge $le$ auf die Kontaktfläche .....	52
Abbildung 2-16: Äquipotentiallinien an einer Kontaktstelle .....	54
Abbildung 2-17: Aufbau zur Kontaktwiderstandsmessung .....	56
Abbildung 2-18: Gemessener und berechneter Kontaktwiderstand in Abhängigkeit von der Kontaktkraft; Fehlerbalken: Max./Min. ....	57
Abbildung 2-19: Simulierte und analytisch berechnete Äquipotentialflächen und Anteil des Einseitigen Engewiderstandes $RC1$ ; $a = 86 \mu\text{m}$ .....	59
Abbildung 2-20: Änderung der Stromdichte mit dem Leiterquerschnitt für Nennstrom nach DIN VDE 0298-4 bei 30 °C Umgebungstemperatur (Anhang A5 Tabelle 6-15) .....	64
Abbildung 2-21: Bestimmung des Gütefaktors .....	67

---

Abbildung 2-22: Abhängigkeit Leiteranschlusswiderstand von dem Leitungsquerschnitt berechnet nach Gleichung (2.23).....	68
Abbildung 3-1: Temperaturverlauf des Gesamtsystems Steckverbinderkontakt .....	70
Abbildung 3-2: Leistungsbilanz eines Volumenelementes .....	72
Abbildung 3-3: Einflussparameter auf den konvektiven Wärmeübergang .....	74
Abbildung 3-4: Gegenüberstellung der Wärmeübergangskoeffizienten berechnet nach [ChCh75, Böh05, Ver06] .....	76
Abbildung 3-5: Aufteilung der Bauteilgeometrie in Teilbereiche aus Grundgeometrien.....	77
Abbildung 3-6: Temperaturabhängige Wärmeübergangskoeffizienten berechnet nach Anhang A3 Tabelle 6-9 bis Tabelle 6-11 und Gleichung (3.11).....	80
Abbildung 3-7: Modell des Leiters.....	82
Abbildung 3-8: Prüfaufbau zur Messung der Temperatur an einer Leitung.....	85
Abbildung 3-9: Messung der Leitertemperatur .....	86
Abbildung 3-10: Messung der Oberflächentemperatur .....	86
Abbildung 3-11: Erwärmung einer elektrischen Leitung (berechnet nach Anhang A3 Tabelle 6-9, Tabelle 6-10, Tabelle 6-14 und Anhang A5) .....	87

Abbildung 3-12: Maximale Erwärmung des Leiters mit verschiedenen Querschnitten bei Nennstrom nach DIN VDE 0298-4 (berechnet nach Anhang A3 Tabelle 6-9, Tabelle 6-10, Tabelle 6-14 und Anhang A5).....	89
Abbildung 3-13: Modell zur Berechnung der Leitererwärmung aufgrund eines axialen Wärmestroms.....	90
Abbildung 3-14: Exponentieller Temperaturverlauf nach Gleichung (3.28).....	92
Abbildung 3-15: Berechnete thermische Ortskonstante für Leitungen mit verschiedenen Leitungsquerschnitten (berechnet nach Anhang A3 Tabelle 6-9 und Tabelle 6-10, Anhang A5 und Gleichung (3.26)).....	93
Abbildung 3-16: Schematische Darstellung des theoretischen Temperaturverlaufes eines „langen“ Kontaktstiftes (schwarz dargestellt).....	96
Abbildung 3-17: Unterteilung des Gesamtsystems in Teilbereiche für die analytische Berechnung.....	101
Abbildung 3-18: Vorgehen bei der analytischen Berechnung der Erwärmung.....	102
Abbildung 3-19: Darstellung der Einflussparameter auf die Stromtragfähigkeit.....	103
Abbildung 3-20: Geometrische Abmessungen des Steckverbinderkontaktes .....	105
Abbildung 3-21: Steckverbinderkontakt blank .....	107
Abbildung 3-22: Steckverbinderkontakt lackiert.....	107

---

Abbildung 3-23: Prüfaufbau zur Ermittlung der Temperatur der Steckverbinderkontakte .....	107
Abbildung 3-24: Gegenüberstellung berechneter und gemessener Temperaturverlauf für verschiedene Steckverbinderkontakte .....	109
Abbildung 4-1: Berechnung und konstruktive Auslegung am Beispiel von Steckverbinderkontakten .....	111
Abbildung 4-2: Wärmeströme an einem Steckverbinderkontakt .....	113
Abbildung 4-3: Temperaturverläufe verschiedener Steckverbinderkontakte .....	114
Abbildung 4-4: Theoretischer Temperaturverlauf bei unterschiedlichen Leitungsquerschnitten zur Erreichung der Grenztemperatur.....	116
Abbildung 4-5: Maximaler Wärmestrom für Leitungen nach Anhang A5 , der zu einer Erwärmung von 10 K führt (nach Gleichung (4.8)) .....	119
Abbildung 4-6: Maximaler Durchgangswiderstand bei Nennstrom der Leitungen nach Gleichung (4.8) und (4.10).....	121
Abbildung 4-7: Maximaler Strom verschiedener Leitungsquerschnitte und Durchgangswiderstände nach Gleichung (4.13).....	123
Abbildung 4-8: Abmessungen des Steckverbinderkontaktes .....	126
Abbildung 4-9: Einfluss der Anzahl der Kontaktfedern auf den Durchgangswiderstand.....	130
Abbildung 4-10: Restriktionen bei der Anzahl der Kontaktfedern ( $r_{iS}$ : 7 mm; $r_{aS}$ : 8,9 mm; $lS$ : 38 mm; $wc_S$ : 1,5 mm; $rK$ : 4 mm; $\lambda_{el\_con}$ : 56 MS/m).....	133

Abbildung 4-11: Einfluss ausgewählter Parameter auf die Erwärmung.....	135
Abbildung 4-12: Einfluss der elektrischen Leitfähigkeit auf die Erwärmung.....	138
Abbildung 5-1: Ablauf bei der thermischen Auslegung von Steckverbinderkontakten .....	140
Abbildung 5-2: Parametrisierte Modelle zur systematischen Auslegung der maximal zulässigen Verlustleistung eines Steckverbinderkontaktes, Stufe 1 .....	142
Abbildung 5-3: Vorgehen zur systematischen Auslegung des Widerstandes eines Steckverbinderkontaktes, Stufe 2 .....	143
Abbildung 6-1: Wesentliche geometrische Parameter des Steckverbinderkontaktes .....	214
Abbildung 6-2: Einfluss Anzahl Kontaktfedern 100 A; 25 mm <sup>2</sup> ; 15 MS/m .....	220
Abbildung 6-3: Einfluss Anzahl Kontaktfedern 300 A; 95 mm <sup>2</sup> ; 56 MS/m .....	220

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Den Konstruktionsphasen zugeordnete Auslegungsmethoden .....	18
Tabelle 2-2: Vor- und Nachteile der analytischen Modellbildung (für Steckverbinderkontakte) .....	23
Tabelle 2-3: Vor- und Nachteile der numerischen Simulation (für Steckverbinderkontakte) .....	25
Tabelle 2-4: Kontaktkräfte für verschiedene Oberflächenbeschichtungen und Anwendungen .....	33
Tabelle 2-5: Voraussetzungen und Vereinfachungen für die analytische Berechnung der Federkonstante [MeWa93 S.120, MSW07] .....	36
Tabelle 2-6: Zustände bei Steckverbinderkontakten für die Leistungsübertragung .....	43
Tabelle 3-1: Möglichkeiten der konstruktiven Beeinflussung .....	104
Tabelle 3-2: Gegenüberstellung gemessene Kontaktwiderstände $R_{K\_meas}$ und berechnete Engewiderstände $R_{C\_calc}$ .....	108
Tabelle 6-1: Teilfunktionen der Bauelemente (unter anderem [Mro93 S.3, Dij04 S.15, MJG11 S.97, Vin16 S.562]) .....	197
Tabelle 6-2: Einseitig eingespannter Biegebalken mit konstantem Querschnitt .....	198
Tabelle 6-3: Reihen- und Parallelschaltung von Federelementen .....	199
Tabelle 6-4: Kontaktfläche nach Hertz für ellipsoidische Kontaktkörper [Her81, Dee92] .....	199

Tabelle 6-5: Koeffizienten $\xi$ und $\eta$ zur Berechnung der Kontaktfläche nach Hertz [Her81, Dee92] .....	201
Tabelle 6-6: Berechnung der Kontaktfläche nach „Jackson und Green“ für elastisch-ideal-plastisches Materialverhalten [JaGr05] .....	202
Tabelle 6-7: Berechnung des Engewiderstandes mit dem Ellipsoid-Modell nach Holm [Hol29, Hol67].....	203
Tabelle 6-8: Wärmeströme an einem Volumenelement und Wärmebilanz .....	204
Tabelle 6-9: Dimensionslose Kennzahlen und temperaturabhängige Parameter zur Berechnung des Wärmeübergangs [Mic61, Ver06 S.2, MaNi11].....	206
Tabelle 6-10: Konvektiver Wärmeübergang einer vertikalen ebenen Fläche und eines horizontalen Zylinders [ChCh75, Ver06 S.2, MaNi11 S.193] .....	206
Tabelle 6-11: Konvektiver Wärmeübergang einer horizontalen ebenen Fläche mit Wärmeabgabe nach oben und nach unten [Ver06 S.3, MaNi11 S.194] .....	207
Tabelle 6-12: Querschnitt und Radius von widerstandsgleichen Bauelementen mit unterschiedlicher elektrischer Leitfähigkeit.....	207
Tabelle 6-13: Querschnitt und Radius von temperaturgleichen Leitungen mit unterschiedlicher elektrischer Leitfähigkeit [Kam09 S.678].....	208
Tabelle 6-14: Berechnung der Erwärmung einer langen Leitung [MaNi11 S.99] .....	208
Tabelle 6-15: Geometrische Abmessungen und Nennstrom für unterschiedliche Leitungsquerschnitte .....	210

Tabelle 6-16: Geometrisch-stoffliche Parameter des Steckverbinderkontaktes .....	211
Tabelle 6-17: Geometrische Parameter des Steckverbinderkontaktes .....	211
Tabelle 6-18: Werkstoffeigenschaften der untersuchten Steckverbinderkontakte .....	211
Tabelle 6-19: Geometrisch-stoffliche Parameter des Referenzsteckverbinders (100 %) .....	212



## Anhang

## **A1 Auswahl wichtiger Eigenschaften von Steckverbinderkontakten**

### Elektrisch

- Hohe Stromtragfähigkeit
- Geringer Kontaktwiderstand
- Minimaler Energieverlust
- Minimale Änderung der Signalform
- Ausreichende Isolation
- Güte für Hochfrequenzübertragung
- Ggf. Schaltvermögen

### Mechanisch

- Niedrige Steck- und Ziehkräfte
- Hohe Anzahl an Steckzyklen
- Ausreichende Vibrationsbeständigkeit
- Toleranzenausgleich
- Steckkompatibilität
- Geringer Bauraum

### Langzeitstabilität

- Stabiler Kontaktwiderstand
- Hohe Zuverlässigkeit
- Geringe Spannungsrelaxation
- Beständigkeit gegen Korrosion
- Beständigkeit gegen Reiboxidation

## A2 Wesentliche Teilfunktionen der Bauelemente einer Steckverbindung

Tabelle 6-1: Teilfunktionen der Bauelemente (unter anderem [Mro93 S.3, Dij04 S.15, MJG11 S.97, Vin16 S.562])

Bauelement	Teilfunktionen
<b>Kontaktbuchse</b> (weibliches Kontaktelement) inkl. Kontaktfedern	Kontaktkraft erzeugen, halten und verteilen Elektrischen Kontakt zu dem Kontaktstift herstellen Strom / Signal leiten Wärme leiten Wärmeabfuhr über die Oberfläche Kraft- und Wegausgleich Toleranzausgleich
<b>Kontaktstift</b> (männliches Kontaktelement)	Elektrischen Kontakt zu der Kontaktbuchse herstellen Strom / Signal leiten Wärme leiten Wärmeabfuhr über die Oberfläche Führen der Kontaktbuchse
<b>Leiteranschluss</b>	Kontaktkraft zwischen Steckverbinderkontakt und Leiter erzeugen Verbindung des Leiters mit der Kontaktbuchse bzw. Kontaktstift Wärme leiten Wärmeabfuhr über die Oberfläche
<b>Leitung</b>	Strom / Signal leiten Wärme leiten Wärmeabfuhr über die Oberfläche
<b>Gehäuse (Kontaktträger)</b>	Elektrische Isolierung Positionierung der Bauelemente Geometrische Rasterung Schutz vor Umgebungseinflüssen Mechanischer Schutz Stecken und Ziehen unterstützen bzw. verhindern Verrastung Wärme leiten Wärmeabfuhr über die Oberfläche zur Umgebung Kodierung

### A3 Formelsammlung

Tabelle 6-2: Einseitig eingespannter Biegebalken mit konstantem Querschnitt

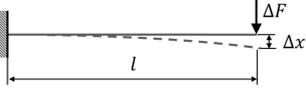
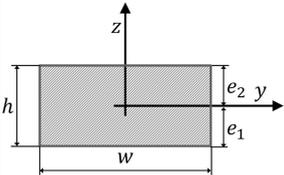
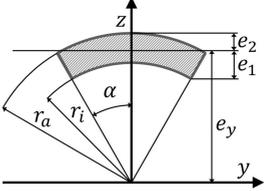
		
Federkonstante [Hor87, MeWa93 S.120]	$C = \frac{\Delta F}{\Delta x} = \frac{3 \cdot E \cdot I_b}{l^3} \quad (6.1)$	
Form des Querschnittes	Rechteck	Kreisringstück
		
Axiales Flächenmoment 2. Grades [MeWa93 S.119, May03]	$I_{by} = \frac{w \cdot h^3}{12} \quad (6.2)$	$I_{by} = \frac{1}{8} \cdot (r_a^4 - r_i^4) \cdot (2\alpha + \sin(2\alpha)) - e_y^2 \cdot \alpha \cdot (r_a^2 - r_i^2) \quad (6.3)$
Schwerpunkt [May03]		$e_y = \frac{2}{3} \cdot \frac{(r_a^3 - r_i^3) \cdot \sin(\alpha)}{(r_a^2 - r_i^2) \cdot \alpha} \quad (6.4)$
Maximale Randfaser- spannung [Kra04 S.124, BöBö11]	$\sigma_{b\_max} = \frac{M_{b\_max}}{W_b} \quad (6.5)$	
Widerstandsmoment bei Biegung [Kra04 S.125]	$W_b = \frac{I_b}{e_{1,2}} \quad (6.6)$	
Maximal zulässige Kon- taktkraft [ViKe02 S.666, BrNo06]	$F_{K\_max} = \frac{\sigma_{b\_max} \cdot W_b}{l} \quad (6.7)$	
Maximal zulässige Aus- lenkung [ViKe02 S.666, BrNo06]	$x_{max} = \frac{F_{K\_max}}{C_{S1}} \quad (6.8)$	

Tabelle 6-3: Reihen- und Parallelschaltung von Federelementen

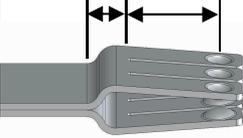
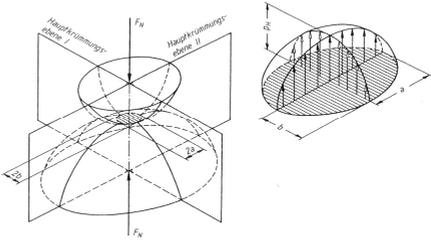
	Parallelschaltung	Reihenschaltung
		
Gesamtfederweg	$\Delta x = \Delta x_1 = \Delta x_2 = \dots \Delta x_n$ (6.9)	$\Delta x = \Delta x_1 + \Delta x_2 + \dots \Delta x_n$ (6.10)
Gesamtfederkraft	$F_{K\_tot} = F_1 + F_2 + \dots F_n$ (6.11)	$F = F_1 = F_2 = \dots F_n$ (6.12)
Gesamtfedersteifigkeit	$C = C_1 + C_2 + \dots C_n$ (6.13)	$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots \frac{1}{C_n}$ (6.14)

Tabelle 6-4: Kontaktfläche nach Hertz für ellipsoidische Kontaktkörper [Her81, Dec92]

		[FrSc10]
Ersatzradien aus Hauptkrümmungsradien <sup>11</sup>	$\frac{1}{r_{i1}} + \frac{1}{r_{i2}} = \frac{1}{r_{11}} + \frac{1}{r_{12}} + \frac{1}{r_{21}} + \frac{1}{r_{22}}$	(6.15)
Ersatzradien	$\frac{1}{r_{i1}} - \frac{1}{r_{i2}} = \sqrt{\left(\frac{1}{r_{11}} - \frac{1}{r_{12}}\right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{1}{r_{11}} - \frac{1}{r_{12}}\right) \cdot \left(\frac{1}{r_{21}} - \frac{1}{r_{22}}\right) \cdot \cos 2\omega} + \left(\frac{1}{r_{21}} - \frac{1}{r_{22}}\right)^2}$	(6.16)
Große Halbachse	$a = \xi \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot F \cdot (\theta_1 + \theta_2)}{8 \cdot \left(\frac{1}{r_{i1}} + \frac{1}{r_{i2}}\right)}}$	(6.17)
Kleine Halbachse	$b = \eta \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot F \cdot (\theta_1 + \theta_2)}{8 \cdot \left(\frac{1}{r_{i1}} + \frac{1}{r_{i2}}\right)}}$	(6.18)

<sup>11</sup> Die Werte der Radien seien positiv gerechnet, wenn die zugehörigen Mittelpunkte im Inneren des betreffenden Körpers liegen (konvexe Körper). Für konkave Körper müssen die Radien negativ angenommen werden [Her81, TiGo51, Joh03].

Hertz-Koeffizienten	$(\theta_1 + \theta_2) = 4 \cdot \frac{1}{E'} \quad (6.19)$
Resultierendes Elastizitätsmodul	$\frac{1}{E'} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (6.20)$
Hilfswinkel	$\Omega = \arccos \left( \frac{\frac{1}{r_{i1}} - \frac{1}{r_{i2}}}{\frac{1}{r_{i1}} + \frac{1}{r_{i2}}} \right) \quad (6.21)$
Koeffizienten $\xi$ und $\eta$ <sup>12</sup>	Siehe Tabelle 6-5 <span style="float: right;">(6.22)</span>
Druckverteilung	$\sigma_{z=0}(x, y) = 1,5 \cdot \frac{F}{\pi \cdot a \cdot b} \cdot \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}} \quad (6.23)$
Mögliche Kombinationen	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ellipsoid / Ellipsoid</li> <li>Ellipsoid / Kugel</li> <li>Ellipsoid / Zylinder</li> <li>Ellipsoid / Ebene</li> <li>Kugel / Kugel</li> <li>Kugel / Zylinder</li> <li>Kugel / Ebene</li> <li>Zylinder / Zylinder gekreuzt</li> <li>Zylinder / Ebene</li> </ul> <span style="float: right;">(6.24)</span>
Vereinfachungen für Kombination Kugel/Ebene aus gleichem Werkstoff	$E_1 = E_2 = E$ $\nu_1 = \nu_2 = \nu$ $\xi = \eta = 1$ $r_{11} = r_{12} = r_K$ $r_{21} = r_{22} = \infty$ <span style="float: right;">(6.25)</span>
Radius der Kontaktfläche bei Kugel auf Ebene	$a_{eL/K/E} = \sqrt[3]{\frac{1,5 \cdot F_K \cdot (1 - \nu^2) \cdot r_K}{E}} \quad (6.26)$
Kontaktdruck	$p(x) = p_{max} \cdot \sqrt{a^2 - x^2} \quad (6.27)$ mit:
	$p_{max} = 1,5 \cdot \frac{F_K}{a^2 \cdot \pi} \quad (6.28)$

<sup>12</sup> In Abhängigkeit von dem Hilfswinkel  $\Omega$  werden die Koeffizienten  $\xi$  und  $\eta$  ermittelt. Von Hertz [Her81] wurde eine Tabelle mit den Koeffizienten angegeben. Diese Tabelle wurde durch Lösen von Integralen von Deeg [Dee92] neu berechnet und ergänzt. Laut Hertz [Her82] wird die Interpolation zwischen diesen Werten genügende Genauigkeit bieten.

Tabelle 6-5: Koeffizienten  $\xi$  und  $\eta$  zur Berechnung der Kontaktfläche nach Hertz [Her81, Dee92]

$\beta$	$\xi$	$\eta$
0	99999999	0
2	22,044	0,177
4	13,224	0,224
5	11,171	0,244
6	9,771	0,257
8	7,845	0,287
10	6,600	0,313
15	4,805	0,366
20	3,815	0,412
25	3,178	0,454
30	2,729	0,494
35	2,394	0,531
40	2,135	0,567
45	1,926	0,604
50	1,754	0,641
55	1,609	0,678
60	1,486	0,717
65	1,379	0,758
70	1,285	0,800
75	1,202	0,845
80	1,128	0,893
85	1,061	0,944
90	1	1

Tabelle 6-6: Berechnung der Kontaktfläche nach „Jackson und Green“ für elastisch-idealplastisches Materialverhalten [JaGr05]

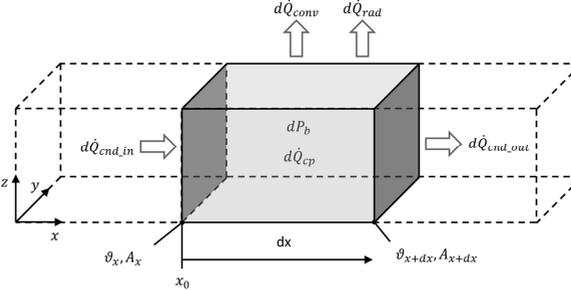
Kritische Eindringtiefe, bei der die erste plastische Verformung im Werkstoff auftritt	$\omega_c = \left( \frac{\pi \cdot C \cdot R_{p0,2}}{2 \cdot E'} \right)^2 \cdot r_K \quad (6.29)$
Aus numerischen Simulationen empirisch ermittelter Koeffizient	$C = 1,295 \cdot e^{0,736 \cdot \nu}$ Gültigkeit: $\nu = 0,01 \dots 0,5$ (6.30)
Kritische Kontaktkraft (Übergang rein elastisch zu elastisch-plastisch)	$F_c = \frac{4}{3} \cdot \left( \frac{r_K}{E'} \right)^2 \cdot \left( \frac{\pi \cdot C \cdot R_{p0,2}}{2} \right)^3 \quad (6.31)$
Normierte Eindringtiefe	$\omega^* = \frac{\omega}{\omega_c} \quad (6.32)$
Kritische Eindringtiefe (Übergang rein elastisch zu elastisch-plastisch)	$\omega_t^* = 1,9 \quad (6.33)$
Angepasste Kontaktfläche	Rein elastischer Bereich ( $0 \leq \omega^* \leq \omega_t^*$ ) $A_F^* = \omega^* \quad (6.34)$
	Elastisch-plastischer Bereich ( $\omega_t^* \leq \omega^*$ ) $A_F^* = \omega^* \cdot \left( \frac{\omega^*}{\omega_t^*} \right)^B \quad (6.35)$
Aus numerischen Simulationen empirisch ermittelter Koeffizient	$B = 0,14 \cdot e^{23 \cdot e \cdot \nu} \quad (6.36)$
Geometrieabhängige Härte	$\frac{H_G}{R_{p0,2}} = 2,84 \cdot \left[ 1 - e^{-0,82 \cdot \left( \frac{\pi \cdot C \cdot e \cdot \nu \cdot \sqrt{\omega^*} \cdot \left( \frac{\omega^*}{\omega_t^*} \right)^{\frac{B}{2}} \right)^{-0,7}} \right]$ Gültigkeit: $0 < \frac{a}{r_K} \leq 0,412$ (6.37)
Uniaxiale Dehngrenze	$e_y = \frac{R_{p0,2}}{E'} \quad (6.38)$
Dimensionslose Kontaktkraft	Rein elastischer Bereich ( $0 \leq \omega^* \leq \omega_t^*$ ) $F_F^* = (\omega^*)^{\frac{3}{2}} \quad (6.39)$
	Elastisch-plastischer Bereich ( $\omega_t^* \leq \omega^*$ ) $F_F^* = \left[ e^{\frac{1}{4} \cdot (\omega^*)^{\frac{5}{12}}} \right] \cdot (\omega^*)^{\frac{3}{2}} + \frac{4 \cdot H_G}{C \cdot R_{p0,2}} \cdot \left[ 1 - e^{-\frac{1}{25} \cdot (\omega^*)^{\frac{5}{9}}} \right] \cdot \omega^* \quad (6.40)$
Normierte Kontaktkraft	$F^* = \frac{F}{F_c} \quad (6.41)$

Elastisch-plastische Kontaktfläche	$A_{el.pl} = \frac{F}{R_{p0,2}} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{A_F^*}{C \cdot F_F^*} \quad (6.42)$
Vereinfachende Annahmen	Elastisch-ideal-plastisches Materialverhalten Kugel gegen starre Ebene Reibungsfreier Kontakt Ideal glatte Oberfläche

Tabelle 6-7: Berechnung des Engewiderstandes mit dem Ellipsoid-Modell nach Holm [Hol29, Hol67]

	Kreisförmige Kontaktflächen	Elliptische Kontaktflächen
Einseitiger Engewiderstand	$R_{C1}(\mu) = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot a} \cdot \arctan\left(\frac{\sqrt{\mu}}{a}\right) \quad (6.43)$	$R_{C1}(a, b) = \frac{\rho}{\pi \cdot (a + b)} \cdot K(k) \quad (6.44)$ <p>Mit</p> $K(k) \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{\ln 16}{1 - k^2} \quad (6.45)$ $k = \frac{a - b}{a + b} \quad (6.46)$

Tabelle 6-8: Wärmeströme an einem Volumenelement und Wärmebilanz

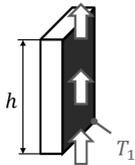
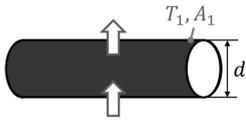
	
Joule'sche Verlustleistung	$P_b = R_b \cdot I^2 \quad (6.47)$
Elektrischer Widerstand	$R_b = \frac{dx}{\lambda_{el} \cdot A_x} \quad (6.48)$
Differenzielle Verlustleistung	$dP_b = \frac{I^2}{\lambda_{el} \cdot A_x} \cdot dx \quad (6.49)$
Zur Erhöhung der inneren Enthalpie beitragende Wärmemenge	$\dot{Q}_{cp} = m \cdot c_p \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} \quad (6.50)$
Masse	$m = A_x \cdot \rho \cdot dx \quad (6.51)$
Differenzielle Wärmemenge zur Erhöhung der inneren Enthalpie	$d\dot{Q}_{cp} = A_x \cdot \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} \cdot dx \quad (6.52)$
Fourier'scher Wärmeleitungssatz	$\vec{Q}_{cnd}(\vec{x}) = -\lambda_{th}(\vec{x}) \cdot A_x(\vec{x}) \cdot \text{grad} \vartheta \quad (6.53)$
An der Stelle $x$ über die Fläche $A_x$ in das Volumenelement eingeleiteter Wärmestrom (eindimensionalen Fall)	$d\dot{Q}_{cnd\_in} = -\lambda_{th} \cdot A_x \cdot \left. \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right _x \quad (6.54)$
An der Stelle $x + dx$ wird ein Wärmestrom aufgrund von Wärmeleitung aus dem Volumen herausgeleitet (Taylorreihenentwicklung und Abbruch nach dem 1. Glied)	$\begin{aligned} d\dot{Q}_{cnd\_out} &= -\lambda_{th} \cdot A_{x+dx} \cdot \left. \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right _{x+dx} \\ d\dot{Q}_{cnd\_out} &= -\lambda_{th} \cdot A_{x+dx} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left( \vartheta(x) + \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \cdot dx \right) \\ d\dot{Q}_{cnd\_out} &= -\lambda_{th} \cdot A_{x+dx} \cdot \left. \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right _x - \lambda_{th} \cdot A_{x+dx} \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} \cdot dx \end{aligned} \quad (6.55)$

Wärmeabfuhr über die Oberfläche (Newton'sches Abkühlungsgesetz)	$\dot{Q}_{conv\_rad} = h_{conv\_rad} \cdot A_o \cdot (\vartheta(x) - \vartheta_{\infty\_F}) \quad (6.56)$
Bezogen auf die Länge	$d\dot{Q}_{conv\_rad} = h_{conv\_rad} \cdot U \cdot (\vartheta(x) - \vartheta_{\infty\_F}) \cdot dx$ $d\dot{Q}_{conv\_rad} = h_{conv\_rad} \cdot U \cdot \vartheta(x) \cdot dx - h_{conv\_rad} \cdot U \cdot \vartheta_{\infty\_F} \cdot dx \quad (6.57)$
Vereinfachung: konstanter Querschnitt	$A_{x+dx} = A_x \quad (6.58)$
Wärmebilanz an einem Volumenelement	$dP_b - d\dot{Q}_{cp} + d\dot{Q}_{cnd\_in} - d\dot{Q}_{cnd\_out} - d\dot{Q}_{conv\_rad} = 0 \quad (6.59)$
Wärmebilanz	$\lambda_{th} \cdot A_x \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} \cdot dx - h_{conv\_rad} \cdot U \cdot \vartheta(x) \cdot dx + h_{conv\_rad} \cdot U \cdot \vartheta_{\infty\_F} \cdot dx + \frac{I^2}{\lambda_{el} \cdot A_x} \cdot dx - A_x \cdot \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} \cdot dx - \lambda_{th} \cdot A_x \cdot \left. \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right _x + \lambda_{th} \cdot A_x \cdot \left. \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right _{x+dx} = 0 \quad (6.60)$
Kürzen und Umstellen [PBL81 S.778]	$\lambda_{th} \cdot A_x \cdot \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} - h_{conv\_rad} \cdot U \cdot \vartheta(x) + h_{conv\_rad} \cdot U \cdot \vartheta_{\infty\_F} + \frac{I^2}{\lambda_{el} \cdot A_x} = A_x \cdot \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} \quad (6.61)$
Differenzialgleichung 2. Ordnung	$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} - \frac{h_{conv\_rad} \cdot U}{\lambda_{th} \cdot A_x} \cdot \vartheta(x) + \frac{h_{conv\_rad} \cdot U}{\lambda_{th} \cdot A_x} \cdot \vartheta_{\infty\_F} + \frac{I^2}{\lambda_{el} \cdot A_x \cdot \lambda_{th} \cdot A_x} = \frac{A_x \cdot \rho \cdot c_p}{\lambda_{th} \cdot A_x} \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial t} \quad (6.62)$
Für den stationären Fall $\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = 0$	$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} - \frac{h_{conv\_rad} \cdot U}{\lambda_{th} \cdot A_x} \cdot \vartheta(x) + \frac{h_{conv\_rad} \cdot U}{\lambda_{th} \cdot A_x} \cdot \vartheta_{\infty\_F} + \frac{I^2}{\lambda_{el} \cdot \lambda_{th} \cdot A_x^2} = 0 \quad (6.63)$

Tabelle 6-9: Dimensionslose Kennzahlen und temperaturabhängige Parameter zur Berechnung des Wärmeübergangs [Mic61, Ver06 S.2, MaNi11]

Charakteristische Länge	$l_{char} = \frac{A}{U_{proj}} \quad (6.64)$
Grashof-Zahl	$Gr := \frac{g \cdot l_{char}^3 \cdot \beta_p}{\nu^2} \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_{\infty_F}) \quad (6.65)$
Prandtl-Zahl	$Pr := \frac{\nu}{a} = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda_{th_F}} \quad (6.66)$
Rayleigh-Zahl	$Ra := Gr \cdot Pr \quad (6.67)$
Thermischer Ausdehnungskoeffizient des Fluides	$\beta_p = \frac{1}{T_m} \quad (6.68)$
Gemittelte Temperatur zur Berechnung der temperaturabhängigen Stoffwerte des Fluids	$\vartheta_m = \frac{1}{2} \cdot (\vartheta_1 + \vartheta_{\infty_F}) \quad (6.69)$

Tabelle 6-10: Konvektiver Wärmeübergang einer vertikalen ebenen Fläche und eines horizontalen Zylinders [ChCh75, Ver06 S.2, MaNi11 S.193]

	Vertikale ebene Fläche	Horizontaler Zylinder
		
Gültigkeit	$10^{-1} < Ra < 10^{12} \quad (6.70)$	$3,9 \cdot 10^{-5} < Ra < 3,9 \cdot 10^{12} \quad (6.71)$
Nußelt-Zahl	$Nu = \{0,825 + 0,387 \cdot [Ra \cdot f_1(Pr)]^{1/6}\}^2 \quad (6.72)$	$Nu = \{0,752 + 0,387 \cdot [Ra \cdot f_3(Pr)]^{1/6}\}^2 \quad (6.73)$ Anmerkung <sup>13</sup>

<sup>13</sup> Hier wird für einen unendlich langen horizontalen Zylinder die von [Ver06] verwendete Gleichung zur Berechnung der Nußelt-Zahl verwendet, obwohl sie leicht von der Originalquelle [ChCh75] abweicht. In [ChCh75] steht der Faktor 0,6 und in [Ver06] der Faktor 0,752. Berechnungen mit dem Faktor 0,6 ergeben allerdings tendenziell zu geringe Wärmeübergangskoeffizienten.

Einfluss der Prandtl-Zahl in dem Bereich $0 < Pr < \infty$	$f_1(Pr) = \left[ 1 + \left( \frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{-16/9}$ (6.74)	$f_3(Pr) = \left[ 1 + \left( \frac{0,559}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{-16/9}$ (6.75)
Charakteristische Länge	$l_{char} = h$ (6.76)	$l_{char} = \frac{\pi}{2} \cdot d$ (6.77)

Tabelle 6-11: Konvektiver Wärmeübergang einer horizontalen ebenen Fläche mit Wärmeabgabe nach oben und nach unten [Ver06 S.3, MaNi11 S.194]

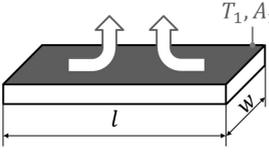
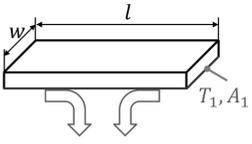
	Horizontale ebene Fläche mit Wärmeabgabe nach oben	Horizontale ebene Fläche mit Wärmeabgabe nach unten
		
Gültigkeit	$Ra \cdot f_2(Pr) \leq 7 \cdot 10^4$ (Laminare Strömung) (6.78)	$10^3 \leq Ra \cdot f_1(Pr) \leq 10^{10}$ (Laminare Strömung) (6.79)
Nußelt-Zahl	$Nu = 0,766 \cdot [Ra \cdot f_2(Pr)]^{1/5}$ (6.80)	$Nu = 0,6 \cdot [Ra \cdot f_1(Pr)]^{1/5}$ (6.81)
Einfluss der Prandtl-Zahl	$f_2(Pr) = \left[ 1 + \left( \frac{0,322}{Pr} \right)^{11/20} \right]^{-20/11}$ (6.82)	$f_1(Pr) = \left[ 1 + \left( \frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{-16/9}$ (6.83)
Charakteristische Länge	$l_{char} = \frac{l \cdot w}{2 \cdot (l + w)}$ (6.84)	$l_{char} = \frac{l \cdot w}{2 \cdot (l + w)}$ (6.85)

Tabelle 6-12: Querschnitt und Radius von widerstandsgleichen Bauelementen mit unterschiedlicher elektrischer Leitfähigkeit

Eigenschaft	Ansatz	Berechnung
Querschnitt	$R'_b = R'_w$ (6.86)	$A_{x,P} = \frac{\lambda_{el,W}}{\lambda_{el,b}} \cdot A_{x,W}$ (6.87)
Radius	$A_x = \pi \cdot r^2$ (6.88)	$r_P = \sqrt{\frac{\lambda_{el,W}}{\lambda_{el,b}}} \cdot r_W$ (6.89)

Tabelle 6-13: Querschnitt und Radius von temperaturgleichen Leitungen mit unterschiedlicher elektrischer Leitfähigkeit [Kam09 S.678]

Eigenschaft	Ansatz	Berechnung
Querschnitt	$\Delta\vartheta_{\infty_P} = \Delta\vartheta_{\infty_W}$ (6.90)	$A_{x_P} = \sqrt[3]{\left(\frac{\lambda_{el_W}}{\lambda_{el_b}}\right)^2} \cdot A_{x_W}$ (6.91)
Radius	$A_x = \pi \cdot r^2$ (6.92)	$r_P = \sqrt[3]{\frac{\lambda_{el_W}}{\lambda_{el_b}}} \cdot r_W$ (6.93)

Tabelle 6-14: Berechnung der Erwärmung einer langen Leitung [MaNi11 S.99]

Erwärmung an der Oberfläche der Leitung	$\Delta\vartheta_{a,I} = \frac{I^2}{\lambda_{el_W} \cdot A_{x_W} \cdot h_{conv,rad,W} \cdot U_{o,W}}$	(6.94)
Temperaturdifferenz an der Isolierung	$\Delta\vartheta_I = \Delta\vartheta_{\infty,W} - \Delta\vartheta_{a,I} = R_W \cdot I^2 \cdot \left( \frac{\ln\left(\frac{r_{a,I}}{r_{i,I}}\right)}{\lambda_{th,I} \cdot 2 \cdot \pi \cdot l_W} \right)$	(6.95)
Maximaltemperatur der Leitung	$\vartheta_{\infty,W} = \vartheta_{\infty,F} + \Delta\vartheta_{a,I} + \Delta\vartheta_I$	(6.96)

---

## A4 Mögliche Einflussparameter auf den Kontaktwiderstand

Anzahl, Verteilung, Geometrie und Größe der a-spots  
Geometrische Eigenschaften und Werkstoffkennwerte von Basismaterial, Zwischenschicht, Diffusionsschicht und Oberflächenbeschichtung

- Elastizitätsmodul
- Dehngrenze
- Zugfestigkeit
- Härte
- Querkontraktionszahl
- Elektrische und thermische Leitfähigkeit
- Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes
- Dicke
- Verteilung

Geometrische, mechanische, elektrische und thermische Eigenschaften

- Fremdschichten
- Passivierungen
- Öle / Fette

Temperaturen

- Bauelemente: Umgebung, Kontaktpunkt
- Materialeigenschaften: Entfestigungs- und Schmelztemperatur

Kontaktkraft

Geometrie des Kontaktes z.B. Radius der Kugelfläche

Rauheit

Relativbewegungen beim Stecken (Kontaktreibung)

Reibungszahl

Anzahl Steckzyklen

Fretting

Flächenpressung

Zeit

Tunnel-Effekt

Stromdichteverteilung

Frequenz

## A5 Geometrische und elektrische Parameter von Leitungen

Tabelle 6-15: Geometrische Abmessungen und Nennstrom für unterschiedliche Leitungsquerschnitte

Nennquerschnitt	Durchmesser Leiter <sup>a</sup>	Außendurchmesser der Leitung <sup>b</sup>	Dicke der Isolierung <sup>c,d</sup>	Maximal zulässiger spezifischer Widerstand <sup>e</sup>	Nennstrom <sup>f</sup>
[mm <sup>2</sup> ]	[mm]	[mm]	[mm]	[mΩ/m]	[A]
16	4,51	7,4	1,0	1,21	98
25	5,64	9,1	1,2	0,780	129
35	6,68	10,3	1,2	0,554	158
50	7,98	12,8	1,4	0,386	198
70	9,44	14,6	1,4	0,272	245
95	11,00	17,1	1,6	0,206	292

<sup>a</sup>Berechnet aus Nennquerschnitt

<sup>b</sup>Datenblatt [Bal09]

<sup>c</sup>DIN EN 50525-2-31 [DIN11 S.11]

<sup>d</sup> Wärmeleitfähigkeit der Isolierung: 0,17 W/(m·K)

<sup>e</sup>DIN EN 60228 [DIN04 S.10] bei 20 °C, Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes: 4·10<sup>-3</sup> 1/K [DIN04 S.13]

<sup>f</sup>DIN VDE 0298-4 [DIN13 S.36] Umgebungstemperatur: 30 °C

## A6 Geometrisch-stoffliche Parameter der untersuchten Steckverbinderkontakte

Tabelle 6-16: Geometrisch-stoffliche Parameter des Steckverbinderkontaktes

Beschreibung	Symbol	Parameter	Einheit
Mechanische Länge der Kontaktfeder	$l_{S\ mech}$	26	mm
Elektrisch leitende Länge der Kontaktfeder	$l_S$	16	mm
Höhe der Kontaktfeder	$h_S$	1,2	mm
Schnittbreite zwischen den Kontaktfedern	$w_{c,S}$	1,2	mm
Radius der Kugelfläche des Kontaktpunktes	$r_K$	4	mm
Maximale Gesamtbreite des Steckverbinderkontaktes	$w_{con,max}$	20	mm
Summe der Kontaktkräfte	$F_{K\ tot}$	40	N
Kontaktwiderstand	$R_{K\ Sx}$	0,12	mΩ
Elastizitätsmodul	$E_S$	130.000	N/mm <sup>2</sup>
Elektrische Leitfähigkeit	$\lambda_{el}$	56	MS/m
Querkontraktionszahl	$\nu$	0,34	-

Tabelle 6-17: Geometrische Parameter des Steckverbinderkontaktes

Beschreibung	Symbol	Parameter	Einheit
Mechanische Länge der Kontaktfeder	$l_{S\ mech}$	26	mm
Höhe der Kontaktfeder	$h_S$	1,2	mm
Breite einer Kontaktfeder	$w_{S1}$	8,0	mm
Höhe des Kontaktstiftes	$h_P$	2,4	mm
Breite des Kontaktstiftes	$w_P$	8,0	mm
Radius der Kugelfläche des Kontaktpunktes	$r_K$	4	mm
Auslenkung der Kontaktfeder	$\Delta x_S$	0,475	mm

Tabelle 6-18: Werkstoffigenschaften der untersuchten Steckverbinderkontakte

Nr.	Werkstoffbezeichnung	Elektrische Leitfähigkeit	Wärmeleitfähigkeit	Elastizitätsmodul	Dehngrenze $R_{p0,2}$	Zugfestigkeit	El. Temp.-Koeffizient $\alpha_{el}$
	EN	MS/m	W/(m·K)	GPa	MPa	MPa	10 <sup>-3</sup> /K
1	Cu-PHC	56	400	127	320	360	3,7
2	CuFe2P	33	236	123	240	340	3,3
3	CuZn10	24	172	124	290	350	1,8

Tabelle 6-19: Geometrisch-stoffliche Parameter des Referenzsteckverbinders (100 %)

Kontaktkraft einer Kontaktfeder	$F_{K,Sx}$	11,8 N
Materialverhalten		Elastisch-ideal-plastisch
Elektrische Leitfähigkeit des Basismaterials	$\lambda_{el}$	56 MS/m
Nennquerschnitt der Leitung	$A_{x,W}$	35 mm <sup>2</sup>
Nennstrom	$I_N$	158 A DC
Umgebungstemperatur	$\vartheta_{\infty,F}$	25 °C
Emissionsgrad des Steckverbinderkontaktes	$\varepsilon_{12,con}$	0,92
Querschnitt des Bahnbereiches	$A_{x,b}$	19,2 mm <sup>2</sup>
Bewertete Temperatur	$\vartheta_p$	Maximale Oberflächentemperatur am Kontaktstift

## A7 Ergänzung möglicher Fragestellungen und Einflüsse

### Geometrieänderungen am Steckverbinderkontakt

- Veränderung des Strompfades z.B. aufgrund von Verlängerung oder Verkürzung einzelner Bereiche des Steckverbinderkontaktes
- Änderung der Geometrie des Steckverbinderkontaktes z.B. durch lokale Verengungen von Teilabschnitten
- Einfluss der Skalierung unterschiedlicher Parameter
- Einfluss von Toleranzen auf die Erwärmung

### Werkstoffänderungen

- Einfluss einer Änderung des Basismaterials auf die elektrisch-thermischen Eigenschaften

### Änderungen der Randbedingungen

- Starke Änderung des Wärmeübergangskoeffizienten z.B. bei Erdverlegung, Häufung im Kabelkanal oder Anwendungen im Vakuum
- Wärmeabfuhr durch z.B. Thermoelemente oder den Prüfaufbau
- Verwendung kurzer Leitungen anstatt langer Leitungen
- An einen bestehenden Steckverbinderkontakt wird ein anderer Leiter angeschlossen (Querschnitt, Aufbau oder anderer Werkstoff z.B. Aluminium) bzw. Verwendung eines kleineren Steckverbinderkontaktes für eine bestehende Leitung

### Schadensszenarien

- Einfluss der Beschädigung von einzelnen Kontaktfedern
- Szenarien zur Erreichung verschiedener Grenztemperaturen

### Grundlegende Einflüsse und Unterschiede

- Unterschied Rund- und Flachkontakt bei gleichem Bauraum
- Einfluss der Umgebungstemperatur auf die Erwärmung
- Umschlagpunkt, ab wann der Wärmestrom aus dem Leiter in das Kontaktsystem tritt
- Auslegung von Steckverbinderkontakten, die keine zusätzliche Erwärmung hervorrufen
- Untersuchung möglicher Vereinfachungen z.B. Vernachlässigung des Einflusses des Temperaturkoeffizienten des elektrischen Widerstandes oder Verwendung von temperatur- und geometrieunabhängigen Wärmeübergangskoeffizienten



Das Ziel ist eine grenzwertige Auslegung der Steckverbinderkontakte auf eine Erwärmung von 45 K. Die Steckverbinderkontakte sollen hinsichtlich einer bestimmten Stromtragfähigkeit ausgelegt werden. Deshalb müssen der Nennstrom  $I_N$ , die maximale Erwärmung  $\Delta\vartheta_{max}$  und die Umgebungstemperatur  $\vartheta_{\infty F}$  vorgegeben werden. Des Weiteren wird eine maximal zulässige Ziehkraft  $F_{Z,max}$  festgelegt, wobei diese für kleinere Steckverbinderkontakte geringer ist.

1	V	Nennstrom	$I_N$		<b>100 A</b>	<b>300 A</b>
2	V	Maximale Erwärmung	$\Delta\vartheta_{max}$		45 K	45 K
3	V	Umgebungstemperatur	$\vartheta_{\infty F}$		25 °C	25 °C
4	V	Maximale Ziehkraft	$F_{Z,max}$		4 N	8 N

Fertigungstechnisch muss eine minimale Schnittbreite  $w_{c,S}$  zwischen den Kontaktfedern vorgegeben werden. Zudem ist für das Einführen des Kontaktstiftes in die Kontaktbuchse und für das Anstellen der Kontaktfedern eine minimale Spaltbreite zwischen den beiden Bauelementen nötig.

5	V	Minimale Schnittbreite zwischen den Kontaktfedern	$w_{c,S}$		1 mm	1,5 mm
6	V	Spalt zwischen Kontaktstift und Kontaktfeder	$r_{i,S} - r_P$		1 mm	1 mm

Nicht alle Parameter von Steckverbinderkontakten können physikalisch begründet werden. Damit das Gesamtsystem lösbar wird, müssen einige Parameter ingenieurmäßig abgeschätzt werden, durch zusätzliche Randbedingungen definiert werden oder als herstellereigene Parameter aufgrund von Baureihen übernommen werden. Für die Steckverbinderkontakte werden folgende Annahmen getroffen.

7	A	Verhältnis Querschnitt Bahnbereich zu Querschnitt des Leiters	$A_{x,P} / A_{x,W}$		1	1
8	A	Verhältnis Länge zu Dicke der Kontaktfeder	$l_s / h_s$		20	20
9	A	Verhältnis Länge Bahnbereich von Kontaktstift zu Nennradius des Leiters	$l_{b,P} / r_W$		1	1
10	A	Resultierender Emissionsgrad des Steckverbinderkontaktes	$\epsilon_{12,con}$		0,4	0,4

Um den Crimpbereich zu parametrisieren und den Leiteranschlusswiderstand abschätzen zu können, werden folgende Parameter angenommen.

11	A	Verhältnis Länge Crimpanschluss zu Nennradius des Leiters	$l_c/r_W$		6	6
12	A	Verhältnis Länge Übergangsbereich zu Nennradius des Leiters	$l_{tr}/r_W$		1	1
13	A	Gütefaktor Leiteranschluss	$k$		2	2

Zur Berechnung der Erwärmung wird zunächst die Eigenerwärmung der Leitung ermittelt. Die geometrisch-stofflichen Parameter verschiedener Leitungen sind in Tabelle 6-15 dargestellt. Von dem Entwickler muss eine Auswahl zwischen verschiedenen Leitungsquerschnitten getroffen werden, welche zu einer unterschiedlichen Eigenerwärmung der Leitung führen. Bei dem Steckverbinderkontakt für 100 A werden beispielhaft Leitungen mit einem Leitungsquerschnitt von 16 mm<sup>2</sup> und 25 mm<sup>2</sup> berechnet. Abhängig von der Eigenerwärmung der Leitung sind noch unterschiedliche Temperaturdifferenzen zur Erreichung der Grenztemperatur zulässig. Bei einem Leitungsquerschnitt von 16 mm<sup>2</sup> dürfen nur noch 5,8 K durch den Steckverbinderkontakt entstehen. Bei einem Leitungsquerschnitt von 25 mm<sup>2</sup> dürfen durch den Steckverbinderkontakt noch 22,7 K entstehen.

Die zulässige Erwärmung wird um einen Reduzierungsfaktor verringert, welcher als Sicherheit für den Steckverbinderkontakt vorgesehen ist.

1	V	Nennstrom	$I_N$	<b>100 A</b>	<b>100 A</b>	<b>300 A</b>
14	A	Nennquerschnitt der Leitung	$A_{x,W}$	<b>16 mm<sup>2</sup></b>	<b>25 mm<sup>2</sup></b>	<b>95 mm<sup>2</sup></b>
15	B	Erwärmung der Leitung	$\Delta\vartheta_{\infty,W}$	39,2 K	22,3 K	31,3 K
16	B	Maximal zulässige Temperaturdifferenz bis zur Erreichung der Grenztemperatur		5,8 K	22,7 K	13,7 K
17	A	Reduzierungsfaktor für die Temperatur		3 K	3 K	3 K
18	B	Vorgegebene maximal zulässige Temperaturdifferenz am Leiter aufgrund des axialen Wärmestroms	$\Delta\vartheta_{W,con}$	2,8 K	19,7 K	10,7 K

Wenn die Leitertemperatur, die Leitergeometrie und die zulässige Temperaturdifferenz an der Leitung berechnet sind, könne die thermische Ortskonstante der Leitung und der maximale Wärmestrom in die Leitung berechnet werden.

19	B	Thermische Ortskonstante der Leitung	$b_W$	128 mm	151 mm	225 mm
20	B	Maximaler Wärmestrom in den Leiter	$\dot{Q}_{\text{end}_W}$	0,14 W	1,29 W	1,79 W

Die geometrischen Abmessungen des Steckverbinderkontaktes und des Crimpbereiches müssen überschlägig berechnet werden, um die wärmeabgebende Oberfläche zu bestimmen. Die Verlustleistung, welche über die Oberfläche des Steckverbinderkontaktes abgeführt wird, lässt sich dadurch ermitteln. Der Radius des Kontaktstiftes kann aus Bedingung 7 und 14 berechnet werden. Mit Bedingung 6, 7 und 14 können sowohl der Innenradius der Kontaktfeder, als auch der Außenradius ermittelt werden.

21	B	Radius Kontaktstift	$r_p$	2,26 mm	2,82 mm	5,5 mm
22	B	Innenradius Kontaktfedern	$r_{i,S}$	3,26 mm	3,82 mm	6,5 mm
23	B	Außenradius Kontaktfedern	$r_{a,S}$	3,96 mm	4,75 mm	8,5 mm
24	B	Länge einer Kontaktfeder	$l_S$	14,1 mm	18,6 mm	40,3 mm
25	B	Länge des Crimpbereiches	$l_C$	13,5 mm	16,9 mm	33 mm
26	B	Länge Übergangsbereich Kontaktbuchse und Kontaktstift	$l_{tr,F}$	2,6 mm	2,8 mm	5,5 mm

Da die Betriebstemperatur bekannt ist, können die Wärmeübergangskoeffizienten temperaturabhängig berechnet werden. Daraus lässt sich die Verlustleistung über die Oberfläche des Steckverbinderkontaktes abschätzen.

27	B	Wärmeabgebende Fläche des Steckverbinderkontaktes	$A_{o,con}$	1136 mm <sup>2</sup>	1732 mm <sup>2</sup>	6275 mm <sup>2</sup>
28	B	Abgegebener Wärmestrom über die Oberfläche des Steckverbinderkontaktes ( $\vartheta_{con} = 67^\circ\text{C}$ )	$\dot{Q}_{d,con}$	0,62 W	0,89 W	2,84 W

Nun kann die maximal zulässige Verlustleistung des Steckverbinderkontaktes und daraus der maximale Durchgangswiderstand berechnet werden (siehe Modelle Kapitel 4.1).

29	B	Maximale Verlustleistung des Steckverbinderkontaktes	$P_{con,max}$	0,9 W	3,5 W	6,4 W
30	B	Maximal zulässiger Durchgangswiderstand	$R_{con,max}$	89 $\mu\Omega$	347 $\mu\Omega$	71 $\mu\Omega$

Für die folgenden Berechnungen ist die elektrische Leitfähigkeit des Basismaterials wesentlich. Dieser Prozess kann iterativ verlaufen, um den Einfluss verschiedener Werkstoffe gegenüberzustellen. Wie sich noch zeigen wird, kann bei dem Steckverbinderkontakt für 100 A und einem Leiterquerschnitt von 25 mm<sup>2</sup> eine geringere elektrische Leitfähigkeit des Basismaterials verwendet werden.

31	A	Elektrische Leitfähigkeit des Steckverbinderkontaktes	$\lambda_{el,con}$	56 MS/m	15 MS/m	56 MS/m
----	---	---	--------------------	---------	---------	---------

Ist das Basismaterial vorgegeben, so können die Teilwiderstände im Bahnbereich und im Leiteranschlussbereich abgeschätzt werden.

32	B	Leiteranschlusswiderstand ( $\vartheta_{con} = 67\text{ }^\circ\text{C}$ )	$R_T$	36 $\mu\Omega$	46 $\mu\Omega$	14,7 $\mu\Omega$
33	B	Bahnwiderstand Übergangsbereiche Kontaktbuchse und Kontaktstift ( $\vartheta_{con} = 67\text{ }^\circ\text{C}$ )	$R_{tr}$	1,2 $\mu\Omega$	3,1 $\mu\Omega$	0,5 $\mu\Omega$
34	B	Bahnwiderstand Kontaktstift ( $\vartheta_{con} = 67\text{ }^\circ\text{C}$ )	$R_{b,p}$	3 $\mu\Omega$	8,9 $\mu\Omega$	1,2 $\mu\Omega$

Für den Widerstand der Kontaktfedern und der Kontaktstellen ist schließlich nur noch der folgende Widerstand maximal zulässig.

35	B	Maximal zulässiger Widerstand Kontaktfedern und Kontaktstelle	$R_{SC}$	12 $\mu\Omega$	240 $\mu\Omega$	39,5 $\mu\Omega$
----	---	---	----------	----------------	-----------------	------------------

Durch die Kontaktfedern und die Kontaktwiderstände darf dieser Widerstand nicht überschritten werden. Anhand der maximal zulässigen Widerstände ist

bereits zu erkennen, dass bei  $16 \text{ mm}^2$  und  $100 \text{ A}$  ein sehr geringer Widerstand gefordert wird. In einem weiteren Iterationsschritt könnte der Querschnitt angepasst werden. Für dieses Beispiel werden allerdings keine weiteren Berechnungen durchgeführt.

Für die beiden anderen Systeme wird mit dem in Kapitel 4.3 vorgestellten Modell, welches für Rundkontakte angepasst ist, die Anzahl der Kontaktfedern optimiert. Der kraftabhängige und werkstoffabhängige Kontaktwiderstand wird für dieses Beispiel für einen idealisierten Kontakt mit einem elastischen Materialverhalten berechnet. Zur Beschreibung des kraftabhängigen Kontaktwiderstandes können allerdings auch andere Modelle verwendet werden oder es kann auf gemessene Kurven zurückgegriffen werden.

Als wesentliche Restriktionen für die Anzahl an Kontaktfedern werden der maximale Widerstand und das Verhältnis von Breite zu Höhe der Kontaktfedern angenommen. Die maximal zulässige Summe der Kontaktkräfte lässt sich bei bekannter Reibungszahl aus der maximal zulässigen Ziehkraft ermitteln. Für die Ermittlung der optimalen Anzahl an Kontaktfedern können unterschiedliche Szenarien angenommen werden. Für das kleinere Kontaktsystem wird eine von der Anzahl der Kontaktfedern unabhängige Kontaktkraft von  $5 \text{ N}$  angenommen. Bei dem Steckverbinderkontakt für  $300 \text{ A}$  ist die Summe aller Kontaktkräfte stets  $40 \text{ N}$ .

36	A	Radius der Kugelfläche des Kontaktes	$r_K$		4 mm	4 mm
37	A	Minimales Verhältnis Breite zu Höhe der Kontaktfedern	$w_{s1}/h_s$		2	2
38	A	Reibungszahl	$\mu$		0,2	0,2
39	B	Maximale Summe der Kontaktkräfte	$F_{K,tot}$			40 N
40	A	Kontaktkraft unabhängig von der Anzahl der Kontaktfedern	$F_{K,Sx}$		5 N	

In Abbildung 6-2 und Abbildung 6-3 sind die Kurven mit dem Einfluss der Anzahl an Kontaktfedern auf den Engewiderstand, die Kontaktkraft, das Verhältnis Breite zu Höhe der Kontaktfedern und die Flächenpressung dargestellt. Daraus lässt sich die optimale Anzahl an Kontaktfedern bestimmen.

Als zusätzliche Randbedingung wird angenommen, dass es stets eine gerade Anzahl an Kontaktfedern geben muss.

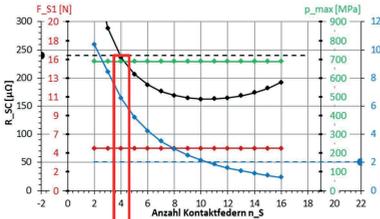


Abbildung 6-2: Einfluss Anzahl Kontaktfedern  
100 A; 25 mm<sup>2</sup>; 15 MS/m

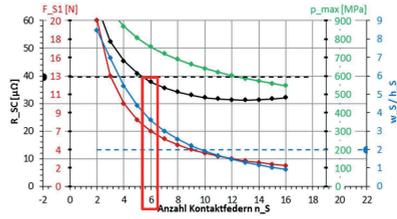


Abbildung 6-3: Einfluss Anzahl Kontaktfedern  
300 A; 95 mm<sup>2</sup>; 56 MS/m

Aus den Kurven lassen sich folgende Parameter für die Steckverbinderkontakte ermitteln.

41	A	Optimale Anzahl Kontaktfedern	$n_s$		4	6
42	B	Kontaktkraft einer Kontaktfeder	$F_{K\_Sx}$		5,0 N	7,7 N
43	B	Engewiderstand von einer Kontaktstelle	$R_{C\_Sx}$		0,66 mΩ	0,16 mΩ
44	B	Ermittelter resultierender Widerstand von Kontaktfedern und Kontaktstelle	$R_{SC\_calc}$		236 µΩ	37,8 µΩ

Wenn bei dem Steckverbinderkontakt für 300 A z.B. die elektrische Leitfähigkeit oder die Kontaktkraft verringert werden sollten, können z.B. statt 6 Kontaktfedern 8 Kontaktfedern verwendet werden. Aufgrund der diskreten Unterteilungen der Anzahl an Kontaktfedern kann zudem nicht exakt der Widerstand erreicht werden, der als Optimum gelten würde.

Nach der Auswahl der Anzahl an Kontaktfedern können diese mechanisch dimensioniert werden. Zusätzlich ist ein Festigkeitsnachweis zur Überprüfung der Einhaltung von zulässigen Beanspruchungen nötig. Für die Kontaktfedern werden folgende Werkstoffkennwerte angenommen.

45	A	Elastizitätsmodul der Kontaktfedern	$E_s$		130.000 MPa	130.000 MPa
46	B	Maximal zulässige Randfaserspannung (0,2 % Dehngrenze)	$R_{p0,2}$		250 MPa	250 MPa

Über das Kontaktöffnungsmaß kann z.B. die notwendige Kontaktkraft eingestellt werden. Im Rahmen des Funktionsnachweises wird die Einhaltung von Federkraft, Federweg und Federsteifigkeit überprüft. Zudem können die theoretischen Grenzen des Systems untersucht werden.

47	B	Federkonstante einer Kontaktfeder	$C_{S1}$		47,4 N/mm	28,3 N/mm
48	B	Notwendige Auslenkung der Kontaktfeder um die Kontaktkraft zu erreichen	$\Delta x_S$		0,11 mm	0,24 mm
49	B	Maximale Randfaserspannung	$\sigma_{b\_max}$		120 N/mm <sup>2</sup>	81 N/mm <sup>2</sup>
50	B	Maximal zulässige Kontaktkraft, bevor die maximale Randfaserspannung überschritten wird	$F_{K\_max}$		10,4 N	20,7 N

Mit diesen geometrischen und stofflichen Parametern kann eine Grobgestaltung der Steckverbinderkontakte durchgeführt werden.