

Automatisiertes, stoffschlüssiges Fügen folienisolierter Flachleiter mit Oberflächenkontamination

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

von
Dipl.-Ing. Jörg Adrian
aus Dortmund

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult.
Engelbert Westkämper

Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. Siegfried Schmauder

Tag der Einreichung: 29. November 2004

Tag der mündlichen Prüfung: 07. Juni 2005

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF)

2005

IPA-IAO Forschung und Praxis

Berichte aus dem
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und
Automatisierung (IPA), Stuttgart,
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und
Organisation (IAO), Stuttgart,
Institut für Industrielle Fertigung und
Fabrikbetrieb (IFF), Universität Stuttgart
und Institut für Arbeitswissenschaft und
Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. e.h. Dr.-Ing. e.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper
und

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. e.h. Dr. h.c. Hans-Jörg Bullinger
und

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath

Jörg Adrian

Automatisiertes,
stoffschlüssiges Fügen
folienisolierter Flachleiter mit
Oberflächenkontamination

Nr. 418

Dr.-Ing. Jörg Adrian

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. e.h. Dr.-Ing. e.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

ord. Professor an der Universität Stuttgart

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. e.h. Dr. h.c. Hans-Jörg Bullinger

ord. Professor an der Universität Stuttgart

Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft, München

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath

ord. Professor an der Universität Stuttgart

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart

D 93

ISBN 3-936947-61-9 Jost Jetter Verlag, Heimsheim

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils gültigen Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Jost Jetter Verlag, Heimsheim 2005.

Printed in Germany.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Druck: printsystem GmbH, Heimsheim

Geleitwort der Herausgeber

Über den Erfolg und das Bestehen von Unternehmen in einer marktwirtschaftlichen Ordnung entscheidet letztendlich der Absatzmarkt. Das bedeutet, möglichst frühzeitig absatzmarktorientierte Anforderungen sowie deren Veränderungen zu erkennen und darauf zu reagieren.

Neue Technologien und Werkstoffe ermöglichen neue Produkte und eröffnen neue Märkte. Die neuen Produktions- und Informationstechnologien verwandeln signifikant und nachhaltig unsere industrielle Arbeitswelt. Politische und gesellschaftliche Veränderungen signalisieren und begleiten dabei einen Wertewandel, der auch in unseren Industriebetrieben deutlichen Niederschlag findet.

Die Aufgaben des Produktionsmanagements sind vielfältiger und anspruchsvoller geworden. Die Integration des europäischen Marktes, die Globalisierung vieler Industrien, die zunehmende Innovationsgeschwindigkeit, die Entwicklung zur Freizeitgesellschaft und die übergreifenden ökologischen und sozialen Probleme, zu deren Lösung die Wirtschaft ihren Beitrag leisten muss, erfordern von den Führungskräften erweiterte Perspektiven und Antworten, die über den Fokus traditionellen Produktionsmanagements deutlich hinausgehen.

Neue Formen der Arbeitsorganisation im indirekten und direkten Bereich sind heute schon feste Bestandteile innovativer Unternehmen. Die Entkopplung der Arbeitszeit von der Betriebszeit, integrierte Planungsansätze sowie der Aufbau dezentraler Strukturen sind nur einige der Konzepte, welche die aktuellen Entwicklungsrichtungen kennzeichnen. Erfreulich ist der Trend, immer mehr den Menschen in den Mittelpunkt der Arbeitsgestaltung zu stellen - die traditionell eher technokratisch akzentuierten Ansätze weichen einer stärkeren Human- und Organisationsorientierung. Qualifizierungsprogramme, Training und andere Formen der Mitarbeiterentwicklung gewinnen als Differenzierungsmerkmal und als Zukunftsinvestition in *Human Resources* an strategischer Bedeutung.

Von wissenschaftlicher Seite muss dieses Bemühen durch die Entwicklung von Methoden und Vorgehensweisen zur systematischen Analyse und Verbesserung des Systems Produktionsbetrieb einschließlich der erforderlichen Dienstleistungsfunktionen unterstützt werden. Die Ingenieure sind hier gefordert, in enger Zusammenarbeit mit anderen Disziplinen, z. B. der Informatik, der Wirtschaftswissenschaften und der Arbeitswissenschaft, Lösungen zu erarbeiten, die den veränderten Randbedingungen Rechnung tragen.

Die von den Herausgebern langjährig geleiteten Institute, das

- Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA),
- Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO),
- Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF), Universität Stuttgart,
- Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart

arbeiten in grundlegender und angewandter Forschung intensiv an den oben aufgezeigten Entwicklungen mit. Die Ausstattung der Labors und die Qualifikation der Mitarbeiter haben bereits in der Vergangenheit zu Forschungsergebnissen geführt, die für die Praxis von großem Wert waren. Zur Umsetzung gewonnener Erkenntnisse wird die Schriftenreihe „IPA-IAO - Forschung und Praxis“ herausgegeben. Der vorliegende Band setzt diese Reihe fort. Eine Übersicht über bisher erschienene Titel wird am Schluss dieses Buches gegeben.

Dem Verfasser sei für die geleistete Arbeit gedankt, dem Jost Jetter Verlag für die Aufnahme dieser Schriftenreihe in seine Angebotspalette und der Druckerei für saubere und zügige Ausführung. Möge das Buch von der Fachwelt gut aufgenommen werden.

Engelbert Westkämper Hans-Jörg Bullinger Dieter Spath

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Arbeitsgruppe Verdrahtungstechnik am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) in Stuttgart.

Für die Unterstützung und Förderung, die maßgeblich zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben, möchte ich den Leitern des Institutes Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Engelbert Westkämper und Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Rolf Dieter Schraft besonders danken. Herrn Prof. Dr. rer. nat. Siegfried Schmauder danke ich für die eingehende Durchsicht der Arbeit und die Übernahme des Mitberichts.

Für die Unterstützung durch viele Anregungen und konstruktive Kritik möchte ich den beteiligten Mitarbeitern und Studenten danken. Vor allem gebührt Herrn Dr.-Ing. Manfred Schweizer für die Mitwirkung in der Ausarbeitung, Frau Dr.-Ing. Andrea Hiller und Herrn Dr.-Ing. Johannes Wößner für die konstruktive Kritik und Herrn Dr.-Ing. Martin Greitmann für die inhaltliche Durchsicht der Arbeit mein besonderer Dank.

Freundschaftlicher Dank gebührt Herrn Dr.-Ing. Jochen Krieger, der durch Fachgespräche, stetige Motivation und ausdauernde Diskussionsbereitschaft mir eine wertvolle Unterstützung war.

Herzlich danke ich auch meinen Eltern, dass sie durch ihr Vertrauen und ihre Unterstützung die Voraussetzung für diese Arbeit geschaffen haben.

Stuttgart, Juni 2005

Jörg Adrian

Inhaltsverzeichnis

0	Abkürzungen und Formelzeichen	13
1	Einleitung	17
1.1	Problemstellung	17
1.2	Zielsetzung und Vorgehensweise	18
2	Stand der Technik	19
2.1	Begriffe und Definitionen	19
2.2	Abgrenzung des Produktspektrums folienisolierter Flachleiter	20
2.3	Fügen folienisolierter Flachleiter	21
2.3.1	Einfluss des Herstellungsprozesses auf den Fügeprozess	21
2.3.2	Vorhandene Werkzeuge und Einrichtungen	23
3	Analyse des Produktspektrums und Erstellung eines Anforderungsprofils an das automatisierte stoffschlüssige Fügen folienisolierter Flachleiter	29
3.1	Analyse des Produktspektrums	29
3.2	Analyse des automatisierten Fügeprozesses	31
3.2.1	Handhabungs- und Positionierungsprozesse	31
3.2.2	Oberflächenanalyse	32
3.2.3	Fügeverfahren	34
3.2.3.1	Charakteristika der Fügeverfahren	34
3.2.3.2	Auftretende Mängel im Fügeprozess	37
3.2.3.3	Verfahren zur Berechnung des Widerstandpunktschweißprozesses	39
3.2.4	Automatisierungshemmnisse	40
3.3	Ableitung von Versuchs- und Entwicklungsschwerpunkten	41

3.4	Anforderungen an ein automatisiertes System zum stoffschlüssigen Fügen	42
3.4.1	Gesamtsystem	42
3.4.2	Handhabung und Positionierung von Trägerteil und folienisoliertem Flachleiter	43
3.4.3	System zur Oberflächenbeurteilung	43
3.4.4	System zum Fügen	43
4	Konzeption von Teilsystemen zum stoffschlüssigen Fügen	45
4.1	Ableitung von Randbedingungen bei der Systemkonzeption	45
4.2	Lösungskonzepte zur Bereitstellung, Handhabung und Positionierung der Fügepartner	46
4.3	Lösungskonzepte zur Oberflächenbeurteilung	48
4.4	Lösungskonzepte zum Fügen	50
4.5	Integration in ein Gesamtsystem	51
5	Experimentelle Untersuchungen des Einflusses der Oberflächenkontamination auf den Übergangswiderstand und die mechanischen Kontakteigenschaften	52
5.1	Untersuchung der Scherzugfestigkeiten der Fügestelle bei variierenden Prozessparametern und Eingangsgrößen	53
5.2	Untersuchung der Einflussfaktoren auf den Übergangswiderstand	57
5.2.1	Ermittlung des Übergangswiderstands zwischen Leiter und Leiter / Trägerteil	58
5.2.2	Ermittlung des Übergangswiderstands zwischen Elektrode und Leiter / Trägerteil	61
5.2.3	Einfluss des Abisolierverfahrens auf den Übergangswiderstand	64
5.3	Betrachtung der Schweißpunkteigenschaften	65
5.3.1	Vermessung des Schweißlinsendurchmessers	65
5.3.2	Ermittlung der Elektrodeneinsinktiefe	67
5.3.3	Bestimmung der Werkstoffhärte und des Härteverlaufs	69
5.4	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	70

6	Entwicklung eines Verfahrens zur numerischen Berechnung der mechanischen Festigkeit einer Fugestelle von folienisolierten Flachleitern mit Oberflächenverschmutzung	71
6.1	Berechnung der mechanischen Versagensbilder	73
6.1.1	Berechnung des Versagensbilds Abscheren	73
6.1.2	Berechnung des Versagensbilds Leiterabriss	75
6.1.3	Berechnung des Versagensbilds Ausknöpfen	77
6.2	Berechnung der Wärmeentwicklung an den Kontaktwiderständen	81
6.2.1	Berechnung der Wärmeentstehung	81
6.2.2	Theoretische Betrachtung des Übergangswiderstands	82
6.3	Berechnung der Elektrodeneinsinktiefe	86
6.4	Berechnung der Phasenumwandlung in der Schweißlinse	87
6.5	Berechnung der Eigenspannungen in der Wärmeeinflusszone	88
6.6	Berechnung der Wärmeleitung	89
6.7	Untersuchung der Spritzerneigung im Schweißprozess	90
6.8	Integration der Berechnungsbausteine zu einem Gesamtmodell	92
6.9	Validierung des Berechnungsverfahrens	97
6.9.1	Prozessvoraussetzungen zur numerischen Berechnung	98
6.9.2	Abstimmung der Übergangswiderstände	100
6.9.3	Vergleich der ermittelten Fügeparameter mit experimentellen Untersuchungen	101
6.10	Bestimmung der Fügeparameter aus den ermittelten Größen der Oberflächenanalyse	101

7	Realisierte Pilotanlage zum automatisierten stoffschlüssigen Fügen folienisolierter Flachleiter	104
7.1	Gesamtaufbau der Pilotanlage	104
7.2	Eingesetzte Werkzeuge und Komponenten	105
7.2.1	Verwendete Komponenten	105
7.2.2	Bereitstellung und Zuführung der Komponenten	106
7.2.3	Eingesetztes Handhabungssystem	106
7.2.4	System zur Oberflächenanalyse	107
7.2.5	Verwendete Fügeeinheit	107
7.3	Steuerungskonfiguration der Gesamtanlage	107
7.4	Arbeitsablauf der Pilotanlage	110
7.5	Versuchsergebnisse	110
7.5.1	Taktzeiten	110
7.5.2	Systemverfügbarkeit	111
7.6	Folgerung aus den Versuchen	112
8	Zusammenfassung und Ausblick	113
9	Summary	115
10	Literatur	119
11	Anhang	128

0 Abkürzungen und Formelzeichen

Großbuchstaben

3-D	-	3 dimensional
A	[mm ²]	Fläche
BS	-	Bearbeitungsstation
CO ₂	-	Kohlendioxid
Cu	-	Kupfer
DIN	-	Deutsche Industrie Norm
DoE	-	Design of Experiments
E	[N mm ⁻²]	Elastizitätsmodul
Eigen	-	Eigenspannung
EN	-	Europäische Norm
exFC	-	Extruded Flat Cable
F	[N]	Kraft
FE	-	Folienleitungssatzende
FFC	-	Flexible Flat Cable
FL	-	Folienleiter
FLC	-	Flexible Laminated Cable
FLS	-	Folienleitungssatz
FPC	-	Flexible Printed Circuit
H	[J]	Enthalpie
HG	-	Handhabungsgerät
HH	-	Handhabung
I	[A]	Schweißstrom
I _y	[mm ⁴]	Flächenträgheitsmoment um die y-Achse
IR	-	Industrieroboter
ISO	-	International Organization for Standardization
K	-	Korrekturfaktor

KE	-	Kontaktierungseinheit
Kfz	-	Krafftfahrzeug
KT	-	Kabeltrommel
L	[cd m ⁻²]	Leuchtdichte
LIF	-	Low Insertion Force
M	-	Magazin
M _{by}	[N m]	Biegemoment um die y-Achse
Max	-	Maximum
Min	-	Minimum
Nd:YAG	-	Neodym Yttrium-Aluminium-Granat-Kristall
Q	[J]	Ladung
PEN	-	Polyethernaphthalat
R	[mm]	Radius
REM	-	Raster Elektronen Mikroskop
RT	-	Rundtaktisch
R _m	[N mm ⁻²]	Zugfestigkeit
R _{max}	[µm]	Maximale Rauhtiefe
R _z	[µm]	Oberflächenrauigkeit
S	-	Sicherheitsfaktor
SCARA	-	Selective Compliance Assembly Robot Arm
SPS	-	Speicher Programmierbare Steuerung
SZ	-	Schweißzange
T	[°C]	Temperatur
TFS	-	Transfersystem
T€	[€]	Tausend Euro
U	[V]	Spannung
Ü	[mm]	Übermaß der Schweißlinse
U _L	[mm]	Ellipsenumfang
US	-	Ultraschall
UV	-	Ultraviolett

VDI	-	Verein Deutscher Ingenieure
VG	[μm]	Verschmutzungsgrad
WT	-	Werkstückträger
ZIF	-	Zero Insertion Force

Kleinbuchstaben

a	[mm]	Bruchkante
b	[mm]	Leiterbahnbreite
bzw.	-	Beziehungsweise
c_p	[$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]	Spezifische Wärmekapazität
d	[mm]	Durchmesser
ggf.	-	gegebenenfalls
h	[mm]	Leiterbahnhöhe
inkl.	-	inklusive
k	[N mm^{-1}]	Bettungskonstante
l	[mm]	Länge
n	-	Geometriefaktor
n_q	-	Summe Federn
\vec{n}	-	Normalenvektor
q	[N mm^{-1}]	Streckenlast
r	[mm]	Radius
s	[mm]	Weg
t	[s]	Zeitvariable
\vec{t}	-	Tangentialvektor
v	[mm]	Einsinktiefe

Griechische Buchstaben

α	[mm K ⁻¹]	Längenausdehnungskoeffizient
γ	-	Faktor zur Biegelinienberechnung
δ	[°]	Neigungswinkel Bruchkante (Ausknöpfen)
τ	[N mm ⁻²]	Schubspannung
σ	[N mm ⁻²]	Normalspannung
α_w	[m ² s ⁻¹]	Temperaturleitfähigkeit
λ	[W K ⁻¹ m ⁻¹]	Wärmeleitfähigkeit
β_K	-	Kerbspannungsfaktor
ρ	[Ω mm ² m ⁻¹]	Spezifischer Widerstand
ε	[μm mm ⁻¹]	Dehnung
ρ_D	[kg mm ⁻³]	Dichte
ν	-	Querkontraktionszahl
φ	[°]	Laufvariable zur Spannungsberechnung (Ausknöpfen)
ξ	[mm]	Ortkoordinate zur Berechnung des Schweißlinseninnendrucks

Häufig verwendete Indizes

i, I, II	-	Leiterkennzeichnung
1, 2, 3	-	Kennzeichnung des mechanischen Belastungsfalls
EI	-	Elektrode
hom	-	Homogen
inhom	-	Inhomogen
L	-	Schweißlinse
V	-	Vergleichsspannung
z	-	Zugbelastung
zul.	-	zulässig

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Elektrische Geräte sind in der elektronischen Ausstattung einer stark zunehmenden Funktionsintegration unterworfen. In Kombination mit steigendem Strombedarf der Gesamtheit aller Komponenten, führt dies durch größere Leitungsquerschnitte zu einer Bauraumknappheit /ADA-03/, /BAU-01/, /BER-00/, /BOE-04/, /BRA-01/, /SCH-03/. Bei gleichen Möglichkeiten zur Leistungs- und Signalübertragung wie konventionelle Kupferrundkabel, zeigen vor allem folienisolierte Flachleiter (Flexible Flat Cable - FFC, Flexible Printed Circuit - FPC) einen wesentlich geringeren Raumbedarf bei gleichzeitig reduziertem Gewicht /BLA-02/, /DEU-02/. Die folienisolierten Flachleiter werden derzeit verstärkt in der Vernetzung von Komponenten in der Automobil- und Elektrogeräteindustrie sowie in der Luft- und Raumfahrt eingesetzt /BLA-02/, /CZA-00/, /KRI-00-2/, /ODE-02/. Über die bereits realisierten Kleinanwendungen hinaus, ist eine weiterhin rasche Verbreitung dieser Technologie anzunehmen /ADA-03/, /GOR-01/, /NIE-02/, /VOL-04/.

In der Herstellung flexibler Flachleiterkabel ist aufgrund dieser Marktentwicklung ein hoher Automatisierungsgrad zu verzeichnen /ADA-03/, /BUE-01/, /MEI-03/, /WOE-03/. Die Kontaktierung wird bedingt durch die überwiegende Konfektionierung in kleinen und mittelständischen Unternehmen häufig teilautomatisiert durchgeführt, was zu schwankenden mechanischen und elektrischen Kontakteigenschaften führt /FIS-03/. Im formschlüssigen Fügen von folienisolierten Flachleitern mit niedriger Stromlast hat /KRI-02/ bereits erste Ansätze zur prozesssicheren Automatisierung aufgezeigt. Mit dem breiteren Einsatz der Folienleitertechnik und dem steigenden Leistungsbedarf der Komponenten ist auch für hochstromige Anwendungen ein Anstieg der zu fügenden folienisolierten Flachleiter zu erwarten /NIE-02/, /RIN-03/. Um den Marktanforderungen gerecht zu werden und die Leitungssätze kostengünstig, schnell und vor allem mit gleichbleibenden Kontakteigenschaften herzustellen /WIE-04/, /GOR-03-2/, /WES-96/, folgt die Notwendigkeit, Entwicklungsaufgaben für eine Automatisierungslösung zu formulieren /DEU-02/, die neben der bereits in /KRI-02/ berücksichtigten Empfindlichkeit und dem biegeschlaffen Verhalten der Folienleiter ebenso die Besonderheiten der stoffschlüssigen Fügeverfahren einbezieht. Neben einer Automatisierungslösung erfordert dies die Entwicklung zuverlässiger Verfahren, die über die Überwachung, Bewertung und Dokumentation des Fügeprozesses hinaus, präventiv die Voraussetzungen für eine geeignete gleichbleibende Scherzugfestigkeit der Fügestelle schaffen /BEE-00/, /KRI-00-1/, /LIE-02/.

/KRI-02/ hat einen entscheidenden Beitrag zur Prozesssicherheit in der Crimpkontaktierung folienisolierter Flachleiter geleistet. Diese Erkenntnisse sind nicht auf das für hochstromige Anwendungen notwendige stoffschlüssige Fügen zu übertragen, so dass hier eine grundlegende wissenschaftliche Untersuchung und die Ableitung von Hilfsmitteln für die durch kleine und mittelständische Unternehmen geprägte Branche notwendig ist.

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel dieser Arbeit ist die systematische Erarbeitung von wissenschaftlichen Erkenntnissen und Grundlagen zum stoffschlüssigen, automatisierten Fügen von folienisolierten Flachleitern unter besonderer Berücksichtigung der stark schwankenden Eingangsparameter des Produktes resultierend aus dem vorgelagerten Abisolierprozess. Neben den theoretischen Untersuchungen zur Herstellung reproduzierbarer Kontakteigenschaften der Fügestelle, sollen Verfahren und Werkzeuge zur automatischen Kontaktierung mit auf die schwankenden Eingangsgrößen optimierten Parametern entwickelt und in einer Versuchsanlage realisiert werden.

Durch die stark voranschreitende Entwicklung des Marktes für folienisolierte Flachleiter ist eine auf /KRI-02/ aufbauende, branchenübergreifende Analyse notwendig, die das derzeit verfügbare Produktspektrum, die Komponenten, die Prozessabläufe, die eingesetzten Betriebsmittel sowie branchenspezifische Randbedingungen und zukünftige Entwicklungstrends analysiert. Aus den Analyseergebnissen werden produkt- und prozessspezifische Anforderungen an Teilsysteme zum stoffschlüssigen, automatisierten Fügen von folienisolierten Flachleitern sowie an das Gesamtsystem abgeleitet.

Auf Basis des Anforderungskatalogs werden Lösungsalternativen für flexibel automatisierte Teilsysteme konzipiert, bewertet, ausgewählt und in ein Gesamtsystem integriert. Am Markt nicht verfügbare Lösungen sind nach der Konstruktionssystematik zu entwickeln und zu realisieren.

Die Funktionsfähigkeit der entwickelten und realisierten Komponenten, sowie die Verifizierung der erarbeiteten theoretischen Grundlagen und Erkenntnisse werden in einer Versuchsanlage unter dem ständigen Fokus auf die spezifischen Anforderungen kleiner und mittelständischer Unternehmen nachgewiesen.

2 Stand der Technik

2.1 Begriffe und Definitionen

Begriffe und sachspezifische Ausdrücke sind nur zum Teil in Normen und Richtlinien festgehalten. In dieser Arbeit verwendete, aber bislang nicht definierte Begriffe, werden im Folgenden näher erläutert.

Begriffe zur Montage und Handhabungstechnik

Die Begriffe Montage, Fügen, Handhaben und Industrieroboter sind in der VDI-Richtlinie 2860 /VDI-90/ und in der DIN 8593 /DIN-03/ beschrieben. Die Begriffe Bereitstellen, Orientieren, Positionieren können ebenfalls /VDI-90/, Werkstücktypen und -varianten sowie Flexibilität /WAL-85/ entnommen werden. Begriffe wie programmierbares Handhabungsgerät, Sensor oder Industrieroboter werden gemäß den Definitionen in /SCH-78/ und /SCH-76/ verwendet.

Kabelspezifische Begriffe

Begriffe wie Leitung, Kabel, Vorkonfektionierung und Konfektionierung, die in Zusammenhang mit der Montage von biegeschlaffen Kabeln und Leitungen aus der konventionellen Kupferrundkabelverarbeitung eingesetzt werden, werden entsprechend den Definitionen von /EMM-92/, /KOL-94/ und /CRA-95/ verwendet. Die Begriffe der folienisolierten Leiter, wie Flexible Flat Cable (FFC), Flexible Laminated Cable (FLC) und Flexible Printed Circuit (FPC), werden gemäß /KRI-02/ verwendet. Weitere Definitionen und Begriffe zu folienisolierten Flachleitern können /IPC-50/ sowie /STE-96/ entnommen werden.

Die Konfektionierung von folienisolierten Flachleitern erfolgt über verschiedene Techniken. In DIN 41650 /DIN-86/ und DIN ISO 857 Teil 1 /DIN-02/ sind die gängigsten elektrischen Verbindungen und Steckverbinder beschrieben und definiert.

Die Anschlussgeometrie der folienisolierten Flachleiter wird durch geometrische Größen wie die Abmaße der Leiterbahnen und das Rastermaß festgelegt. Das Rastermaß beschreibt den Leiterbahnabstand jeweils gemessen zwischen den Leiterbahnmitten.

Begriffe zum stoffschlüssigen Fügen

Die Bezeichnungen zum stoffschlüssigen Fügen mittels Löten und Schweißen werden gemäß DIN ISO 857 Teil 1 /DIN-02/ und DIN ISO 857 Teil 2 /DIN-04-1/ verwendet. Das Widerstandsschweißen ist in den Normen DIN ISO 857 Teil 1 /DIN-02/ und DIN EN ISO 15609-5 /DIN-00/ begrifflich abgegrenzt.

Weiterhin beschreibt der Begriff Stromtragfähigkeit die Stromstärke, die eine einsetzbezogene Erwärmung des Kontakts auf eine Grenztemperatur beschreibt.

Begriffe zum Abisolieren

Das Abisolieren ist im Bereich der folienisolierten Leiter durch eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren geprägt. Die Begriffe werden gemäß /ADR-01/ und /ADR-02/ verwendet.

Begriffe zur Oberflächenbeurteilung

Da bei der Entfernung von Leitungsisolierungen von konventionellen Rundkupferkabeln keine Rückstände entstehen, steht im Bereich der Oberflächenbeurteilung bei Kabeln und folienisolierten Flachleitern keine genormte Nomenklatur zur Verfügung. Für den Fügeprozess ist hier die Oberflächenbeschaffenheit von Interesse, die durch die Geometrie, metallische Überzüge und Beschichtungen des Körpers gekennzeichnet ist. Darüber hinaus ist sowohl die Verschmutzungsart durch Bestimmung der vorhandenen, unerwünschten Werkstoffart aus Oxidationsprodukten oder Restisolationsmaterial, als auch Verschmutzungsmenge und ggf. -verteilung, zu ermitteln. Weitere Definitionen sind /MOD-03/ zu entnehmen.

2.2 Abgrenzung des Produktspektrums folienisolierter Flachleiter

Sowohl FFC, als auch FPC werden als Alternative zu konventionellen Kupferrundleitungen einzeln und in Kombination eingesetzt /MOR-94/, /PAR-00/, /LEX-92/, /AXO-03/, /PAN-03/, /GOR-03-1/. Dabei können folienisolierte Flachleiter grundsätzlich zur Energie- und zur Signalübertragung eingesetzt werden, wobei zur Energieübertragung höhere Ströme bei geringerer Übertragungsqualität gefordert werden. Dies kann von vornherein durch Auswahl der geeigneten Übertragungstechnik und des notwendigen Abisolier- und Fügeverfahrens berücksichtigt werden.

Bei FFC sind extrudierte exFC und laminierte FLC zu unterscheiden. Weiterhin sind Mischformen beider Herstellungsverfahren im Einsatz. Die Herstellung von exFC ist durch noch schwierig zu kontrollierendes Aufschwimmen der Leiterbahnen in der Schmelze hochkomplex. Bei einer breiteren Herstellung von exFC in Serie liegen die Vorteile in prognostizierten günstigeren Preisen und in der Möglichkeit zur rückstandsfreien Abisolierung. FLC bieten hingegen durch günstigere Werkzeuge in Bereichen mit hohem Typen- und Variantenspektrum sowie in Kleinserien Vorteile. Darüber hinaus sind mit FLC heute noch geringere Kabeldicken als bei exFC zu realisieren. Bei beiden Leiterarten ist jedoch das Wissen zur Hochstromkontaktierung unzureichend. Die durch überwiegend kleine und mittelständische Konfektionäre geprägte Branche ist die verstärkte Verarbeitung von FLC abzuleiten. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Schwerpunkt deshalb ausschließlich auf die Kontaktierung von bereits abisolierten, laminierten folienisolierten Flachleitern an Trägerteile gelegt.

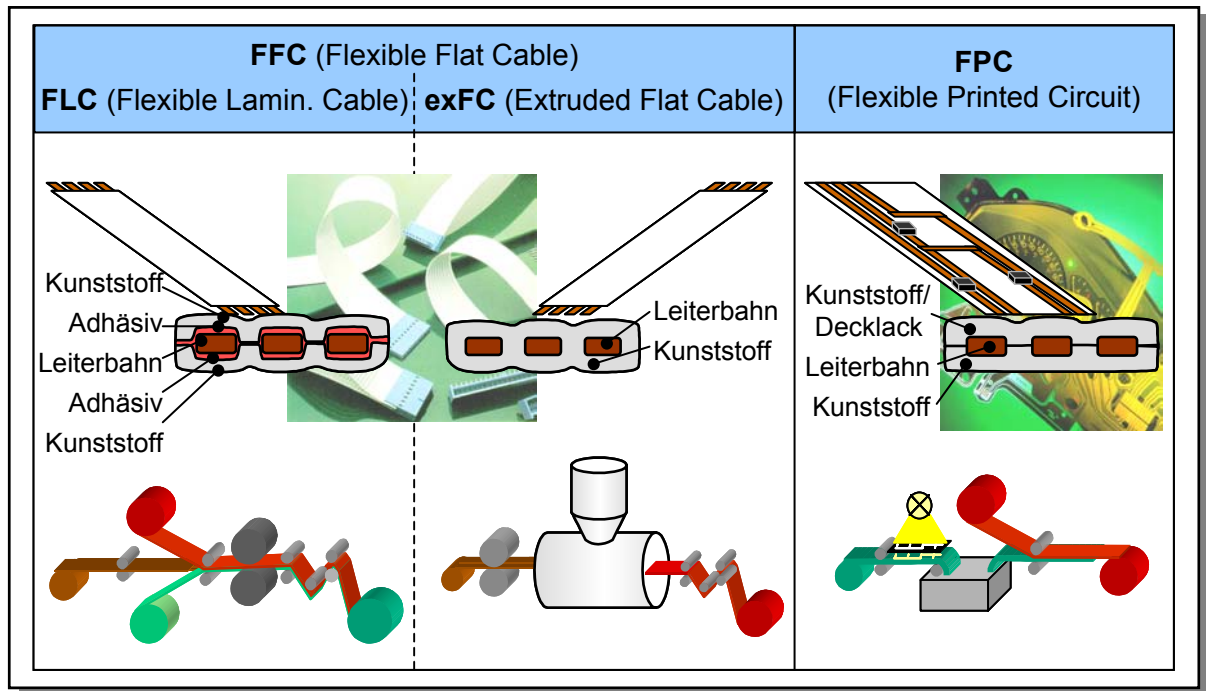


Abbildung 2.2-1: Herstellung von Flachleitern

2.3 Fügen folienisolierter Flachleiter

2.3.1 Einfluss des Herstellungsprozesses auf den Fügeprozess

Die Herstellung von Flex-Wiring-Kabelsätzen erfolgt heute bedingt durch die hohe Typen- und Variantenvielfalt in kleinen bis mittleren Stückzahlen mit Fertigungslosen von 50 bis 1.000 Teilen pro Los. Im Typen- und Variantenspektrum ist die Ursache für den hohen manuellen Anteil an Handhabungs- und Kontaktierungsvorgängen zu sehen, die zu langen Durchlaufzeiten und schwankenden Kontakteigenschaften führen. Lediglich Betriebe, die bei einer geringen Varianz hohe Stückzahlen produzieren, setzen teilautomatisierte bzw. automatisierte Betriebsmittel ein.

Der Herstellungsprozess gemäß Abbildung 2.3.1-1 beginnt mit dem Abrollen und Ablängen des Kabels. Für hochstromige Anwendungen ist eine abisolierte Fügestelle notwendig, die durch halbautomatische und automatische Maschinen erzeugt wird /KOM-03-1/, /KOM-03-2/, /JET-03/, /PAN-03/, /BAU-00/. Im nächsten optionalen Schritt erfolgt die Vorbereitung zum Fügen durch die Reinigung der Kontaktstelle. Bei den Prozesseinstellungen ist ein Optimum zwischen möglichen Restverschmutzungen, in der Oberfläche eingebetteten Partikel und einer Schädigung der Leiteroberfläche empirisch zu ermitteln.

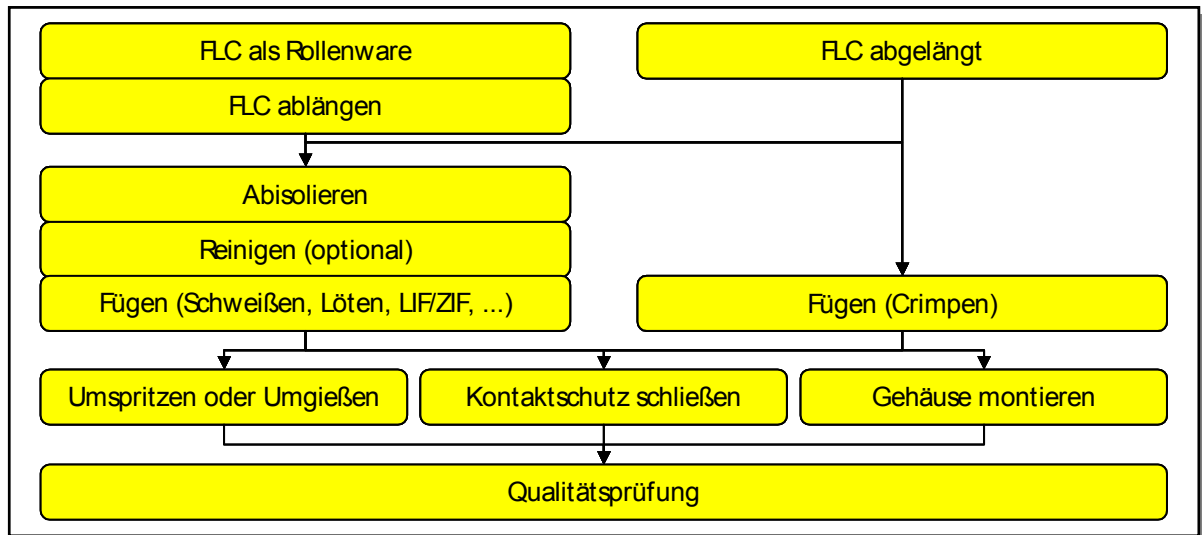


Abbildung 2.3.1-1: Vorgehensweise beim Fügen folienisolierter Flachleiter

Auf die Kontaktvorbereitung folgt das Fügen. An mechanischen Anschlängen werden die folienisolierten Leiter und die Steckverbinder, Trägerteil, Stanzgitter oder weitere Leiter manuell in Fügeposition gebracht und der Fügeprozess ausgelöst. Beim Einsatz eines Lötprozesses kann die zusätzliche Zufuhr von Lot erforderlich werden. Die Einstellung der Prozessparameter wird entweder aufgrund des vorhandenen Erfahrungswissens des Werkers vorgenommen oder in aufwändigen Vorabversuchen ermittelt. /STR-03/, /CRE-03/, /ATN-03/ Je nach eingesetztem Fügepartner werden die nächsten Arbeitsschritte festgelegt. So bestimmt das Steckverbinderprinzip häufig im nächsten Schritt die Montage des Steckverbindergehäuses. Für diesen Arbeitsschritt sind ebenfalls nur einfache Hilfsmittel /BER-93/, /TKR-03/ am Markt verfügbar.

Vor der Isolation der Fügestelle wird diese geprüft. An separaten Prüfplätzen wird in Stichproben oder einer 100%-Prüfung eine elektrische Durchgangskontrolle und eine optische Beurteilung der Fügestelle vorgenommen. Eine Technologie zur Vermeidung dieser zeit- und kostenintensiven Endprüfung durch Prozessüberwachungen im Fügeverfahren ist für folienisolierte Flachleiter nicht verfügbar. Bei Rundkupferleitern wird im Widerstandpunktschweißprozess bereits eine Prozesskontrolle eingesetzt, die mittels überlagertem Ultraschall die Ausbildung der Schweißlinse detektieren kann /WAS-95-1/, /WAS-95-2/, /WAS-97/. Weiterhin ist am Beispiel des Widerstandpunktschweißens die Überwachung der Prozessparameter Anpresskraft, Schweißstrom und Schweißzeit üblich /HAR-03/, /STR-03/, /CRE-03/.

2.3.2 Vorhandene Werkzeuge und Einrichtungen

Die Konfektionierung mittels stoffschlüssiger Fügeverfahren erfolgt ebenfalls überwiegend durch halbautomatisierte Anlagen und Betriebsmittel. Einen Überblick über typische Verfahren zum Abisolieren liefert Abbildung 2.3.2-1. Die gängigsten Verfahren der Fenstertechnik, des Schabens, des Schleifens und des Laserabisolierens bieten mehrere Anbieter am Markt an, deren Verfahren jedoch auf die hier aufgeführten Prinzipien zurückzuführen sind.





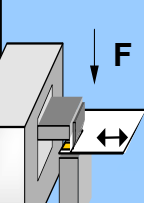
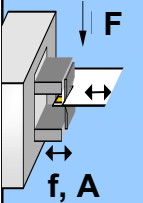
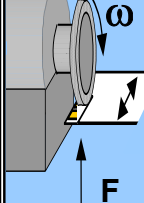
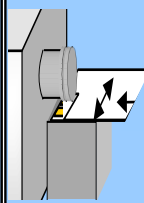
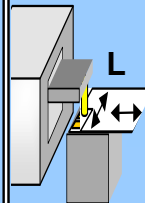




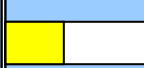







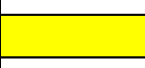
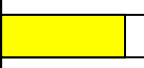

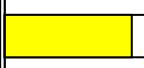
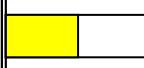
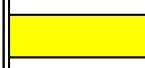
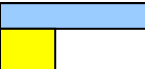
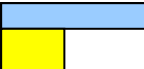
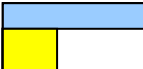



Legende: voll erfüllt  mittel  nicht erfüllt 	Fenster- technik	Schaben	Schaben (Ultra- schall)	Schleifen	Fräsen	Laser (Nd:YAG)
Prinzipbild						
Notwendige Komponenten	<ul style="list-style-type: none"> Keine, da im Produktionsprozess integriert 	<ul style="list-style-type: none"> Steuerung Zustell-einheit 	<ul style="list-style-type: none"> Steuerung Zustell-einheit Ultraschall-generator 	<ul style="list-style-type: none"> Steuerung Zustell-einheit Drehvorrichtung 	<ul style="list-style-type: none"> Steuerung Zustell-einheit Drehvorrichtung 	<ul style="list-style-type: none"> Steuerung Spiegel-umlenk-system Kühlung
Geringe Investitions- kosten						
Prozessdauer	-	1 s	1-2 s	<1 s	2-4 s	1-2 s
Hohe Werkzeug- standzeit						
Automati- sierungsgrad						
Hohe Produkt- flexibilität						

Abbildung 2.3.2-1: Am Markt verfügbare Anlagen und Einrichtungen zur Abisolierung folienisolierter Flachleiter

Die Abisolierung der Fügestelle ist zum stoffschlüssigen Fügen des folienisolierten Flachleiters zwingend erforderlich. Hierzu stehen thermische und mechanische Abisolierungstechniken zur Verfügung /KOM-00/, /BAU-00/, /ADR-02/, die in Voruntersuchungen /ADR-01/ auf die Leistungsfähigkeit hin untersucht wurden.

Die thermische Abisolation mit Prozessgas hat sich durch die starken Verbrennungsrückstände im Kontaktbereich am Markt nicht durchsetzen können. Ein weiteres thermisches Abisolierverfahren wurde mit den beiden Lasertypen CO₂ und Nd:YAG umgesetzt. Das Ziel des Nd:YAG-Laser mit einem Laser sowohl die Abisolation, als auch das Fügen durchzuführen, lässt durch die mit starken Rückständen versehene Abisolation keine reproduzierbaren Kontakteigenschaften zu. Hingegen ist die Abisolation mit CO₂-Lasern weit verbreitet. Auch hier treten Rückstände bestehend aus Verbrennungsprodukten der Isolation und des Klebstoffes auf der Fügefläche auf, die bei entsprechend großer Fügefläche, einer geeigneten Absaugung der Verbrennungsprodukte oder bei Reinigung der Fügefläche weiterhin ausreichende Stromtragfähigkeiten trotz schwankender mechanischer Festigkeiten erreicht.

Zu den einfachsten mechanischen Abisolierverfahren zählt das weit verbreitete Schaben. Der Vorteil des Verfahrens liegt in der relativ reinen Oberfläche und den geringen Investitionskosten. Nachteilig ist die Beschränkung auf einseitige Abisolation bei laminierten folienisolierten Flachleitern. Für eine beidseitige Abisolation ist eine zweite ultraschallunterstützte Klinge erforderlich, bei der die Gegenseite durch starke Rückstände auf der Oberfläche geprägt ist. Sowohl das Stirn-, als auch das Walzenfräsen erzeugen sehr reine Oberflächen. Durch die starke Leiterschädigung wird die Festigkeit der meist nur 70 bis 100 µm dicken Leiter im Fügebereich zusätzlich herabgesetzt und führt zu einer Beschränkung auf die einseitige Abisolation. Das Schleifen ermöglicht eine beidseitige Abisolation und erfordert bei den erreichbaren Oberflächen, ähnlich wie das Laserabisolieren, eine Nachbehandlung. Neben dem Schaben und dem Laserabisolieren ist das Schleifen das dritte Verfahren mit einer guten Marktdurchdringung. Die Merkmale sind in Abbildung 2.3.2-2 dargestellt. Die bislang noch nicht betrachtete Fenstertechnik arbeitet vollständig rückstandsfrei was Klebstoff- und Isolationsreste angeht. Der Bezug von abgelängten, abisolierten und gereinigten folienisolierten Flachleitern ist möglich, aber aus wirtschaftlichen Gründen nur bei einem geringen Typen- und Variantenspektrum und hohen Stückzahlen sinnvoll ist. Bei dem hier betrachteten hohen Typen- und Variantenspektrum bildet sich bedingt durch lange Lagerzeiten bei abisolierten Flachleitern Oberflächenoxidation, die sich negativ auf die Kontakteigenschaften auswirkt.

Um die universelle Anwendbarkeit des hier entwickelten Verfahrens zu erreichen, wird der Einfluss aller aufgeführten Abisolierverfahren auf den Fügeprozess betrachtet.










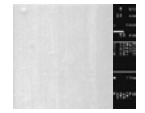
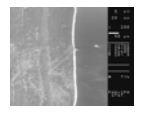
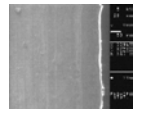
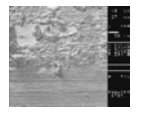
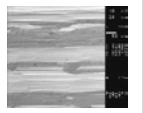
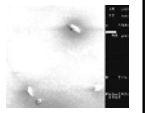

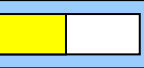

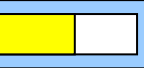

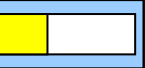




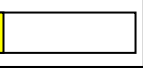

Legende: voll erfüllt  mittel  nicht erfüllt 	Fenster- technik	Schaben	Schaben (US)	Schleifen	Fräsen	Laser
Mikroskop- aufnahme des Leiters						
REM Aufnahme						
Geringe Isolationsreste						
Geringe Leiter- beschädigung						
Beidseitige Abisoliation	Möglich	Nicht möglich	Möglich	Möglich	Nicht möglich	Möglich
Fazit	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Flexibilität • Keine Klebstoffrückstände • Oxidation 	<ul style="list-style-type: none"> • Leiterbeschädigung (Längsriefen) 	<ul style="list-style-type: none"> • Leiterbeschädigung • Starke Restisolation 	<ul style="list-style-type: none"> • Leichte Strukturierung auf Leiter 	<ul style="list-style-type: none"> • Starke Leiterbeschädigung 	<ul style="list-style-type: none"> • Ablagerungen • Isolation thermisch beschädigt

Abbildung 2.3.2-2: Merkmale der Abisolieretechniken

Durch die Restisolation auf der Fügefläche ist eine anschließende Reinigung der Fügestelle notwendig. Hierzu wurden in Vorversuchen die Leistungsfähigkeit der chemischen, thermischen und mechanischen Reinigungstechniken (siehe Abbildung 2.3.2-3) untersucht /ADR-01/. Die chemische Reinigung ist ein langwieriger Prozess, der aufgrund der langen Taktzeiten nicht In-line durchgeführt werden kann. Alternativ werden bereits Bürstprozesse und mehrmalige thermische Bearbeitung mittels Laser als Reinigungsschritte vorgesehen. Beide Verfahren besitzen eine relativ kurze Taktzeit, können die Verschmutzung jedoch nicht vollständig entfernen und sind weiterhin für schwankende mechanische Festigkeiten der Fügestelle verantwortlich. Deshalb ist im Fügeprozess eine Oberflächenanalyse zur Bestimmung der Eingangsgrößen vorzusehen.




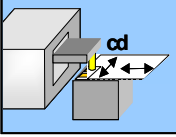

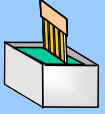
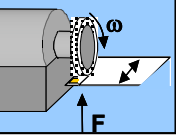


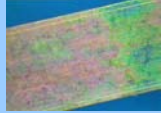

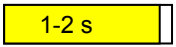
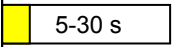
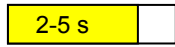

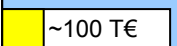



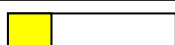
Legende: voll erfüllt  mittel  nicht erfüllt 	Thermisch (Beispiel Laser)	Chemisch	Mechanisch (Beispiel Bürsten)
Prinzipbild	 		 
Notwendige Komponenten	<ul style="list-style-type: none"> • Lasereinheit • Spiegelumlenkung • Kühlung • Steuerung 	<ul style="list-style-type: none"> • Lösungsmittel • Trocknung • Behälter • Abwasser-aufbereitung 	<ul style="list-style-type: none"> • Zustelleinheit • Drehvorrichtung • Bürsteinrichtung • Steuerung • Kraftmessung (Anpresskraft)
Mikroskop-aufnahme der Fügestelle			
Kurze Prozess-dauer			
Investitions-kosten			
Gute Repro-duzierbarkeit			

Abbildung 2.3.2-3: Gegenüberstellung der Reinigungsverfahren

Die beiden stoffschlüssigen Verfahren Löten und Schweißen werden für Kontakte mit hohen Strombelastungen und hohen Übertragungsqualitäten bei Rastermaßen größer 1,27 mm eingesetzt. Die gängigsten Schweißverfahren sind das Widerstandpunktschweißen (beidseitiges Widerstandschweißen), das Widerstandspaltschweißen (einseitiges Widerstandschweißen), das Ultraschallschweißen und das Laserstrahlschweißen /KRI-00-3/. Zur Lötung der Kontakte finden das Bügellöten und das Kolbenlöten die größte Verwendung. Die größte Marktdurchdringung in der Stecker- und Stanzgitterkontaktierung besitzt das Bügellöten, das die Mehrfachkontaktierung erlaubt und so zur Prozesszeitreduzierung beiträgt. Für beide Techniken ist eine abisolierte Fügefläche notwendig, um die Trägerteile aufzusetzen /KLI-97/. Der größte Vorteil des Schweißens gegenüber dem Löten liegt im Fügen ohne Verwendung von Zusatz- und Hilfsstoffen. Ebenso entfällt die aufwändige Reinigung der Fügefläche mittels Flussmittel. Alle Anlagen und Einrichtungen sind nicht auf folienisolierte Flachleiter optimiert, sondern werden basierend auf konventionellen Schweiß- und Lötapparaturen aufgebaut. Trotz Anpassung der am Markt erhältlichen Anlagen ist die Bereitstellung, das Einlegen und das Positionieren des folienisierten Flachleiters sowie des Steckverbinders eine manuelle Tätigkeit. Abbildung 2.3.2-4 gibt einen Überblick über die gängigsten stoffschlüssigen Fügeverfahren und stellt die Merkmale der Techniken dar.




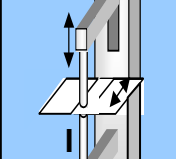
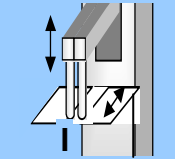
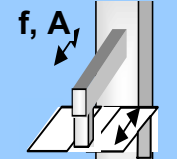
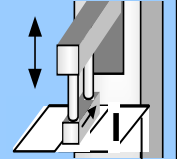
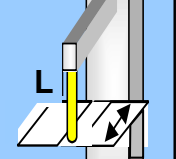



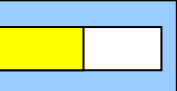




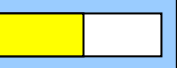

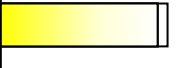
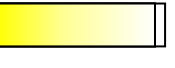
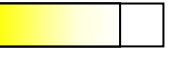
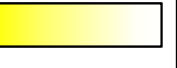
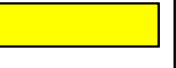



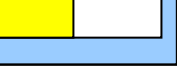

Legende: voll erfüllt  mittel  nicht erfüllt 	Widerstand- punkt- schweißen	Widerstand- spalt- schweißen	Ultraschall- schweißen	Bügellöten / Kolbenlöten	Laserlöten (Diode)
Prinzipbild					
Notwendige Komponenten	<ul style="list-style-type: none"> Steuerung Zustelleinheit Transformator (Kühlung) 	<ul style="list-style-type: none"> Steuerung Zustelleinheit Transformator (Kühlung) 	<ul style="list-style-type: none"> Steuerung Zustelleinheit Ultraschall- generator 	<ul style="list-style-type: none"> Steuerung Zustelleinheit Reinigungs- vorrichtung 	<ul style="list-style-type: none"> Steuerung Spiegelum- lenksystem Kühlung
Geringe Investitions- kosten					
Prozessdauer	0,1-0,3 s	0,1-0,3 s	0,05-0,2 s	0,5-2 s	0,2-2 s
Hohe Standzeit (inkl. Reinigung)	1.000 - 30.000 Schweißungen	1.000 - 30.000 Schweißungen	5.000 - 50.000 Schweißungen	Jede Lötung	10.000 h
Mehrfach- kontaktierung möglich	Nein	Nein	Bedingt	Ja	Nein
Hohe Verfügbarkeit					
Kurze Rüstzeiten					
Hohe Produkt- flexibilität					

Abbildung 2.3.2-4: Am Markt verfügbare Anlagen und Einrichtungen zum stoffschlüssigen Fügen folienisolierter Leiter

Die hier vorgestellten Abisolier- und Fügeverfahren sind jeweils Sonderlösungen, wodurch bisher kein einheitlicher Standard an Prozessüberwachungen definiert werden konnte. Die Überführung von Prozessüberwachungen aus dem Fügen konventioneller kupfergebundener Rundkabel ist für die neuen Techniken nicht möglich /POR-95/ und hat in der Praxis zum Einsatz von Anlagen und Einrichtungen ohne oder mit eingeschränkter Prozessüberwachung geführt. Die erreichten Ergebnisse des Fügeprozesses können nur durch zusätzliche aufwändige Prüfungen ermittelt und dokumentiert werden. Trotz umfangreicher Prüfungen, stellen Fehler in der Verbindungstechnik die Hauptausfallursache in der Elektrik und Elektronik dar. Im Automobil sind bereits 60% der Ausfälle auf Fehler in Elektrik und Elektronik

zurückzuführen, von denen 60-65% auf die Verbindungstechnik entfallen /ADA-02/, /REG-03/.

Aus den geführten Expertengesprächen und den Vor-Ort-Begehungen der Produktionslinien von Folienleiter-Konfektionären, Konfektionären, Maschinenherstellern und Endverarbeitern lassen sich die heute üblichen Verfahren zur Kontrolle der Kontakteigenschaften in Sichtkontrolle, elektrische und mechanische Prüfungen unterteilen. Die Sichtprüfung ist je nach Umfang durch die kurze Taktzeit von 4-10 s weit verbreitet, die Zuverlässigkeit der Ergebnisse ist allerdings bei elektrischer und mechanischer Prüfung deutlich größer.

Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sowie Veröffentlichungen über Prozessüberwachungen formschlüssiger Verbindungstechniken folienisolierter Flachleiter sind insbesondere in /KRI-02/ erarbeitet worden. Eine Überführung in den Einsatz in der durch kleine und mittelständische Unternehmen geprägten Kabelbranche ist aufgrund der hohen Investitionskosten nicht vorgenommen worden. Im Bereich der stoffschlüssigen Verbindung folienisolierter Flachleiter sind wissenschaftliche Erkenntnisse über ein automatisiertes System zur Kontaktierung mit höchstmöglicher Kontaktqualität für Folienleiter nicht bekannt.

Um das Potential der hohen Scherzugfestigkeit der Kontakte erschließen zu können, werden ausgehend vom Stand der Technik Entwicklungsschwerpunkte in Verfahren und Vorrichtungen zur Oberflächenanalyse sowie in Verfahren zur Bestimmung optimaler Prozessparameter gesetzt. Durch die vom folienisolierten Flachleiter und von Abisolierverfahren unabhängige Betrachtung des Verfahrens ist der breite Anwendungsbereich sichergestellt. Zur prototypischen Realisierung einer Pilotanlage ist es jedoch notwendig, anwendungsnahe Randbedingungen zu definieren.

3 Analyse des Produktspektrums und Erstellung eines Anforderungsprofils an das automatisierte stoffschlüssige Fügen folienisolierter Flachleiter

Die Ermittlung des eingesetzten Produktspektrums, der Montage- und Verbindungsaufgaben und die Markttendenzen wurden in Expertengesprächen ermittelt. Befragt wurden Fachleute der Kabelkonfektionäre von klassischen Rundkupferleitern und folienisolierten Leitern, Folienleiter- und Steckverbinderhersteller, Maschinenhersteller wie auch Hersteller von Endprodukten verschiedenster Anwendungsgebiete, die im eigenen Hause konfektionieren. Ergänzend dazu wurde eine Normen- und Literaturrecherche durchgeführt.

3.1 Analyse des Produktspektrums

Wie sich in Expertengesprächen ergeben hat und in der Literatur bestätigt wird /SCH-03/, /KRA-00/, /MOT-99/, ist das größte Marktwachstum für Elektrik und Elektronik im Automobilbereich zu erwarten. Der Anteil von 35 bis 40% der Herstellkosten für Elektrik und Elektronik bei komplett ausgestatteten Spitzenmodellen /GOR-03-2/, /GOR-04/ wird in naher Zukunft auch in gehobenen Mittelklassemodellen erwartet. Die sich hieraus ergebenden Trends in der Kabelkonfektion sind /KOM-00/, /VOL-04/, /BER-00/ und /ADA-03/ zu entnehmen. Der Schwerpunkt der Analyse wird aufgrund des großen Wachstumspotenzials des Marktes auf die Automobilbranche gelegt.

Betrachtet werden die Komponenten der Folienleitertechnik und deren Merkmale. Gegenstand der nachfolgend zusammengefassten Untersuchungen waren im Wesentlichen die Analyse der

- Folienleitungssatzkomponenten,
- Abisolier- und Fügevorgänge,
- Qualitätskontrolle und Prozessüberwachung,
- Automatisierungshemmnisse sowie
- Fehler und deren Ursachen im Produktionsprozess.

Die Untersuchungs- und Entwicklungsschwerpunkte zur Erreichung eines automatisierten stoffschlüssigen Fügens folienisolierter Flachleiter werden im Hinblick auf die identifizierten Schwachstellen und Automatisierungshemmnisse innerhalb der ermittelten produkt- und montagetechnischen Randbedingungen festgelegt. Die Randbedingungen sind aus dem Typen- und Variantenspektrum, wie auch den Automatisierungshemmnissen abzuleiten.

Zur praxisnahen Definition der Aufgabenstellung zum automatisierten Fügen von folienisolierten Flachleitern sind im Rahmen der Analyse die wichtigsten geometrischen Daten der folienisolierten Leiter zu definieren. Die Analyse der geometrischen Randbedingungen zeigt deutliche Schwerpunkte in der Nachfrage nach folienisolierten Flachleitern mit bis zu 10 Polen bei einem Rastermaß von 2,54 mm. In den letzten Jahren hat sich ebenfalls ein Trend von geringeren Leiterbahndicken von 35 µm bis 70 µm hin zu Leiterbahndicken größer 70 µm gezeigt. Dies ist auf die Randbedingungen im Walzprozess der Leiterbahnen aus Kupferrundleitern zurückzuführen.

Durch die Verwendung von üblicherweise 100 µm dicken Leiterbahnen ist eine Querschnittsanpassung nur über die Variation der Leiterbahnbreite zu erreichen, wodurch sich der nahezu gleichverteilte Einsatz von Leiterbahnen mit Breiten von 0,2 mm bis 2,0 mm erklärt. Zukünftig wird für das Rastermaß 2,54 mm eine einheitliche Leiterbahnbreite von 1,4 mm angestrebt und die bedarfsgerechte Anpassung der Leiterquerschnitte eingeschränkt.

Neben der Varianz in den geometrischen Abmessungen der folienisolierten Flachleiter, trägt die Materialauswahl von Isolations- und Leitermaterial deutlich zur Steigerung des Typen- und Variantenspektrums bei. Als Leiterwerkstoff wird verstärkt reines Kupfer eingesetzt, darüber hinaus kommen niedrig legierte Kupferwerkstoffe zum Einsatz. Bei folienisolierten laminierten Flachleitern wird als Basismaterial eine Kunststoffolie verwendet, die gleichzeitig als Isolationsfolie für die applizierten Leiterbahnen dient /GIL-92/, /CMC-03/. Der Einfluss der Isolationsrückstände auf den Fügeprozess wird über eine Oberflächenanalyse ermittelt, weshalb auf die Darstellung der möglichen Isolations- und Klebstoffrückstände verzichtet wird.

In flexiblen, folienisolierten Flachleitungssätzen besitzt der Einsatz von FFC die größte Relevanz. Die Analyse hat ergeben, dass sich im Bereich der Anschlussgeometrien und der Leiter- und Isolationsmaterialien Analogien in der Entwicklung im Laminieren und Extrudieren der Folienleiter zeigen.

Die weiteren Untersuchungen werden deshalb mit folgenden Folienleitern durchgeführt:

- Laminiertes, folienisolierter Flachleiter FLC
- Rastermaß 2,54 mm
- Polzahl 4 Pole
- Leiterbahnbreite 1,57 mm
- Leiterbahnhöhe 0,09 mm
- Leitermaterial Kupfer (Cu)
- Veredelung des Leiters Keine
- Isolationsmaterial PEN
- Isolationsdicke 50 µm

3.2 Analyse des automatisierten Fügeprozesses

3.2.1 Handhabungs- und Positionierungsprozesse

Der Montagevorranggraph zur Verarbeitung von FFC ist Abbildung 3.2.1-1 zu entnehmen. In dieser Darstellung wird von einer Anlieferung der FFC als Rollenware ausgegangen, so dass ein Ablängen und Abisolieren notwendig wird. Alternativ können FFC abgelängt oder sogar abgelängt und abisoliert bezogen werden. Wie die Analyse gezeigt hat, ist im Durchschnitt ein hoher Automatisierungsgrad in den Prozessen realisiert, während die automatische Handhabung und Positionierung der folienisolierten Flachleiter noch nicht hinreichend gelöst ist.

Der nachfolgende Prozessschritt umfasst die optionale Reinigung der Fügeoberfläche. Anschließend werden sowohl das Trägerteil, als auch der abisolierte Flachleiter überwiegend manuell in der Fügeeinheit in Position gebracht. Der manuell ausgelöste Fügeprozess läuft nachfolgend automatisch ab. Der gefügte Flachleiter wird manuell entnommen und die manuelle bzw. optische Kontaktstellenprüfung durchgeführt.

Montagevorranggraph		Durchschnittlicher Automatisierungsgrad	
FFC	Trägerteil	0	1
Ablängen		[Bar chart showing automation level]	
Positionieren und Fixieren		[Bar chart showing automation level]	
Abisolieren		[Bar chart showing automation level]	
Entnahme		[Bar chart showing automation level]	
Positionieren und Fixieren		[Bar chart showing automation level]	
Reinigung		[Bar chart showing automation level]	
Entnahme		[Bar chart showing automation level]	
Positionieren und Fixieren		[Bar chart showing automation level]	
Fügen (Schweißen)		[Bar chart showing automation level]	
Entnahme		[Bar chart showing automation level]	
Prüfung		[Bar chart showing automation level]	
Entnahme		[Bar chart showing automation level]	

Basis: 48 Expertengespräche (2000-2003, 41 Firmen)
 Automatisierungsgrad 1: rein automatisierte Vorgänge
 Automatisierungsgrad 0: rein manuelle Vorgänge

Abbildung 3.2.1-1: Montagevorranggraph zum Fügen folienisolierter Flachleiter

Die automatisierten Prozesse sind mit Prozessüberwachungen ausgestattet. Dies führt durch die fehlende Regelung zu stark schwankenden Kontaktfestigkeiten. Die realisierten automatisierten Prozesse sind zudem äußerst unflexibel, was den Einsatz nur in Branchen mit hohen Stückzahlen bei geringer Typen- und Variantenvielfalt möglich macht oder einen erhöhten Umrüstaufwand verlangt.

3.2.2 Oberflächenanalyse

Nachdem eine vollständige Reinigung der Fügefläche mit vertretbarem Aufwand innerhalb üblicher Taktzeiten nicht möglich ist, ist eine Oberflächenanalyse der Fügefläche zur Schaffung definierter Eingangsgrößen erforderlich. Unabhängig vom Fügeverfahren spielt die Oberflächenreinheit der zu verbindenden Bauteile eine große Rolle. Beim Widerstandpunktschweißen hängen die Übergangswiderstände zwischen Elektrode und folienisoliertem Flachleiter sowie zwischen folienisoliertem Flachleiter und Trägerstück direkt von der Oberflächenbeschaffenheit und Reinheit der abisolierten Fügefläche ab. In der Untersuchung abisolierter folienisolierter

Flachleiter konnten schwankende Oberflächenzustände festgestellt werden, die direkten Einfluss auf die Kontakteigenschaften haben. Trotzdem wird eine industrielle Oberflächenbeurteilung bislang nicht eingesetzt, sondern die Kontakteigenschaften nach vollständigem Fügen geprüft. Eine Marktrecherche und die Durchführung von Vorversuchen zeigten für nachfolgend dargestellte Verfahren die Möglichkeit für einen Serieneinsatz zur Oberflächenbeurteilung.

Die veränderte Oberflächenstruktur durch Epoxidrückstände wird in der **optischen 3-D-Vermessung** mit Rauheitsparametern bewertet. Die pixelgenaue Ausrichtung erfolgt durch eine Matchingfunktion und zeigt Veränderungen im Differenzbild zum unbeschädigten, reinen abisolierten Leiter. Das System kann allerdings den Werkstoff der Verschmutzung nicht vom Grundmaterial Kupfer unterscheiden.

Die **Fluoreszenzmikroskopie** beruht auf dem Prinzip, dass einige Moleküle einen Teil des absorbierten Lichts in Form langwelliger Strahlung wieder abstrahlen. Nicht alle Stoffe besitzen diese fluoreszierende Eigenschaft, was im vorliegenden Fall auf den Werkstoff Kupfer zutrifft. Die fluoreszierenden Eigenschaften der Klebstoffe und Isolationen sind nur unter Anregung mit einer stoffspezifischen Wellenlänge erkennbar, die vor einer Messung in einem UV-Kabinett bestimmt werden müssen. Jeder verwendete Kunststoff benötigt deshalb im Messsystem den Einsatz eines geeigneten Filters.

In der **Weißlichtinterferenzmethode** entstehen durch Beleuchtung einer Probe mit weißem Licht durch die Überlagerung der Reflektionsspektren von Ober- und Unterseite der Beschichtung Interferenzspektren. Anhand des Interferenzspektrums können Rückschlüsse auf die Schichtdicke und den Brechungsindex gemacht werden. Mathematische Verfahren werten diese Interferenz an optisch transparenten Schichten in Form von geometrischen Schichtdicken aus. Die genaue Positionierung der Folienleiter ist für die Aussagekraft der Messung entscheidend und daher aufwändiger als bei anderen Verfahren.

Bei der **Betarückstreumethode** sendet eine Isotopenquelle Betastrahlen (Elektronen) aus, die auf die Oberfläche des beschichteten Werkstoffs treffen und in Wechselwirkung mit den Elementarteilchen des Schicht- und Grundwerkstoffs treten. Prinzipbedingt kann nur ein mittlerer Verschmutzungsgrad angegeben werden, dessen Genauigkeit von der Messdauer abhängt.

In der Messung des **Oberflächenwiderstands** werden direkt die elektrischen Eigenschaften der Beschichtung überprüft. Die Messung erfolgt durch Kontaktierung der späteren Fügefläche mit Elektroden um die unterschiedlichen Übergangswiderstände der zu fügenden Folienleiter aufzunehmen. Die Messung der Oberflächenwiderstände kann in einer vorgelagerten Station vor der Fügestation oder

bei Fügeverfahren mit berührenden leitfähigen Elementen in der Fügestation integriert werden.

Die dargestellten Verfahren werden in der Konzeption den Anforderungen gegenübergestellt und das geeignete Verfahren in der prototypischen Realisierung implementiert.

3.2.3 Fügeverfahren

3.2.3.1 Charakteristika der Fügeverfahren

In diesem Kapitel ist das Fügeverfahren für die nachfolgenden Versuche zu bestimmen. Da das Fügeverfahren Einfluss auf die Gestalt und Oberflächenbeschaffenheit des zweiten Fügepartners hat, wird anschließend das Trägerteil definiert. Zur Beurteilung der erreichten Kontakteigenschaften sind die möglichen Prüfverfahren gegenüberzustellen und auf die notwendigen Prüfungen zu beschränken.

Aus den zur Energieübertragung geeigneten Fügeverfahren werden die verbreiteten Techniken in Abbildung 3.2.3-1 dargestellt. Da keine vergleichbaren Daten zur Analyse der Fügeverfahren im stoffschlüssigen Fügen folienisolierter Flachleiter zur Verfügung standen, wurden die aufgeführten Merkmale in eigenen Versuchsreihen ermittelt /ADR-01/. Betrachtet wurden die elektrischen und mechanischen Eigenschaften der Kontaktstelle sowie die Bauteilbelastung im Fügeprozess.

Die Untersuchung hat gezeigt, dass die Stromtragfähigkeit bis zu den überprüften 15 A von allen untersuchten stoffschlüssigen Verfahren gewährleistet wird. In der mechanischen Festigkeit weisen die Schweißverfahren, vor allem die Widerstandschweißverfahren mit bis zu 45 N pro Kontakt, die größten Zugfestigkeiten auf. Da die Scherzugfestigkeit die entscheidende Beurteilungsgröße der Kontaktstelle darstellt und beim Widerstandspunktschweißen im Vergleich zum Widerstandspaltschweißen eine bessere Wiederholbarkeit der Kontakteigenschaften zu erreichen ist, wird dieses Verfahren für die weiteren Untersuchungen herangezogen.

Das Fügeverfahren nimmt entscheidenden Einfluss auf den zweiten Fügepartner, weshalb die Definition erst nach Auswahl des Widerstandspunktschweißverfahrens vorgenommen werden kann. Gefügt werden die in Kapitel 3.1 definierten folienisolierten Flachleiter mit Trägerteilen, die einen Ersatzkontakt für Stanzgitter darstellen. Die direkte Kontaktierung erfolgt nahezu ausnahmslos mit Kupferleitern mit geringen Legierungsanteilen.














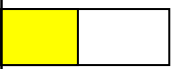
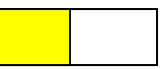



Legende: voll erfüllt  mittel  nicht erfüllt 	Widerstand- punkt- schweißen	Widerstand- spalt- schweißen	Ultraschall- schweißen	Bügellöten / Kolbenlöten	Laserlöten
Beurteilung der Kontaktstelle					
Prozess- überwachung (mögliche Prinzipien)	<ul style="list-style-type: none"> • Kraft • Energie • Zeit • Fügeweg 	<ul style="list-style-type: none"> • Kraft • Energie • Zeit • Fügeweg 	<ul style="list-style-type: none"> • Kraft • Energie • Zeit • Verdichtung 	<ul style="list-style-type: none"> • Kraft • Energie • Zeit • Temperatur 	<ul style="list-style-type: none"> • Energie • Zeit • Temperatur
Geringe mech. Belastung im Prozeß					
Geringe therm. Belastung im Prozeß					
Hohe mechanische Festigkeit	45 N	44 N	42 N	39 N	34 N
Hohe Stromtrag- fähigkeit	15 A	15 A	15 A	15 A	15 A
Zusatz- und Hilfsstoffe	-	-	-	Lot	Lot
Notwendige Abisolat	Beidseitig	Beidseitig / einseitig	Einseitig	Beidseitig / einseitig	Beidseitig / einseitig

Abbildung 3.2.3-1: Merkmale der Fügeverfahren zum Fügen folienisolierter Flachleiter

In Voruntersuchungen haben die Kontaktstellen der verzinnten Fügepartner mit den folienisolierten Flachleitern deutlich höhere mechanische Festigkeiten gezeigt, als die in /ADR-01/ ermittelten Werte. Dies ist auf das Schmelzen der Zinnschicht zurückzuführen, die bei entsprechendem Energieeintrag um den Schweißkontakt eine zusätzliche Lötung erzeugt. Um die Beeinflussung des Schweißprozesses durch die Lötung zu vermeiden, wird in der Untersuchung zur Kontaktierung ein Ersatzkontakt herangezogen, der aus Kupfer ohne weitere Oberflächenveredelung besteht. Die weiteren Untersuchungen werden mit folgenden Kontaktstücken durchgeführt:

- Leitermaterial Kupfer (Cu)
- Kontaktlänge 30 mm
- Kontaktbreite 1,5 mm
- Kontakthöhe 0,3 mm
- Veredelung des Kontakts Keine
- Isolationsmaterial Kein

Beide Fügepartner sind in Abbildung 3.2.3-2 dargestellt.

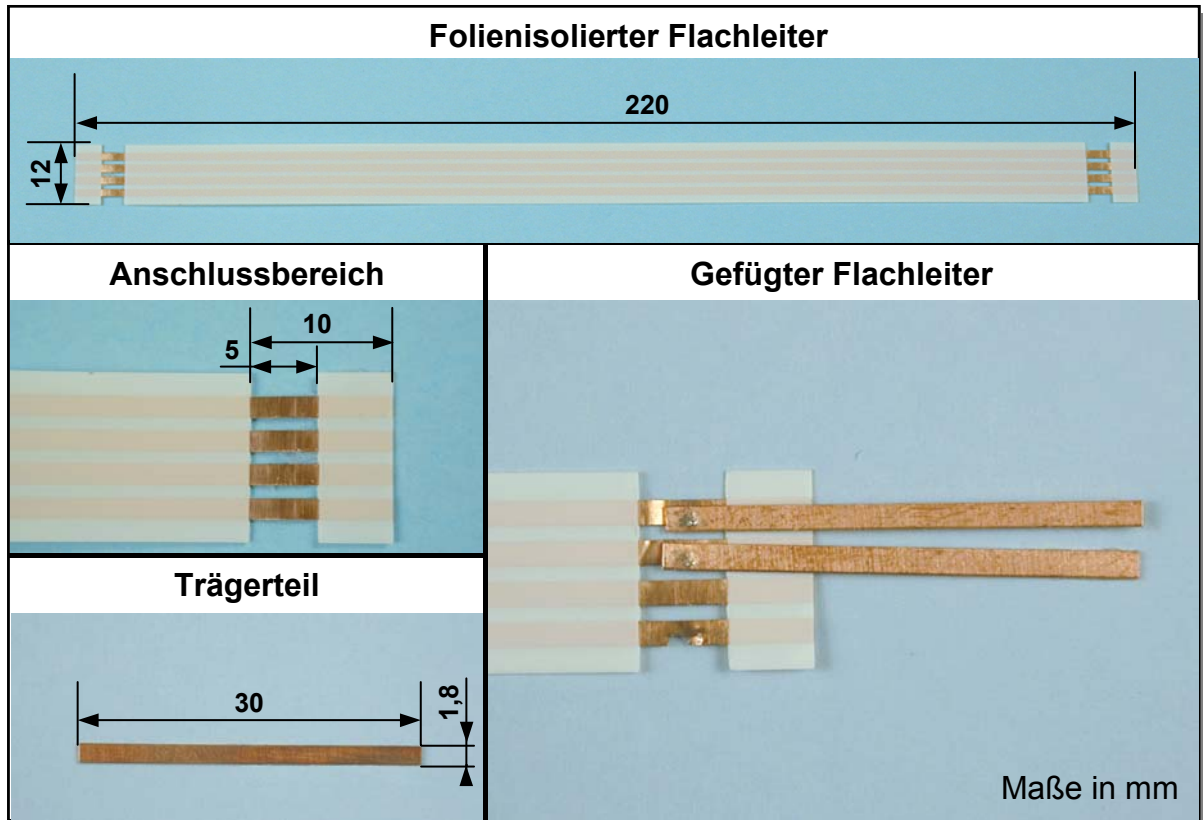


Abbildung 3.2.3-2: Ausgewählte Komponente

Zur Beurteilung der elektrischen Kontakteigenschaften werden die Stromtragfähigkeit, also die Erreichung einer bestimmten Grenztemperatur im Kontaktbereich bei Strombeaufschlagung, und der Übergangswiderstand der Kontaktstelle mittels Messung nach /DIN-02/ zu ermitteln. Bei stoffschlüssiger Kontaktierung folienisolierter Flachleiter konnten in den Vorversuchen durch den großen Querschnitt der Kontaktfläche im Vergleich zum Leiterquerschnitt keine wesentlichen Unterschiede in den elektrischen Eigenschaften bei stark schwankenden Prozessparametern festgestellt werden. So ist bei einer üblichen Schweißlinse mit einem Durchmesser von 1 mm ein Querschnitt von $0,785 \text{ mm}^2$ gegeben, während der Leiter mit einer Breite von 1,57 mm und einer Höhe von 0,09 mm nur einen Querschnitt von $0,14 \text{ mm}^2$ aufweist. Das Verhältnis der Querschnitte Kontaktfläche zu Leiterbahnquerschnitt von $\sim 5,6$ zeigt, dass Änderungen auf den Übergangswiderstand erst bei einer Erhöhung um diesen Faktor Auswirkungen zeigen. Dies konnte durch Messungen im Labor bestätigt werden, weshalb eine elektrische Prüfung in den nachfolgenden Versuchsreihen nicht vorgesehen wird.

Die mechanischen Eigenschaften der Fugestelle werden durch Schäl- und Scherzugversuche ermittelt. Die mechanische Festigkeit zeigt sowohl im Schälzug-, als auch im Scherzugversuch deutliche Unterschiede bei schwankenden Prozessparametern. Im Folgenden wird aufgrund derselben Aussagekraft nur der Scherzugversuch zur Kontaktbeurteilung herangezogen.

Zur weiteren Untersuchung wird das Widerstandpunktschweißen eingesetzt, da hiermit die höchsten Scherzugfestigkeiten zu erzielen sind. Mit dem Schweißverfahren werden der abisolierte FLC und das Trägerteil gefügt und mittels Scherzugversuch auf die Fugestelleneigenschaften hin untersucht.

3.2.3.2 Auftretende Mängel im Fügeprozess

In der Konfektionierung folienisolierter Flachleiter treten unterschiedliche Fehler in Abhängigkeit der Fügepartner, der Flachleitertypen mit den verwendeten Materialien, sowie der eingesetzten Werkzeuge, Hilfsmittel und Vorrichtungen auf. Eine Zusammenstellung der mögliche Fehler und deren Bedeutung ist Abbildung 3.2.3.2-1 zu entnehmen.

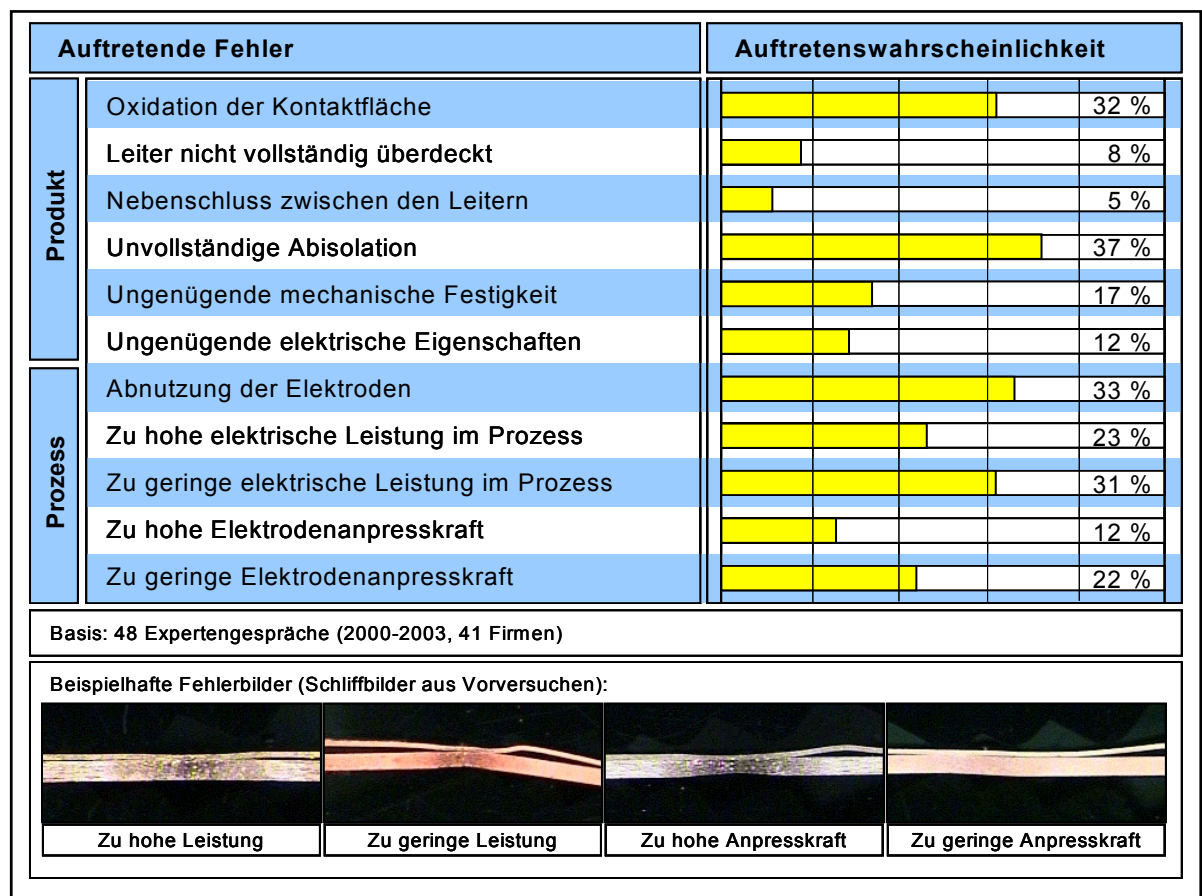


Abbildung 3.2.3.2-1: Auftretende Fehler im Fügeprozess von folienisolierten Flachleitern durch das Widerstandpunktschweißen

Die häufigsten Fehlernennungen am Produkt sind auf die unbekanntenen Eingangsbedingungen der Fügepartner zurückzuführen. So stellen Restisolationen oder Oxidationsprodukte sowie die Oberflächenrauheit auf der Fügefläche eine sehr wahrscheinliche Fehlerquelle im Prozess dar. Im Widerstandpunktschweißprozess ist weiterhin die Elektrodenabnutzung als entscheidender Fehler aufgetreten. Da nicht mit angepassten Prozessparameter gearbeitet wird, ist die Änderung der Fügestelleneigenschaften auf die schwankenden Eingangsbedingungen zurückzuführen.

Der undefinierte Anlieferungszustand der Fügepartner hat im Fügeprozess mit einem festgeschriebenen Parametersatz nicht ausreichende mechanische Eigenschaften zur Folge. Das Hauptproblem bildet hier die Unkenntnis über Art und Menge von Abisolationsresten und Einschlüsse. Durch Lager- und Transportzeiten abisolierter Flachleiter kann weiterhin eine Oxidation der Fügefläche auftreten. Dem Einfluss der geänderten Oberflächeneigenschaften auf das Fügeergebnis kann zum Teil durch Anpassung der Prozessparameter entgegengewirkt werden. Die fehlenden Einrichtungen zur Oberflächenanalyse vor dem Fügeprozess führen jedoch zum Fügen mit nicht angepassten Prozessparametern, was durch die hohen Nennungen der Prozessfehler mit zu geringer / hoher elektrischer Leistung sowie zu geringer / hoher Elektrodenanpresskraft bestätigt wird.

Durch das große Typen- und Variantenspektrum sind häufige Umrüstvorgänge der Maschinen erforderlich bzw. beim Fügen von Steckverbindern mit unterschiedlichen Kontakten ist eine Anpassung der Prozessparameter innerhalb des Fügens eines Steckverbinders zu variieren. Dies kann zu Fehleinstellungen in der Schweißleistung, der Anpresskraft und der Schweißzeit führen und stellt eine Fehlerquelle durch nicht angepasste Prozessparameter dar.

Neben den schwankenden Eingangsbedingungen der Fügepartner und den Umrüstvorgängen ist die Bestimmung der Prozessparametersätze eine weitere Fehlerquelle. Gängige Praxis ist die Ableitung der Parametersätze aus der Erfahrung ähnlicher Projekte. Auf eine aufwändige empirische Ermittlung der Prozessparameter mit Versuchsreihen oder die Bestimmung der Prozessparameter aus einer Prozessberechnung wird generell bei kleinen und mittelständischen Unternehmen verzichtet. Hierdurch wird das mechanische Festigkeitspotential der Fügestelle nicht vollständig erschlossen und bereits geringfügige Änderungen der Eingangsbedingungen nehmen gravierenden Einfluss auf die Fügestelleneigenschaften.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die fehlende Erfassung der schwankenden Eingangsgrößen der Fügepartner sowie die unzureichende Ermittlung der optimalen Prozessparametersätze ursächlich für die auftretenden Fügefehler sind.

3.2.3.3 Verfahren zur Berechnung des Widerstandpunktschweißprozesses

Die Prognose des Schweißergebnisses erfolgt üblicherweise über die numerische Schweißprozesssimulation. Weit fortgeschritten ist die Modellierung des Laserstrahlschweißens, des Lichtbogenschweißens unter Schutzgas sowie des Widerstandschweißens. Allerdings werden überwiegend losgelöste Detailfragen behandelt, die nur gering mit industriellen Fragestellungen verbunden sind /RAD-99/. Es existieren mehrere unterschiedliche Modellansätze, die bereits starke Einschränkungen unterworfen sind. Wie bereits in /RAI-99/ gezeigt, ist es nicht möglich, die räumliche Temperaturverteilung sowie die Stromdichte während des Schweißprozesses messtechnisch zu erfassen. Hierdurch wird eine Validierung der Modellansätze erschwert. Nachfolgend werden deshalb die allgemeinen Bereiche Prozess-, Konstruktions- und Werkstoffsimulation der Schweißprozesssimulation für eine numerische Betrachtung des Schweißprozesses erläutert und anschließend Beispiele und Grenzen der bisherigen numerischen Simulationen aufgezeigt.

In der Prozesssimulation werden die Schweißzone, die Prozesswirkungsgrade und die Prozessstabilität unter Berücksichtigung der thermischen und thermomechanischen Randbedingungen aus der Konstruktion und den relevanten thermischen Werkstoffkennwerten aus dem Bereich Werkstoffe betrachtet. Die Konstruktionsberechnung ermittelt den Einfluss von Eigenspannungen auf die Bauteilfestigkeit. Abschließend ermöglicht die Werkstoffberechnung die Bestimmung von Gefügestand und Härte und lässt damit eine Optimierung bezüglich Rissneigung und Eigenspannungszustand zu.

Zur Simulation des Widerstandschweißprozesses sind bereits mehrere wissenschaftliche Ausarbeitungen erstellt worden. Die betrachteten Aufgaben sind in der Karosseriefertigung der Automobilindustrie angesiedelt, weshalb überwiegend Stahl und Aluminium betrachtet werden. /BAU-95/, /GRE-92/ Die Simulation in der elektrischen Kontaktierung von Kupferbauteilen wird selten betrachtet. Falls der Kupferwerkstoff in die Betrachtung einbezogen wird, handelt es sich um spezifische Probleme, wie die Optimierung eines metallischen Überzugs oder die Ermittlung optimierter Parametersätze für einen speziellen Anwendungsfall. /RAI-99/

Die bisherigen Untersuchungen mit numerischen Lösungsansätzen zeigen, dass die Modelle sehr aufwändig und für jeden Anwendungsfall spezifisch sind und die Erstellung der Modelle nicht losgelöst von Versuchen vorgenommen werden kann.

3.2.4 Automatisierungshemmnisse

Im Rahmen der durchgeführten Expertengespräche wurden die wesentlichen technischen und organisatorischen Gründe ermittelt, die eine Automatisierung und Prozessüberwachung der Montage- und Fügeprozesse behindern. Das Ergebnis ist Abbildung 3.2.4-1 zu entnehmen.

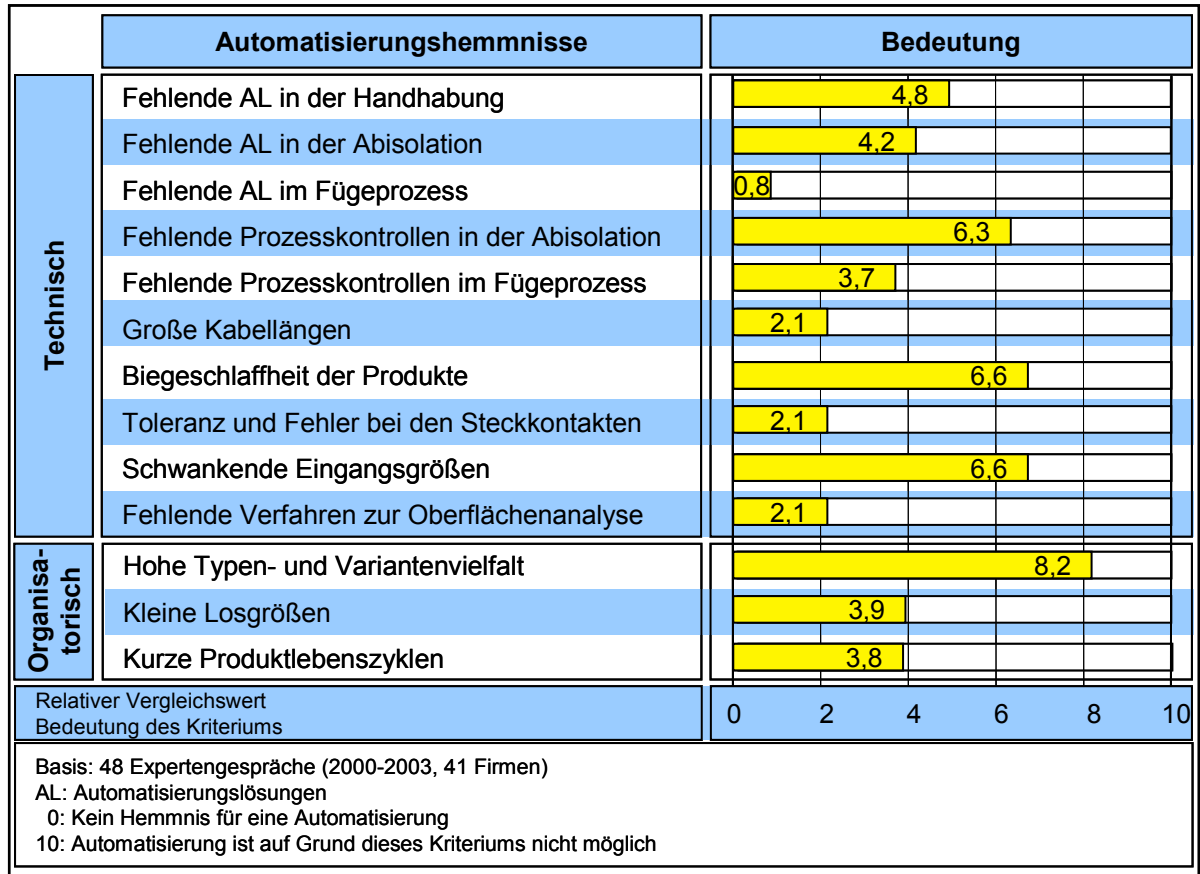


Abbildung 3.2.4-1: Automatisierungshemmnisse beim stoffschlüssigen Fügen von folienisolierten Flachleitern

Die fehlenden Automatisierungslösungen zur Handhabung und Positionierung und die fehlenden Prozesskontrollen in der Abisolation und im Fügen werden als die entscheidenden Hemmnisse zur Höherautomatisierung angesehen. Während mit Ausnahme der anwendungsspezifischen Lösung in /KRI-02/ die fehlenden Automatisierungslösungen zur Handhabung und Positionierung auf die Biegeschlaffheit der Flachleiter und die großen Kabellängen zurückzuführen ist, ist die fehlende Prozesskontrolle aus der großen Typen- und Variantenvielfalt abzuleiten. Ein weiteres Hemmnis für den effizienten Einsatz einer Prozesskontrolle stellen die schwankenden Eingangsgrößen der Fügepartner dar. Hierzu zählen unter anderem die geometrischen Abmessungen und die Position der Abisolierstellen. Darüber hinaus hat die Oberflächenbeschaffenheit einen entscheidenden Einfluss

auf die Kontakteigenschaften, so dass die Überwachung und Regelung der Fügeparameter aufgrund der schwankenden Eingangsgrößen allein nicht ausreichend ist, hohe, wiederholbare Scherzugfestigkeiten der Fügestellen zu erzeugen.

Eine Höherautomatisierung der Montage- und Fügeprozesse in Kombination mit bekannten Eingangsgrößen ermöglicht die reproduzierbare Herstellung hoher Fügestelleneigenschaften, die Reduzierung der Herstellkosten sowie eine bessere Nutzung der Produktionskapazitäten durch ausschließliche Weiterverarbeitung von 100% geprüften Bauteilen. Darüber hinaus ist eine Reduzierung der Durchlaufzeiten zu erwarten, und die wiederholbar hohen Fügestelleneigenschaften führen zu einem Rückgang der Nacharbeit und des Ausschusses.

3.3 Ableitung von Versuchs- und Entwicklungsschwerpunkten

Wie aus der Analyse ersichtlich wird, sind die Mehrzahl der fehlerhaften Fügestellen auf Leistungsschwankungen in den manuell ausgeführten Tätigkeiten und fehlende Prozesskontrollen bzw. Prozessparameteroptimierungen zurückzuführen. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit des automatisierten Fügens folienisolierter Leiter mit höchstmöglicher mechanischer Festigkeit. Zur Realisierung ist eine wirtschaftliche Lösung der technischen und organisatorischen Automatisierungshemmnisse notwendig. Unter Berücksichtigung der hohen Lohnkosten bei Handhabungs- und Montagevorgängen und dem erwarteten Marktwachstum in der Produktion folienisolierter Flachleitungssätzen, ist zur Verifikation des zu erarbeitenden Konzepts der Aufbau einer Pilotanlage zum automatisierten Fügen folienisolierter Leiter notwendig.

Die am Markt erhältlichen Werkzeuge und Einrichtungen, sowie die angebotenen teilautomatisierten Maschinen und Betriebsmittel erlauben keine durchgängige prozessüberwachte Automatisierung. Die Handhabung der folienisolierten Flachleiter ist bereits in /KRI-02/ erarbeitet und wird in der vorliegenden Aufgabe übernommen. In der Oberflächenanalyse und der Prozessparameterableitung ist dagegen ein starker Entwicklungsbedarf vorhanden. Hieraus leitet sich der Bedarf ab, Verfahren und Systeme zu entwickeln, die eine Lösung der Automatisierungshemmnisse herbeiführen. Die Zusammenhänge zwischen den sich ändernden Eingangsbedingungen und den erreichbaren mechanischen Scherzugfestigkeiten der Fügestelle sind nicht bekannt und müssen zunächst in experimentellen Untersuchungen ermittelt werden.

Hierzu werden folgende Untersuchungs- und Entwicklungsschwerpunkte gesetzt:

- Experimentelle Untersuchung der Prozessparameter im Fügeprozess bei unterschiedlichen Oberflächenkontaminationen mit Einfluss auf die Fügestelleneigenschaften,
- Schaffung definierter Eingangsbedingungen durch eine Oberflächenanalyse der Fügestelle,
- Entwicklung eines Verfahrens zur Vorausberechnung der wichtigsten Fügeprozessparameter unter Berücksichtigung der Eingangsbedingungen sowie
- Entwicklung von Verfahren und Werkzeugen zum prozessüberwachten und automatisierten stoffschlüssigen Fügen.

Unter Beachtung der Zielsetzung werden die peripheren Systembereiche nicht näher betrachtet, da diese vom Stand der Technik abgeleitet werden können.

3.4 Anforderungen an ein automatisiertes System zum stoffschlüssigen Fügen

Zur ordnungsgemäßen Abarbeitung des Fügeprozesses muss das automatisierte System die Aufgaben der Bereitstellung, Handhabung und Positionierung sowie Entnahme erfüllen. Darüber hinaus ist durch die Bestimmung der Oberflächenreinheit die Schaffung definierter Eingangsgrößen einzubeziehen. Soweit möglich, werden die Aufgaben in Teilsystemen zusammengefasst. Das Gesamtsystem besteht somit aus den Teilsystemen Handhabungs- und Positioniersystem, Analysesystem der Fügestellenoberfläche und dem Fügesystem.

3.4.1 Gesamtsystem

Aus der Analyse können die Basisanforderungen an das Gesamtsystem abgeleitet werden. Diese besitzen für alle folgenden Teilsysteme Gültigkeit und werden gemäß Abbildung 3.4-1 definiert. Die Varianten- und Umrüstflexibilität ergibt sich dabei aus der Analyse der Produktcharakteristika. Die Positionsgenauigkeit wird durch die geforderte minimale Überdeckung in der Schweißzange bei kleinsten geometrischen Abmessungen beider Fügepartner bestimmt.

3.4.2 Handhabung und Positionierung von Trägerteil und folienisoliertem Flachleiter

Das Handhabungs- und Positioniersystem muss eine sichere und genaue Positionierung der Fügeflächen des abisolierten, folienisolierten Flachleiters gewährleisten. Die Anschlussstelle muss im Arbeitsraum sicher innerhalb der geforderten Toleranzen zur Oberflächenanalyse und zum Fügen positioniert werden. Die Anforderungen an das Teilsystem sind in Abbildung 3.4-1 dargestellt. Zur Verringerung der unproduktiven Verfahrszeiten wird die Bahngeschwindigkeit mit größer 5 m/s festgelegt. Weiterhin ist zum Ausgleich des biegeschlaffen Verhaltens eine mindestens an zwei Positionen angreifende Fixierung notwendig. Hierbei wird aufbauend auf der Anlage von /KRI-02/ eine Optimierung und Erweiterung vorgenommen.

3.4.3 System zur Oberflächenbeurteilung

In der Oberflächenanalyse werden die definierten Eingangsparemeter für den Fügeprozess ermittelt. Die Analyse zählt damit zu den zentralen Teilsystemen. In diesem Teilsystem wird die Grundlage für die Erreichung einer hohen reproduzierbaren Scherzugfestigkeit der Fügestelle festgelegt. Die Anforderung an die Beurteilungsgenauigkeit wird aus /DIE-67/ abgeleitet. Anforderungen an das Prüfsystem sind die Integrierbarkeit der Prozesse durch Gewährleistung geringer Taktzeiten bei Erreichung der geforderten Genauigkeit des Verfahrens. Des Weiteren soll die Prüfmethode zerstörungsfrei und ohne Einfluss auf das spätere Schweißergebnis ablaufen. Eine Übersicht über die Anforderungen liefert Abbildung 3.4-1.

3.4.4 System zum Fügen

Als drittes bedeutendes Teilsystem innerhalb der Gesamtanlage führt die Einheit zum Fügen der ausgewählten folienisolierten Flachleiter und den Trägerteilen den wertschöpfenden Prozess in der Kette aus. Um hohe, reproduzierbare mechanische und elektrische Eigenschaften zu erreichen, sind hier die Daten der vorhergehenden Oberflächenanalyse zu verarbeiten und die positionierten Fügepartner mit den aus der Oberflächenanalyse resultierenden Prozessparametern zu fügen. Die Anforderungen sind in Abbildung 3.4-1 aufgeführt. Die notwendige Genauigkeit der Prozessparameter ergibt sich dabei aus den Erfahrungen der Vorversuche. Weiterhin ist durch die Regelung der Prozessparameter auf den vorbestimmten Sollwerten ein gleichmäßiger Leistungseintrag im Schweißprozess zu gewährleisten.

Kriterium	Genauigkeit, Spezifikation
Gesamtsystem	
<ul style="list-style-type: none"> - Speichern und Transportieren der folienisolierten Flachleiter - Definiertes Positionieren und Fixieren der Fügebereiche in den Bearbeitungsstationen - Hohe Variantenflexibilität bzw. Umrüstflexibilität - Kurze Takt- und Prozesszeiten - Geringes Investitionsvolumen und geringe variable Kosten - Hohe Funktionssicherheit und Verfügbarkeit - Geringe Investitionskosten 	<p>4 Pole, Rastermaß 2,54 mm, Breite 12 mm, Position $\pm 0,1$ mm</p> <p>Positionsgenauigkeit $\pm 0,1$ mm</p> <p>Leiterbahndicke: 70 bis 300 μm</p> <p>Leiterbahnbreite: 1 bis 4 mm</p> <p>$< 16 \text{ s} \Rightarrow 4 \text{ s} / \text{Fügestelle}$</p>
Handhabung und Positionierung der Kontaktkörper	
<ul style="list-style-type: none"> - Sicheres Aufnehmen und Ablegen des Folienleitungssatzes - Hohe Bahngeschwindigkeit des Roboters - Ausgleich des biegeschlaffen Verhaltens - Entnahme des gefügten Folienleitungssatzes 	<p>Positioniergenauigkeit: $\pm 0,5$ mm</p> <p>$> 5 \text{ m/s}$</p> <p>Greifer mit mind. zwei Greifpunkten</p>
Oberflächenanalyse	
<ul style="list-style-type: none"> - Bestimmung der mittleren Schichtdicke - Bestimmung der Materialeigenschaften der Rückstände - Aufbereitung der Daten in digitaler Form - Weiterleitung der aufbereiteten Daten an die Fügeinheit 	<p>Bestimmung auf 0,5 μm genau</p> <p>Oxidation, Rückstände</p>
Kontaktierungseinheit	
<ul style="list-style-type: none"> - Ermittlung der optimalen Kontaktierungsparameter aus den Ergebnissen der Oberflächenanalyse mit der angegebenen Genauigkeit - Prozessüberwachung mit Regelung der Prozessparameter gemäß o. a. Genauigkeit - Bereitstellung der notwendigen Fügeenergie - Integration der Teilsysteme - Frei programmierbare und reproduzierbare Einstellung der Ausgangsparameter 	<p>Schweißstrom: 0,1 kA, Anpresskraft: 0,1 bar, Schweißzeit: 1 bzw. 20 ms</p>

Abbildung 3.4-1: Anforderungen an das System zum automatisierten stoffschlüssigen Fügen folienisolierter Flachleiter

4 Konzeption von Teilsystemen zum stoffschlüssigen Fügen

4.1 Ableitung von Randbedingungen bei der Systemkonzeption

Die Konzeption automatisierter Systeme zum Fügen von folienisolierten Flachleitern ist von unterschiedlichen Einflussfaktoren abhängig. Der konstruktive Aufbau wird im Wesentlichen durch den Produktaufbau, die geforderte Ausbringung, die Systemflexibilität bezogen auf das Typen- und Variantenspektrum und die Möglichkeit zur Prozesskontrolle bestimmt. In der Entwicklung der automatisierten Lösung sind im Gesamtkonzept die verschiedenen Anforderungen aus Kapitel 3.4 zu berücksichtigen.

Zum flexibel automatisierten Fügen folienisolierter Flachleiter werden im folgenden die notwendigen Teilsysteme konzeptionell ausgelegt. Die erforderlichen Teilsysteme umfassen:

- Handhabung und Positionierung der Folienleiter und der Trägerteile,
- Beurteilung der Fügeoberflächen sowie Ableitung der Prozessparameter zum Fügen und
- Fügen und Prozessüberwachung.

Zur Vernetzung in der Automatisierungszelle ist darüber hinaus die Verkettung der Teilsysteme notwendig. Die Verkettung nimmt Einfluss auf die Betrachtung der erforderlichen Teilsysteme und muss deshalb zuerst konzipiert werden.

Aufgrund der Bewertung in Abbildung 4.1-1, die sich durch im Vergleich zu den anderen Konzepten geringen Investitionskosten und eine hohe Verfügbarkeit auszeichnet, wird der Einsatz eines Industrieroboters zur Handhabung und Positionierung der folienisolierten Flachleiter bevorzugt. Die ausreichende Reichweite zur Verkettung der Teilsysteme durch den SCARA-Roboter erlaubt den Einsatz des Einplatzsystems.





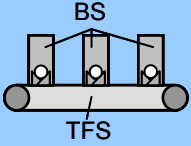
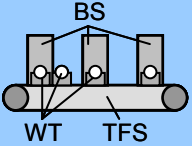
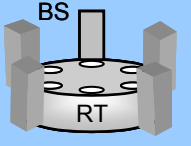
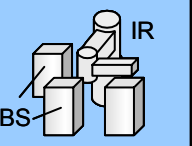

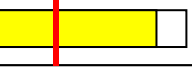

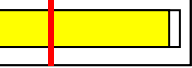
























Legende: voll erfüllt  mittel  nicht erfüllt  Mindestanforderung 	Starr linear verkettet	Flexibel linear verkettet	Starr mit Rundtaktisch	Roboter
Prinzipbild				
Speichern der folienisolierten Flachleiter				
Positionierung der Kontaktbereiche				
Hohe Produktflexibilität				
Kurze Takt- und Prozesszeiten				
Geringe Investitionskosten				
Geringe variable Kosten				
Hohe Verfügbarkeit				
TFS: Transfersystem WT: Werkstückträger		RT: Rundtaktisch BS: Bearbeitungsstation		IR: Industrieroboter

Abbildung 4.1-1: Verkettung der Teilsysteme

4.2 Lösungskonzepte zur Bereitstellung, Handhabung und Positionierung der Fügepartner

Die beschriebene Aufgabe ist maßgeblich durch die genaue Positionierung der beiden Fügepartner bestimmt. Da die Eigenschaften der Fügepartner sich wesentlich unterscheiden, ist die Handhabung und Positionierung beider Partner getrennt zu betrachten.

Aufgrund der deutlichen Vorteile in der Positioniergenauigkeit und im Ausgleich des biegeschlaffen Verhaltens der folienisolierten Flachleiter wird das Konzept eines ortsfesten Werkzeugs mit Handhabung und Positionierung des folienisolierten Flachleiters durch den SCARA-Roboter umgesetzt. Zur **Handhabung und Positionierung der folienisolierten Flachleiter** wird der in der Verkettung ausgewählte Industrieroboter mit einem Sauggreifer eingesetzt. Die sichere Funktion mit Erfüllung der in Kapitel 3.4 definierten Anforderungen ist in ähnlichen Anwendungen bereits nachgewiesen und wird deshalb nicht näher betrachtet.





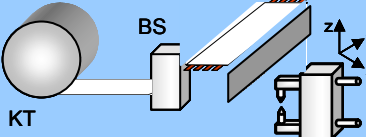
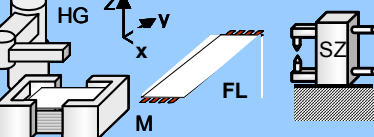




















Legende: voll erfüllt  mittel  nicht erfüllt  Mindestanforderung 	Von der Rolle Bewegtes Werkzeug	Magazin und HH-Gerät Ortsfestes Werkzeug												
Prinzipbild														
Hohe Funktions- sicherheit														
Geringe Verfahrzeit														
Ausgleich biege- schlaffen Verhaltens														
Hohe Positionier- genauigkeit														
<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 33%;">FL: Folienleiter</td> <td style="width: 33%;">SZ: Schweißzange</td> <td style="width: 33%;">KT: Kabeltrommel</td> </tr> <tr> <td>BS: Bearbeitungsstation</td> <td>HG: Handhabungsgerät</td> <td>M: Magazin</td> </tr> <tr> <td> Schweißzange</td> <td> Folienleiter</td> <td> Ortsfest</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td> Beweglich</td> </tr> </table>			FL: Folienleiter	SZ: Schweißzange	KT: Kabeltrommel	BS: Bearbeitungsstation	HG: Handhabungsgerät	M: Magazin	 Schweißzange	 Folienleiter	 Ortsfest			 Beweglich
FL: Folienleiter	SZ: Schweißzange	KT: Kabeltrommel												
BS: Bearbeitungsstation	HG: Handhabungsgerät	M: Magazin												
 Schweißzange	 Folienleiter	 Ortsfest												
		 Beweglich												

Abbildung 4.2-1: Lösungsalternativen zur Handhabung und Positionierung der folienisolierten Flachleiter

Zur sicheren **Zuführung und Positionierung der Trägerteile** können die in Abbildung 4.2-2 dargestellten Konzepte realisiert werden.

Zur Zuführung von Kleinteilen mit hoher Positioniergenauigkeit werden üblicherweise gegurtete Kontakte zugeführt. Da bedingt durch die nicht / schwer gegurtet zuführbaren Stanzgitter die Funktionssicherheit der gegurteten Zuführung nicht gegeben ist, wird gemäß der Bewertung aus Abbildung 4.2-2 die Zuführung der Trägerteile aus einem Magazin mit aktiver Zuführung eingesetzt. Die Positionierung in der Fügeinheit wird durch eine geeignete Anordnung des Magazins zur Schweißanlage erreicht. Im Anschluss an den Schweißprozess wird der gefügte folienisolierte Flachleiter mit dem geschweißten Trägerteil durch den Roboter aus der Fügezone entfernt.

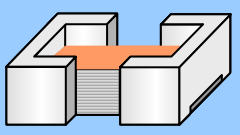
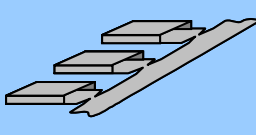
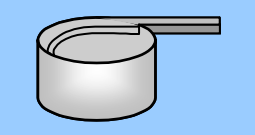
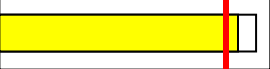
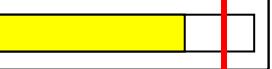
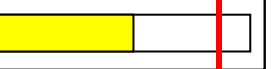



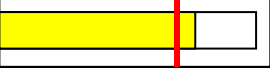
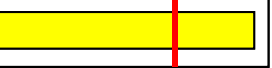




	Magazin	Gegurtet	Vibrationswendelförderer
Prinzipbild			
Hohe Funktions-sicherheit			
Geringe Verfahrenzeit			
Zuführung Kleinteile			
Hohe Positionier-genauigkeit			

Abbildung 4.2-2: Lösungsalternativen zur Handhabung und Positionierung der Träger Teile

Im Folgenden wird das Konzept der Handhabung von Folienleitern durch Industrieroboter mittels eines Sauggreifers gemäß /KRI-02/ und die Zuführung der Träger Teile direkt aus einem Magazin mit aktiver Zuführung verfolgt.

4.3 Lösungskonzepte zur Oberflächenbeurteilung

Die am Markt erhältlichen Abisolierverfahren führen durch Isolations- und Klebstoffrückstände auf der Fügefläche bei einem stoffschlüssigen Fügen zu schwankenden Scherzugfestigkeiten der Fugestelle. Um definierte Eingangsparmetergrößen zu erzeugen, sind die Rückstände auf der Oberfläche zu bestimmen. Darüber hinaus ist die Detektion innerhalb der Taktzeiten zum Fügen folienisolierter Leiter durchzuführen. Hierzu wurden die in Abbildung 4.3-1 dargestellten Verfahren in Vorversuchen in der Leistungsfähigkeit untersucht und für den Einsatz in der Automatisierungszelle bewertet.





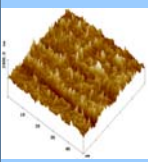
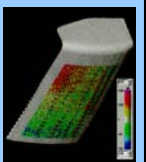

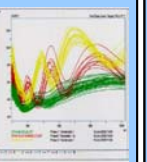
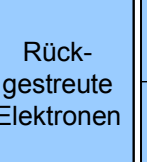
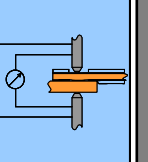
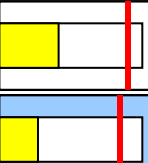
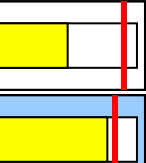
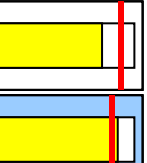
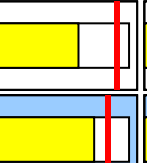
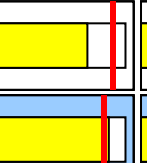
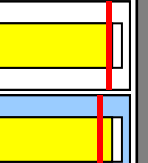

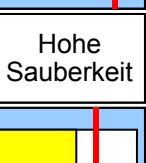


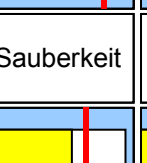

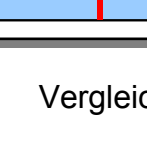
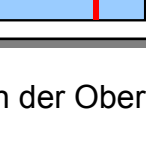
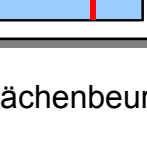

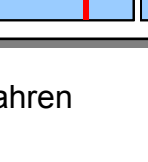

Legende: voll erfüllt  mittel  nicht erfüllt  Mindestanforderung 	Atomkraftmikroskop	3-D-Vermessung	Fluoreszenzmikroskopie	Weißlichtinterferenz	Beta-Rückstreuverfahren	Übergangswiderstand
Prinzipbild Ergebnis						
Geringe Investitionskosten						
Geringe Taktzeit / Prozesszeit						
Notwendige Umgebungsbedingungen	Hohe Sauberkeit	Hohe Sauberkeit	Werkstatt	Werkstatt	Sauberkeit	Werkstatt
Hohe Prozesssicherheit						

Abbildung 4.3-1: Vergleich der Oberflächenbeurteilungsverfahren

Das Atomkraftmikroskop und die 3-D-Vermessung sind nur in der Lage geometrische Veränderungen aufzunehmen. Eine Bestimmung der Kontamination und eine quantitative Aussage ist mit diesen Verfahren nicht zu erreichen. Die Fluoreszenzmikroskopie und das Prinzip der Weißlichtinterferenz sind prinzipiell anwendbar, werden jedoch durch die hohen Investitionskosten nicht weiter verfolgt. Für das Beta-Rückstreuverfahren sind besondere Anforderungen an die Sauberkeit der Umgebung zu erfüllen, so dass ein späterer Einsatz in der Produktion unwahrscheinlich ist. Mit geringfügiger Modifikation der Schweißanlage ist die Analyse mittels Gesamtwiderstandsmessung zwischen den Elektroden in der Fügeinheit möglich. Da dieses Verfahren ein ausreichendes Messergebnis bei geringen Investitionskosten liefert, wird es im Aufbau der automatisierten Fügeanlage berücksichtigt. Die Optimierung der Oberflächenanalyse ist nicht Bestandteil der Aufgabe und wird nicht betrachtet.

4.4 Lösungskonzepte zum Fügen

Analog zu der Auswahl der Oberflächenanalyse werden in diesem Kapitel die Lösungsalternativen zum Fügeprozess zusammengestellt und bewertet. In der Werkzeuggestaltung sind zwei prinzipielle Werkzeugkonzepte zu unterscheiden:

- Eine fest montierte und eine bewegliche Elektrode
- Zwei bewegliche Elektroden mit zentrischem Spannen der Bauteile

Unter Beachtung der Anforderungen der geringen Investitionskosten bei ausreichend genauer Positionierung wird das Konzept mit einer festen und einer beweglichen Elektrode eingesetzt.

Zur Prozessüberwachung werden physikalische Kenngrößen ermittelt, die einen Rückschluss auf die erreichbare Scherzugfestigkeit der Fugestelle ermöglichen. Dies sind die vorhandenen Prozessparameter ergänzt um eine zusätzliche Temperaturmessung. Die Lösungsalternativen sind in Abbildung 4.4-1 zusammengefasst und bewertend gegenübergestellt.

Legende: voll erfüllt mittel nicht erfüllt Mindestanforderung	Anpresskraft	Schweißstrom	Ladung	Spannung	Übergangswiderstand	Temperatur
Prinzipbild						
Hohe Produktflexibilität						
Hohe Funktionssicherheit						
Geringe Taktzeit / Prozesszeit						
Integration in ein Teilsystem						
p: Systemdruck Q: Ladung Messgerät	I: Schweißstrom R: Übergangswiderstand Zeitaufnahme	U: Spannungsabfall T: Temperaturmessung Elektrode				

Abbildung 4.4-1: Lösungsalternativen zur Überwachung des Fügeprozesses

Mit Ausnahme der Temperaturmessung sind alle Lösungsalternativen in das Teilsystem zu integrieren. Alle weiteren Kenngrößen lassen sich in der Schweißanlage aufnehmen oder werden bereits durch den Maschinenhersteller

aufgenommen. Aus den zum Teil voneinander abhängigen Größen eignen sich für eine Überwachung besonders die Elektrodenanpresskraft sowie die elektrische Ladung. Während die Elektrodenanpresskräfte sich durch die Messung des Druckes im pneumatischen System genügend genau ermitteln lassen, wird die jeweilige Ladung aus der Messung des Schweißstromes und der Schweißzeit errechnet. Diese drei Größen sind im Verlauf der Schweißung aufzunehmen und auszuwerten. Schweißstrom und Anpresskraft werden dabei im Prozess durch eine Regelung konstant gehalten. Hierzu ist ein Vergleich der Ist-Messgröße mit den aus der Oberflächenanalyse abgeleiteten Sollwerten notwendig.

4.5 Integration in ein Gesamtsystem

Das Gesamtsystem wird durch die Handhabung und Positionierung der Werkstücke, die Oberflächenbeurteilung und die Fügeinheit aufgebaut. Für die Handhabung und Positionierung der Werkstücke wird, wie in den vorangehenden Kapiteln dargestellt, für den folienisolierten Flachleiter ein Industrieroboter mit Sauggreifer und für das Trägerteil ein Magazin eingesetzt. In der Oberflächenbeurteilung ist durch die Ermittlung des Übergangswiderstands der den Schweißprozess beeinflussende Verschmutzungsgrad reproduzierbar zu ermitteln. Die Fügeinheit übernimmt die Fixierung und das ordnungsgemäße Fügen der beiden Fügepartner, wozu das ortsfeste Werkzeug eingesetzt wird. Darüber hinaus kann durch das zur Fügeinheit gehörende Steuerungselement die Stromstärke im Sekundärkreislauf aufgenommen und durch Regelung konstant gehalten werden. Die Zeit sowie der pneumatische Systemdruck zur Bestimmung der Elektrodenanpresskraft sind Stellgrößen und verändern sich bei geeigneter Auslegung der Anlage während des Prozesses nicht.

5 Experimentelle Untersuchungen des Einflusses der Oberflächenkontamination auf den Übergangswiderstand und die mechanischen Kontakteigenschaften

Im folgenden Kapitel sind notwendige Untersuchungen zur Ermittlung des Einflusses der Oberflächenkontamination auf den Widerstandpunktschweißprozess und die erzeugte Fügestelle dargestellt. Die hier ermittelten Ergebnisse dienen zum einen einem grundlegenden Verständnis der Abhängigkeit der Scherzugfestigkeit der Kontaktstelle von den Eingangsgrößen und Prozessparametern und zum anderen zur späteren Verifikation des Verfahrens zur Ermittlung der optimalen Prozessparameter. Im ersten Teilkapitel werden deshalb die Scherzugfestigkeiten der Kontaktstellen den Eingangsgrößen und Prozessparametern gegenübergestellt. Danach werden die für die Wärmeentstehung im Schweißprozess verantwortlichen Übergangswiderstände in Abhängigkeit von den Prozessparametern und Eingangsgrößen ermittelt und abschließend die Fügestelle in den geometrischen Eigenschaften und den Änderungen in den Werkstoffeigenschaften betrachtet. Im Rahmen der Untersuchungen werden folgende Versuche durchgeführt.

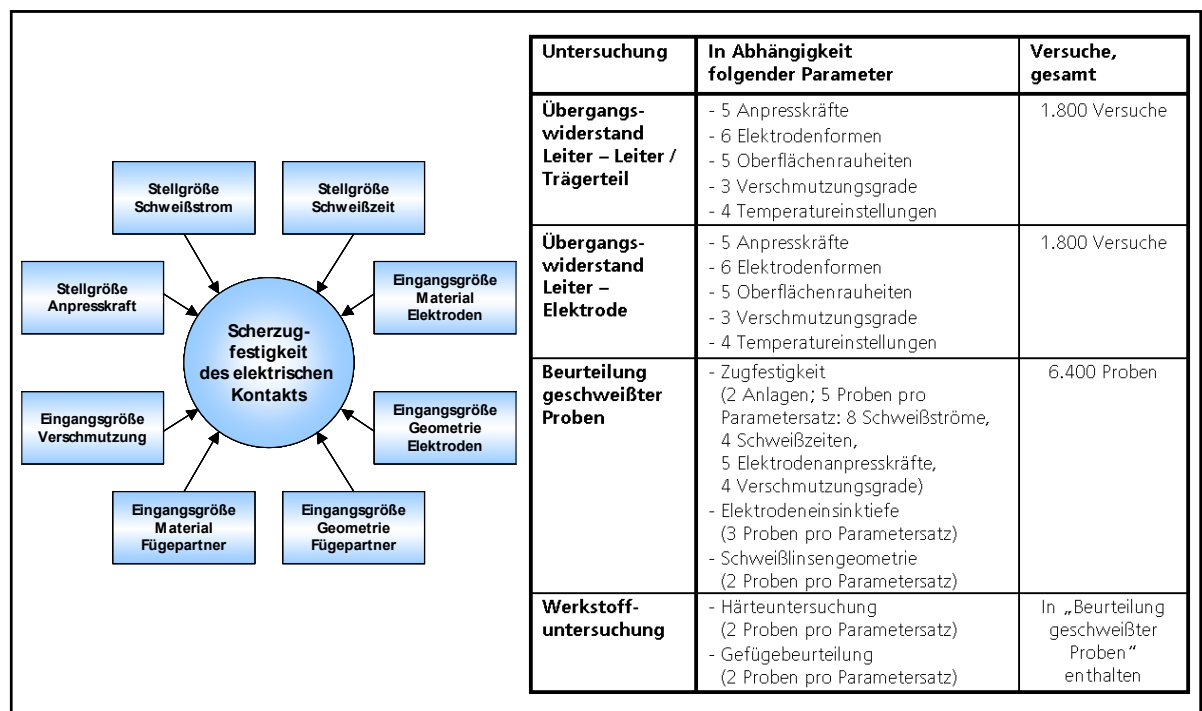


Abbildung 5-1: Versuche zur Ermittlung des Einflusses der Oberflächenkontamination auf die Scherzugfestigkeit der Kontaktstelle

Durch die erstmalige Betrachtung dieses Sachverhalts an Fügstellen folienisolierter Flachleiter konnte nicht auf bestehendes Datenmaterial zurückgegriffen werden. Die hieraus fehlende Kenntnis über die funktionalen Zusammenhänge zwischen der

Änderung der Parameter und den Scherzugfestigkeiten der Kontakte verhindert die Anwendung der Methode des Design of Experiments (DoE) um den Umfang des Versuchsprogramms zu reduzieren.

5.1 Untersuchung der Scherzugfestigkeiten der Fügestelle bei variierenden Prozessparametern und Eingangsgrößen

Die komplexen physikalischen Zusammenhänge im Widerstandspunkt-schweißprozess verhindern eine genaue funktionsanalytische Beschreibung der Prozessparameter und deren Einfluss auf das Schweißergebnis. Zur Ermittlung des Einflusses der Prozessparameter auf das Schweißergebnis werden daher Versuchsreihen durchgeführt.

Wie sich in vorangehenden Untersuchungen herausgestellt hat, ist der Querschnitt der Fügestelle auch bei starker Kontamination der Fügstellenoberfläche um ein Vielfaches größer als der Leiterquerschnitt. Dies hat zur Folge, dass elektrische Prüfungen wie Übergangswiderstand und Stromtragfähigkeit keine eindeutige Aussage zum Schweißergebnis erlauben.

In der Analyse der möglichen Hauptschädigungsrisiken bei elektrischen Kontaktierungen hat sich eine Scherzugbelastung als wahrscheinlich herausgestellt und wird deshalb zur Beurteilung des Schweißergebnisses herangezogen. Die wichtigsten Prozessparameter Anpresskraft, Schweißstrom und Schweißzeit sowie die wichtigste Eingangsgröße Oberflächenkontamination werden in den Versuchsreihen variiert.

Die folienisolierten Flachleiter und die Trägerteile werden mit einer Mikro-Schweißanlage des Typs MSM 12/1 der Firma Strunk durchgeführt. Die notwendige Anpresskraft wird über eine pneumatisch betriebene Schweißzange aufgebracht. Der Schweißstrom im Sekundärkreis wird mit der Netzfrequenz von 50 Hz und einem maximalen Betriebsstrom von 6,7 kA aufgebracht. Die Schweißzeit ist innerhalb der 50 Hz in 20 ms-Schritten wählbar. Die verwendete Schweißzange mit Trägerteil-zuführung ist in Abbildung 5.1-1 dargestellt.

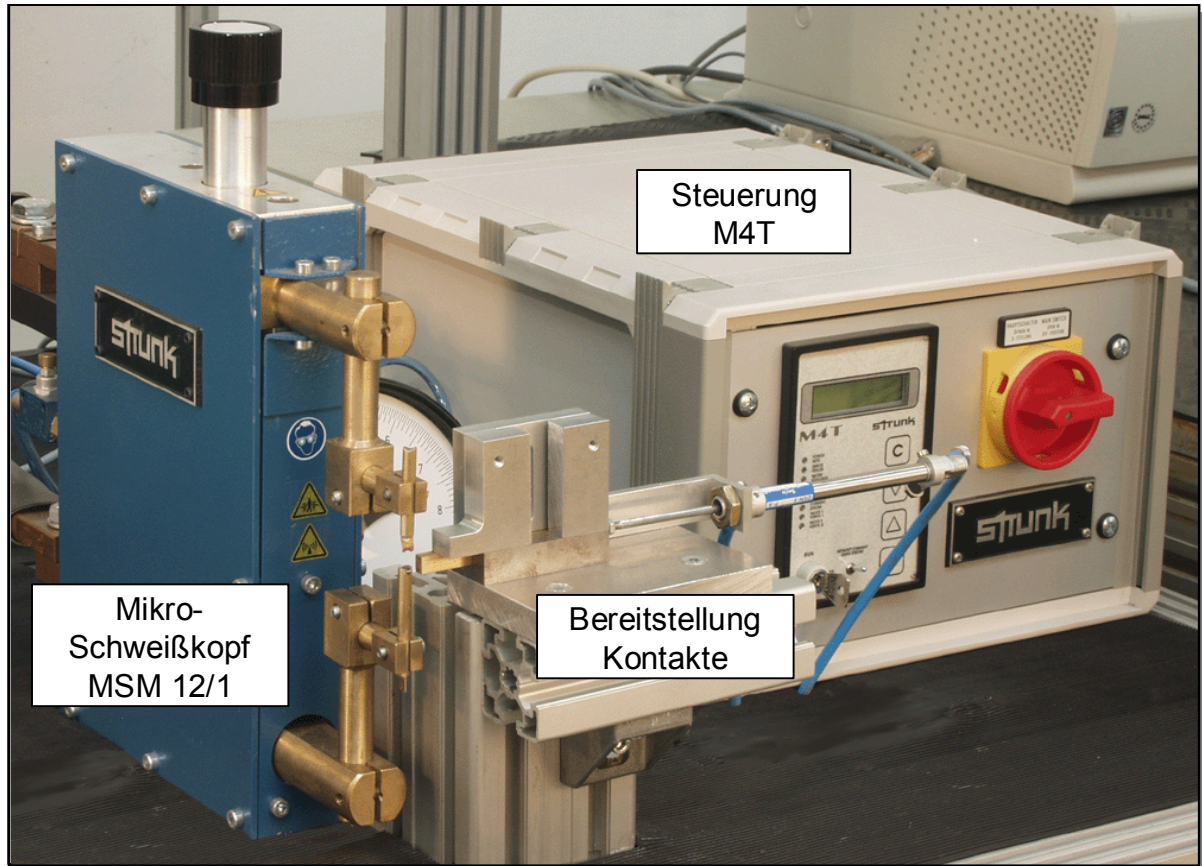


Abbildung 5.1-1: Schweißanlage

Alternativ dazu wurden Proben mit dem Servomotorischen Mikroschweißkopf LM3 und einem Schweißstrom mit einer Frequenz von 1.000 Hz durchgeführt.

Der Verschmutzungsgrad der kontaminierten Fügeflächen wird mit VGx definiert, wobei x der mittleren Restverschmutzung in μm entspricht. Der Einfluss der Verschmutzung auf das Schweißergebnis wird mittels der Verschmutzungsgrade VG0 für reine Proben sowie VG1 und VG2 für 1 μm bzw. 2 μm mittlere Verschmutzungsdicke untersucht.

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Scherzugfestigkeit bei variierenden Parametern Schweißzeit und Schweißstrom bei unterschiedlichen Verschmutzungsgraden dargestellt.

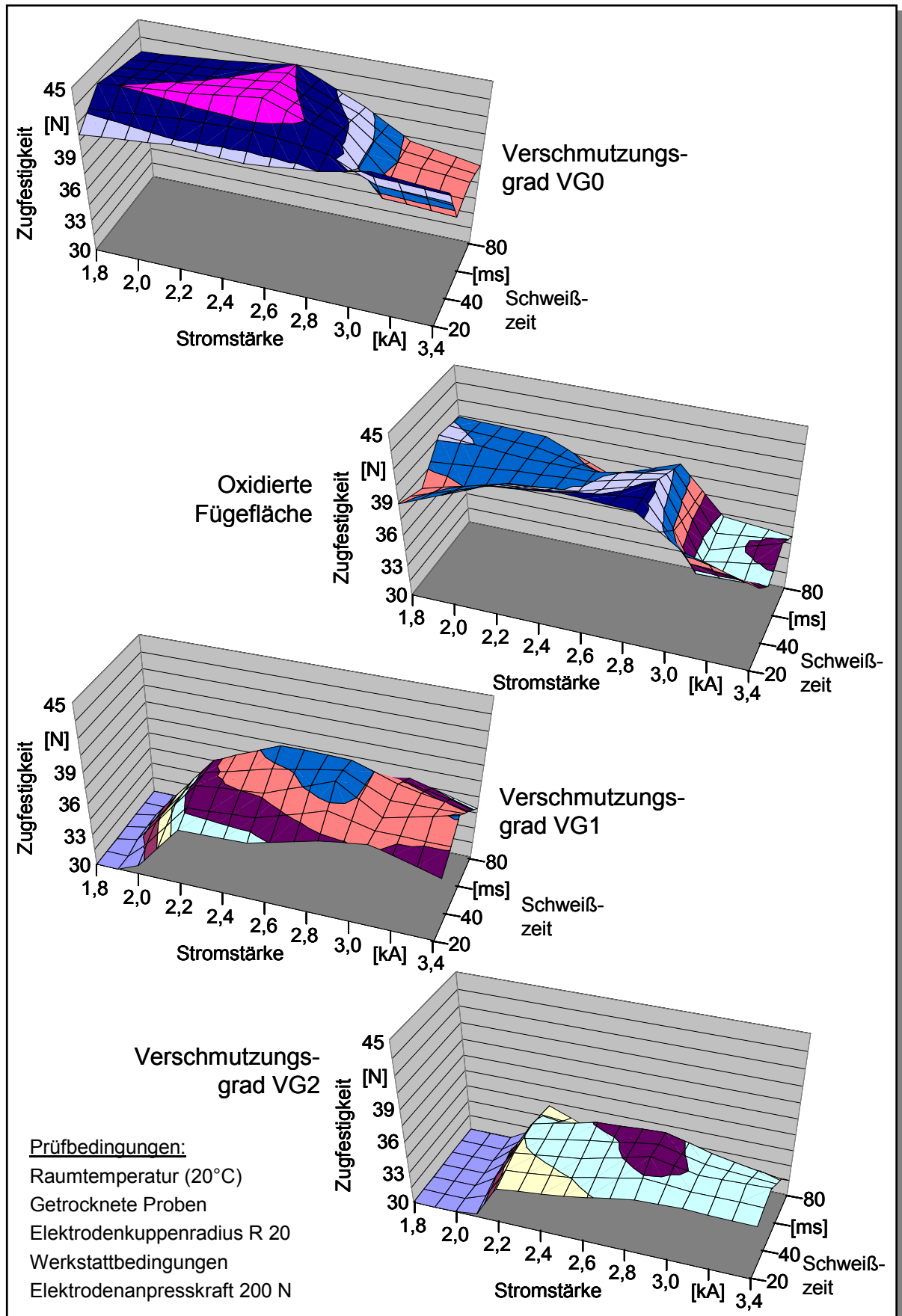


Abbildung 5.1-2: Scherzugfestigkeit der Proben bei variierenden Prozessparametern und Eingangsgrößen

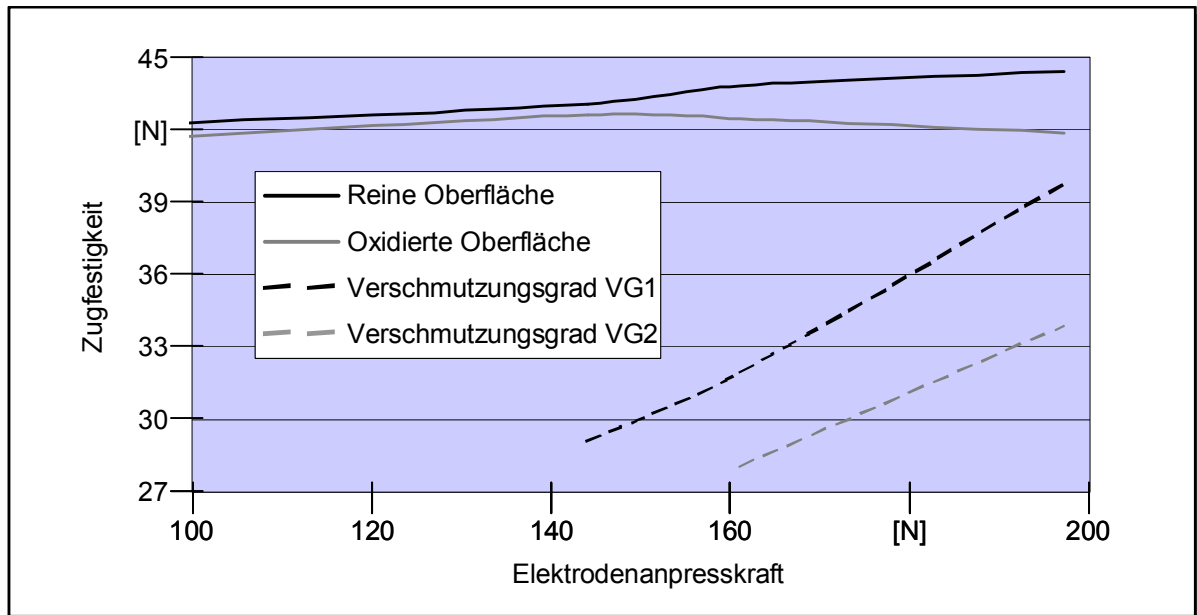


Abbildung 5.1-3: Scherzugfestigkeit der Proben bei variierender Elektrodenanpresskraft (Bedingungen: siehe Abbildung 5.1-1)

Um die maximal mögliche Scherzugfestigkeit zu erreichen hat sich in den Untersuchungen herausgestellt, dass bei steigender Oberflächenkontamination eine Anpassung zu höheren Schweißströmen und längeren Schweißzeiten notwendig ist. Die hohe eingebrachte Leistung erzeugt durch eine schnelle Bildung einer plastifizierten Phase des Kupfers einen schnellen Zusammenbruch des anfangs hohen Übergangswiderstands. Bei starken Verschmutzungen ist zusätzlich eine Anpassung der Elektrodenanpresskraft notwendig. Die hohe Elektrodenanpresskraft sorgt für einen definierten Übergangswiderstand und somit für einen definierten Stromfluss. Bei zu geringen Elektrodenanpresskräften kann sich eine Isolation ausbilden, die nur durch einen undefiniert ablaufenden Stromdurchschlag überwunden werden kann.

5.2 Untersuchung der Einflussfaktoren auf den Übergangswiderstand

Der Übergangswiderstand ist verantwortlich für die Wärmeentstehung in der Fugestelle. Durch die starke Beeinflussung des Berechnungsergebnisses durch den Übergangswiderstand wird dieser in Abhängigkeit der folgenden, einflussnehmenden Kriterien näher untersucht:

- Anpresskraft,
- Elektrodenform,
- Oberflächeneigenschaften und
- Temperatur.

Zur Messung wird die Vier-Punkt-Messung nach /DIN-02/ mit nachfolgend dargestellten Messaufbau durchgeführt.

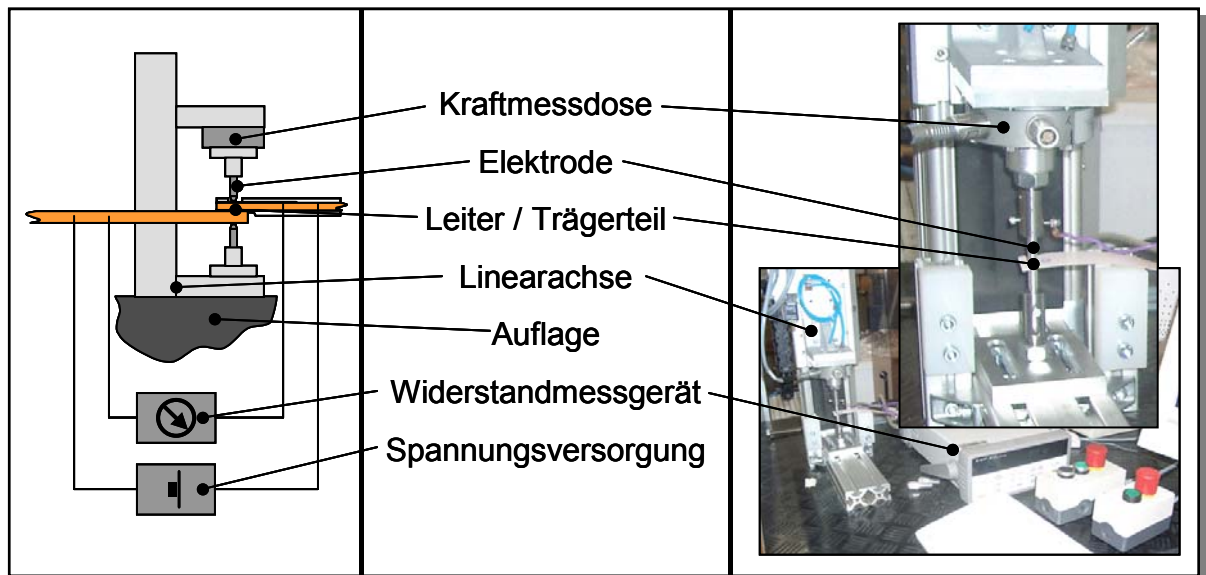


Abbildung 5.2-1: Messaufbau Übergangswiderstand

Im Aufbau ist eine Elektrode fest mit dem beweglichen Schlitten und der Kraftmessdose K3MK der Firma Gassmann Theiss Messtechnik an der elektrischen Lineareinheit DGEL-63-300-SP-KF-GK der Firma Festo befestigt. Die gegenüberliegende Elektrode ist mittels einer Fixierung an der Aufnahme der Lineareinheit fixiert. Die Aufbereitung der aufgenommenen Daten erfolgt über das Datenaufnahmegerät 34970 A der Firma Agilent und den 16-Kanal-Multiplexer 34902 A der Firma hp. Die anschließende Verarbeitung wird im Datenverarbeitungsprogramm Catman® durchgeführt.

Der innere Widerstand des Messgerätes sowie der Widerstand der Zuleitungen kann durch eine separate Messung ermittelt werden. Die Festkörperwiderstände von Leiter

und Leiter / Trägerteil sind anhand der Werkstoffkennwerte der Herstellerangabe berechnet und berücksichtigt worden, so dass der Übergangswiderstand aus der Messstrecke separiert werden kann.

Zur Messung des Übergangswiderstands bei variierenden Elektrodengeometrien, werden Elektroden mit unterschiedlichen Radien und Durchmessern gefertigt. Üblicherweise werden für kleine Kontakte ebene Elektroden oder am Kopf gerundete Elektroden verwendet. In Anlehnung an die gängigen Elektroden werden ebene Kopfformen mit Durchmessern von 1 mm und 1,5 mm angefertigt. Weiterhin wird die Ausbildung des Übergangswiderstands mit Kopfradien von 10 mm, 20 mm, 30 mm und 40 mm überprüft.

Zur Bestimmung der Temperaturabhängigkeit des Übergangswiderstands wird der Kontaktbereich mittels eines stufenlos einstellbaren Heißluftgebläses im kontaktierten Zustand erwärmt. Über mehrere applizierte Thermoelemente an nicht direkt bestrahlten Positionen kann die Temperatur und die gleichmäßige Erwärmung des Aufbaus sichergestellt werden.

Nachfolgend werden an diesem Versuchsaufbau die Übergangswiderstände zwischen den beiden Fügepartnern, die Übergangswiderstände zwischen Elektrode und Fügepartner sowie der Einfluss des Abisolierverfahrens auf den Übergangswiderstand ermittelt.

5.2.1 Ermittlung des Übergangswiderstands zwischen Leiter und Leiter / Trägerteil

Der Übergangswiderstand zwischen Leiter und Leiter / Trägerteil bestimmt die Wärmeerzeugung in der späteren Fügestelle und hat somit entscheidenden Einfluss auf die Scherzugfestigkeit. Die ermittelten Ergebnisse in Abbildung 5.2.1-1 stellen die Abhängigkeit des Übergangswiderstands von der Anpresskraft, dem Verschmutzungsgrad und der Temperatur dar. Es ist ein stetiger Anstieg des Übergangswiderstands mit steigender Temperatur durch die Erhöhung der Stoffwiderstände der Fügepartner zu verzeichnen. Mit steigender Anpresskraft konvergiert der Übergangswiderstand gegen einen Grenzwert, der dem idealen Übergangswiderstand $\rho_{\dot{U}} = \frac{1}{2} (\rho_I + \rho_{II})$ entspricht. Ebenfalls steigt der Übergangswiderstand erwartungsgemäß mit zunehmender Oberflächenkontamination der Fügefläche mit Klebstoff bzw. Isolationsmaterial, wie im Vergleich der drei Diagramme ersichtlich wird.

Darüber hinaus hat die Elektrodengeometrie einen Einfluss auf den Übergangswiderstand, der durch Versuche mit unterschiedlichen Kontaktbeziehungsweise Elektrodengeometrien ermittelt wird. Der Einfluss unterschiedlicher Elektrodengeometrien und Fügstellenkontaminationen folgt aus Abbildung 5.2.1-2.

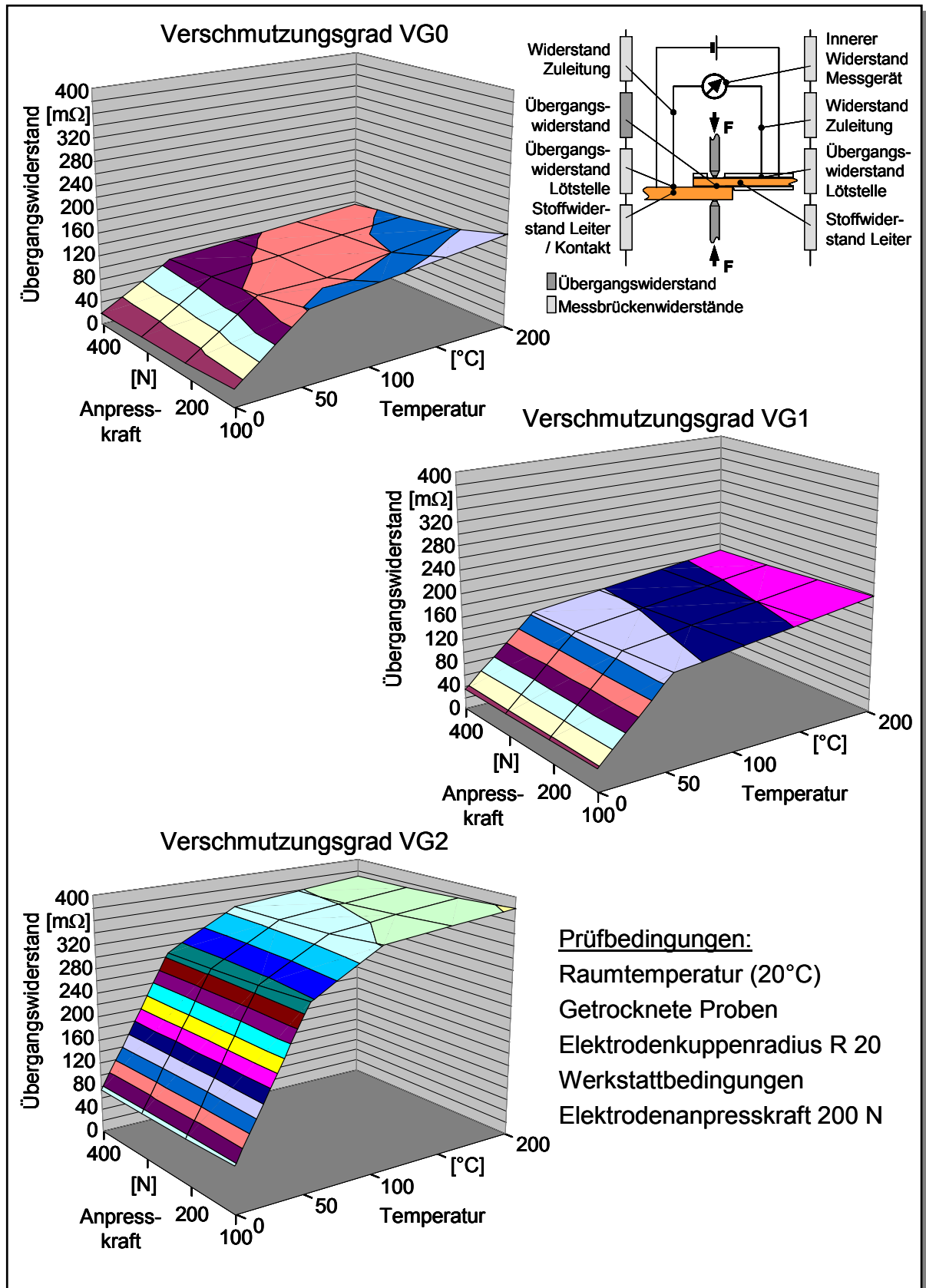


Abbildung 5.2.1-1: Abhängigkeit Übergangswiderstand Leiter – Leiter / Trägereil von Temperatur, Verschmutzung und Anpresskraft

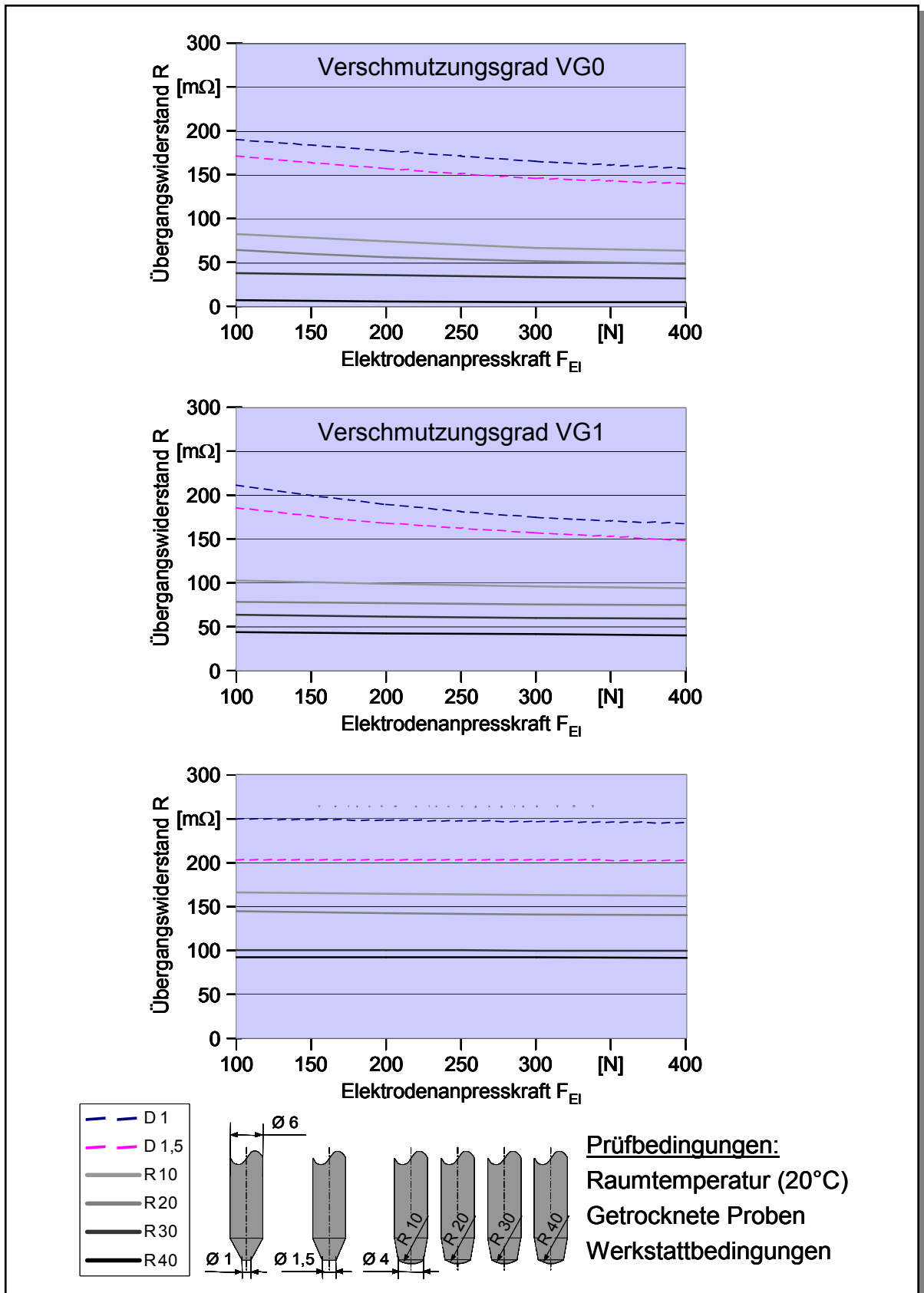


Abbildung 5.2.1-2: Abhängigkeit Übergangswiderstand Leiter – Leiter / Trägerteil bei unterschiedlichen Elektrodengeometrien

Den Diagrammen ist zu entnehmen, dass der Übergangswiderstand mit geringerer Anpressfläche steigt. Dagegen fällt der Übergangswiderstand mit steigendem Elektrodenradius, da hierdurch die Anpressfläche vergrößert wird. Weiterhin ist generell ein steigender Übergangswiderstand mit steigendem Verschmutzungsgrad festzustellen, was auf die verringerte elektrische Leitfähigkeit der Fügefläche zurückzuführen ist.

5.2.2 Ermittlung des Übergangswiderstands zwischen Elektrode und Leiter / Trägerteil

Analog zur experimentellen Untersuchung des Übergangswiderstands zwischen Leiter und Leiter / Trägerteil, ist der Übergangswiderstand zwischen Elektrode und Leiter / Trägerteil zu ermitteln. Dieser erzeugt eine Verlustleistung in den Übergangsstellen, die in die spätere Berechnung einfließen muss. Am Messaufbau ist gegenüber der vorherigen Messung die Zuleitung anstatt an einem Leiter direkt an einer Elektrode mittels einer lösbaren Befestigung fixiert.

Nachfolgend stellen die ermittelten Ergebnisse aus Abbildung 5.2.2-1 die Abhängigkeit des Übergangswiderstands von der Anpresskraft, dem Verschmutzungsgrad und der Temperatur dar. Die Ergebnisse verlaufen qualitativ analog zur Messung des Übergangswiderstands zwischen Leiter und Leiter / Trägerteil. Die quantitativen Werte werden später zur Validierung der Berechnungsergebnisse herangezogen.

Vergleichend zur Messung des Übergangswiderstandes zwischen Leiter und Leiter / Trägerteil treten die gleichen physikalischen Wirkprinzipien bei unterschiedlichen Elektrodengeometrien auf.

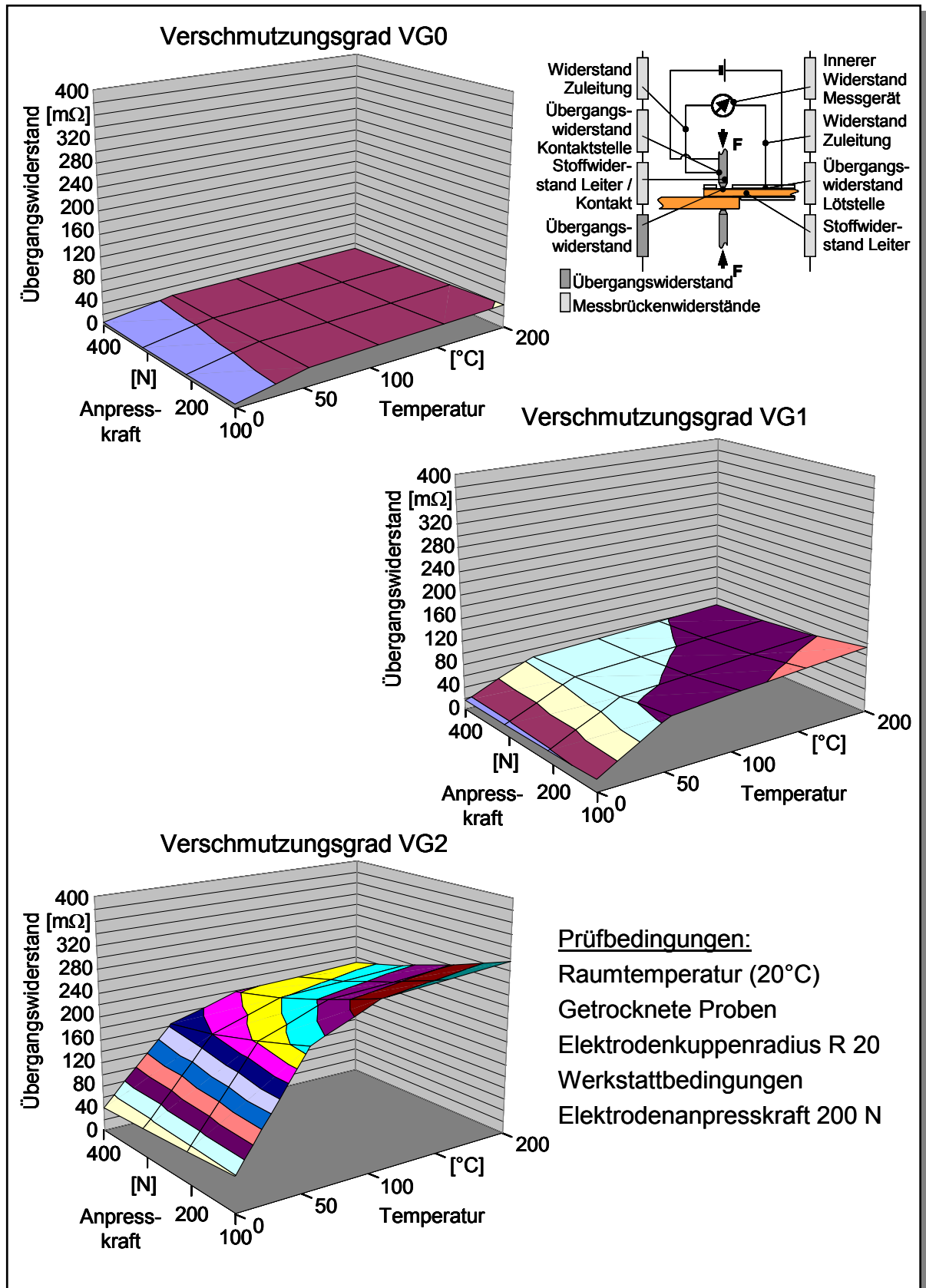


Abbildung 5.2.2-1: Abhängigkeit Übergangswiderstand von Elektrode – Leiter / Trägerteil Temperatur, Verschmutzung und Anpresskraft

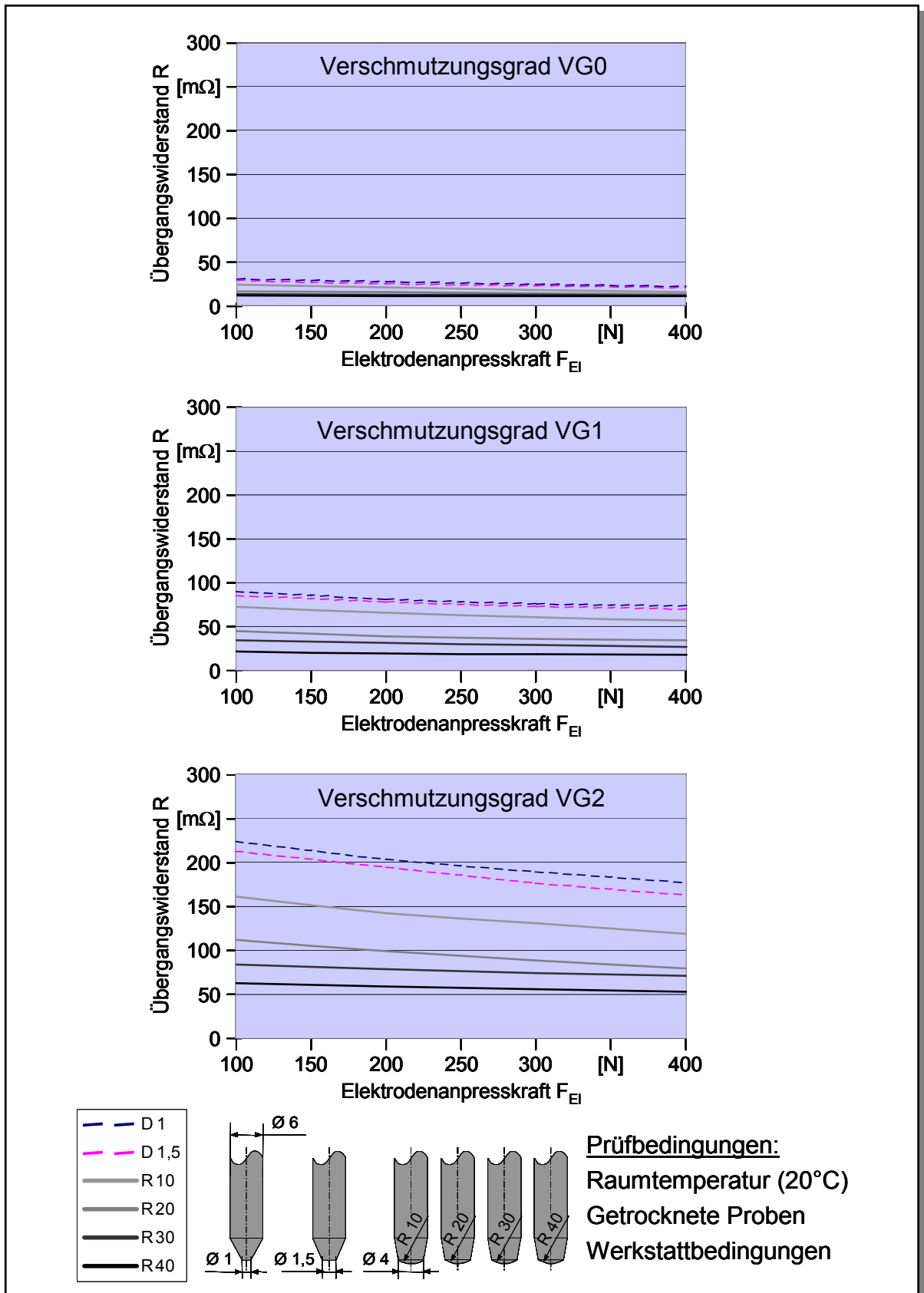


Abbildung 5.2.2-2: Abhängigkeit Übergangswiderstand von Elektrode – Leiter / Trägerteil bei unterschiedlichen Elektrodengeometrien

Analog zur Messung des Übergangswiderstands zwischen Leiter und Leiter / Trägerteil steigt im Übergang Elektrode – Leiter / Trägerteil der Übergangswiderstand mit geringerer Anpressfläche und fällt mit steigendem Elektrodenradius. Weiterhin ist generell ein steigender Übergangswiderstand mit steigendem Verschmutzungsgrad festzustellen.

5.2.3 Einfluss des Abisolierverfahrens auf den Übergangswiderstand

Neben den aufgeführten Einflüssen der Temperatur, der Anpresskraft, der Oberflächenverschmutzung und der Elektrodengeometrie, beeinflusst auch die Oberflächenrauheit den Übergangswiderstand in der Fügestelle. Das Ausgangsmaterial der gewalzten Kupferleiter weist eine gleichbleibend geringe Oberflächenrauheit auf. Um die maßgebliche Beeinflussung der Oberflächenrauheit der Fügefläche durch das eingesetzte Abisolierverfahren zu bestimmen, werden Messungen an mit unterschiedlichen Abisolierverfahren bearbeiteten folienisolierten Flachleitern gemäß /DIN-96/ durchgeführt. Die gemessenen Oberflächenrauigkeiten R_{\max} und der Einfluss der Rauigkeit auf den Übergangswiderstand sind in Abbildung 5.2.3-1 dargestellt.

Steigende Oberflächenrauheit bei geringen Anpresskräften führen danach zu einer Erhöhung des Übergangswiderstands. Eine weitere Erhöhung der Anpresskraft gleicht die Oberflächenstrukturen der beiden Fügepartner an und verringert mit steigenden Anpresskräften den Einfluss der Oberflächenrauheit.

Die ermittelten Einflüsse der untersuchten Parameter Anpresskraft, Temperatur, Elektrodenform und Oberflächenbeschaffenheit (Verschmutzungsgrad und Oberflächenrauheit) sind in der Bestimmung des Übergangswiderstands zu berücksichtigen. Der Übergangswiderstand fällt dabei mit steigender Anpresskraft und konvergiert gegen einen optimalen Übergangswiderstand zwischen den beiden Fügepartnern. Durch steigende Oberflächenrauigkeiten wird die Kurve bei geringen Anpresskräften als 500 N zu höheren Übergangswiderständen hin verschoben.

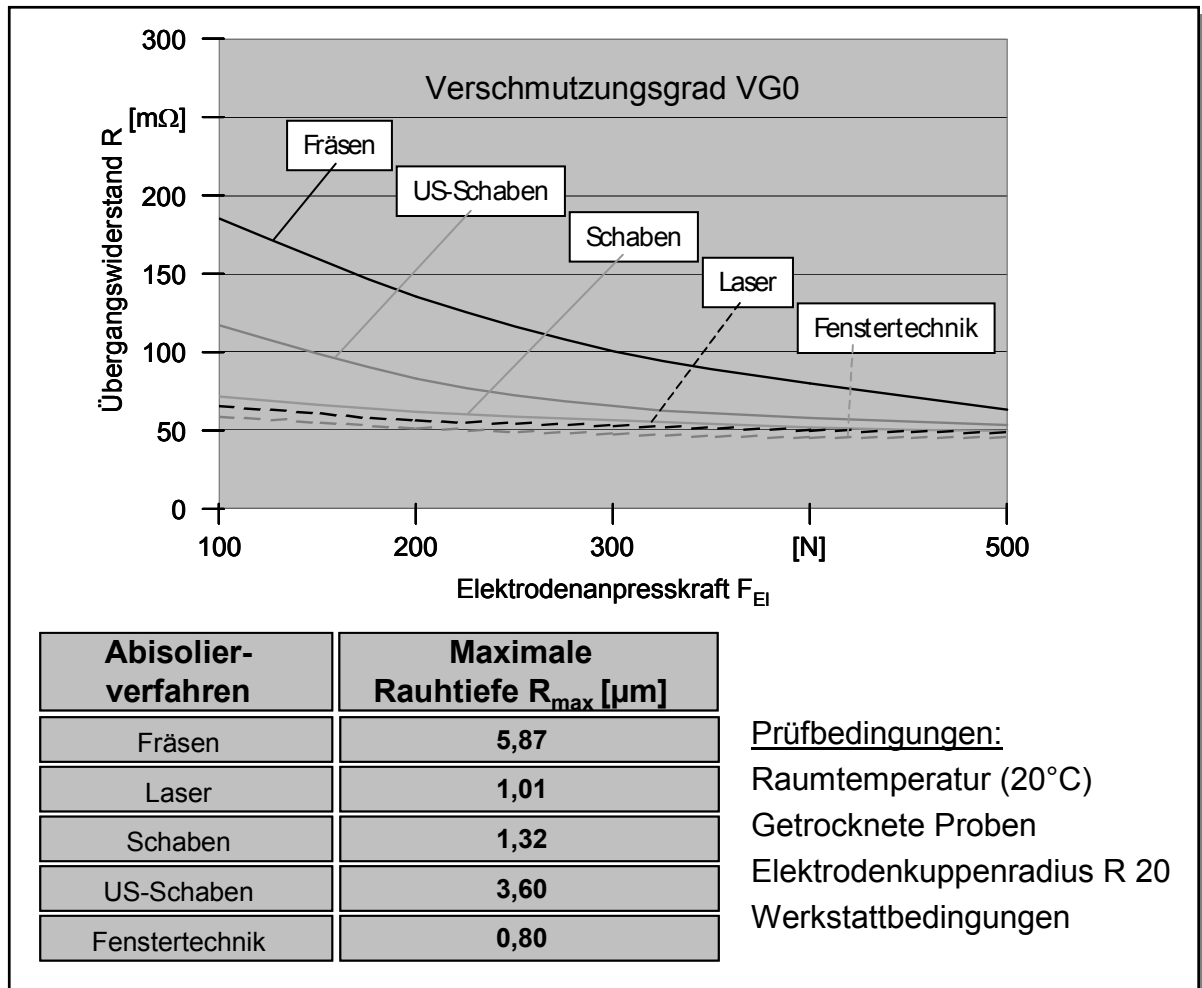


Abbildung 5.2.3-1: Einfluss der Oberflächenrauheit auf den Übergangswiderstand

5.3 Betrachtung der Schweißpunkteigenschaften

5.3.1 Vermessung des Schweißlinsendurchmessers

Einen direkten Einfluss auf die Scherzugfestigkeit der Kontaktstelle hat der an Schliffbildern vermessene Schweißlinsendurchmesser. Als Leiter wird für die nachfolgenden Versuche ein Flachleiter gemäß den Spezifikationen aus Kapitel 3.1 und ein Trägerteil gemäß Kapitel 3.2.3.1 der Legierung Wieland K14 F20 ohne Oberflächenveredelung verwendet.

Um reproduzierbare Eingangsbedingungen zu gewährleisten, werden die Fügeoberflächen gereinigt und anschließend definiert mit Klebstoff mit den Verschmutzungsgraden VG1 und VG2 kontaminiert. Die Vermessung des Linsendurchmessers der kontaktierten Proben erfolgt im Schliffbild längs der Leiterbeziehungsweise Fügeachse. Nachfolgend sind ausgewählte Schliffbilder dargestellt.

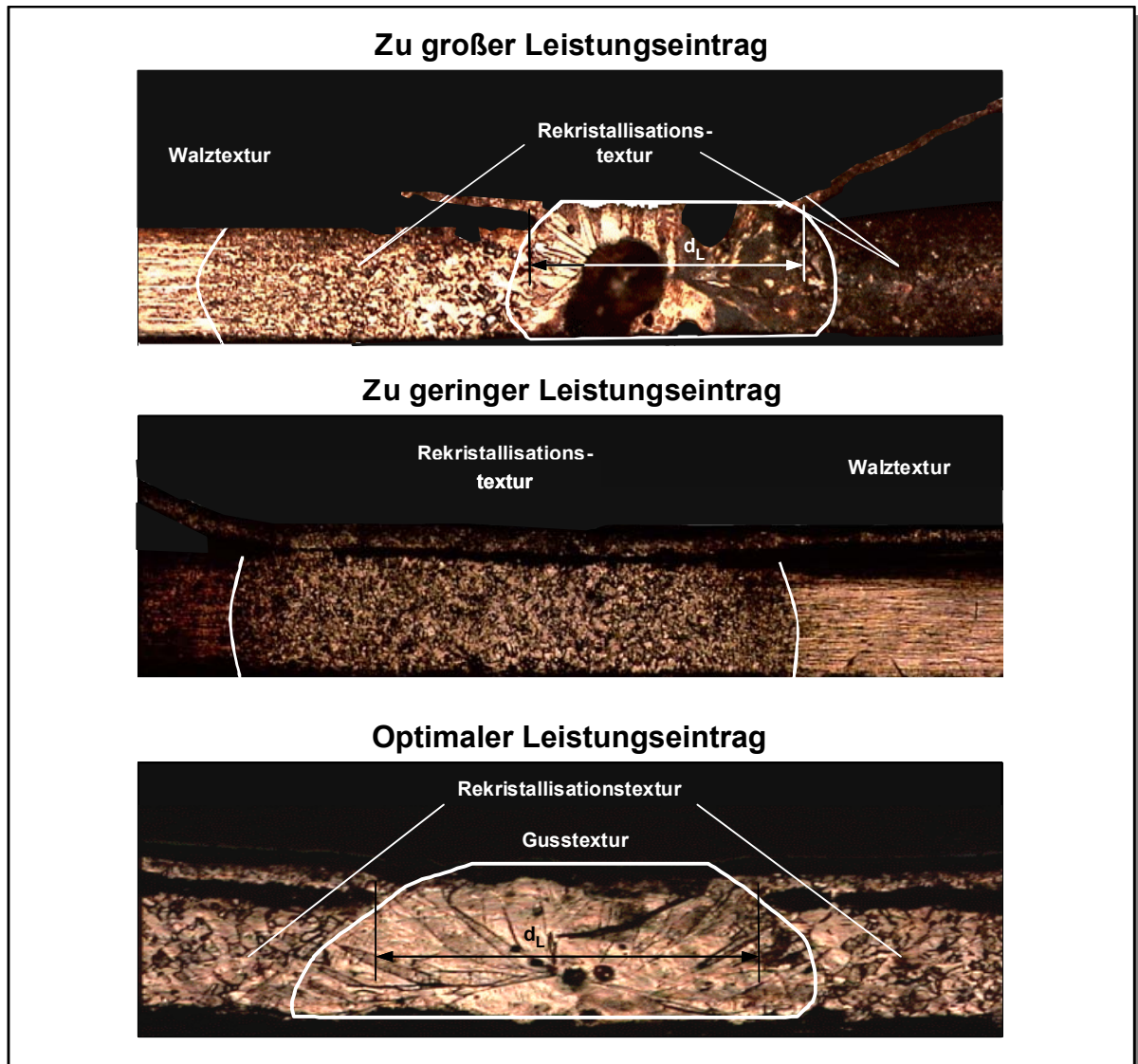


Abbildung 5.3.1-1: Vermessung Linsendurchmesser

Im Schlibbild der Fügestelle mit zu großem Leistungseintrag ist deutlich eine Fehlstelle zu erkennen, die auf ausgetriebenes Material durch Spritzer zurückzuführen ist. Durch das fehlende Material stellt sich eine unregelmäßige Geometrie in der Fügestelle ein, die zu einem Festigkeitsverlust führt. Der zu geringe Leistungseintrag zeigt im Schlibbild keine Gusstextur und hat nicht zur Bildung der notwendigen flüssigen Phase in der Fügestelle geführt. Diese Fügstellen sind „geklebt“ und weisen keine hohe Festigkeit auf. Bei optimalem Leistungseintrag ist eine gut ausgebildete Schweißlinse bei gleichzeitig geringfügiger Veränderung der Ausgangsgeometrie zu erkennen.

Der Linsendurchmesser hat in der späteren Scherzuguntersuchung einen entscheidenden Einfluss auf das Versagensbild. Bei zu geringem Durchmesser tritt das Versagen überwiegend in der Fügeebene auf, während ab einem bestimmten Durchmesser die an der Linse anschließende Randzone oder der Leiterquerschnitt

geschädigt wird. Die auftretenden Versagensbilder im Scherzugversuch in Abhängigkeit von der eingetragenen Leistung bzw. der ausgebildeten Schweißlinse sind in Abbildung 5.3.1-2 dargestellt.

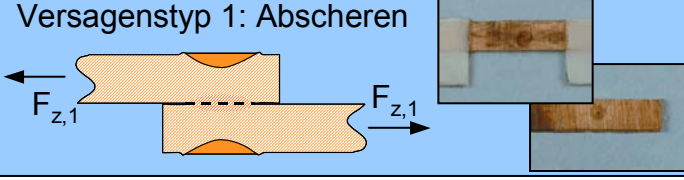
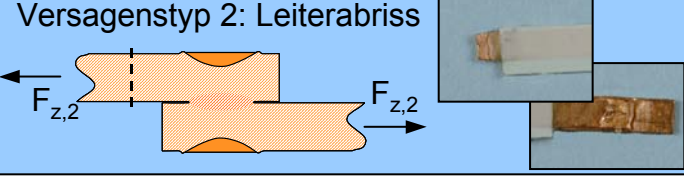
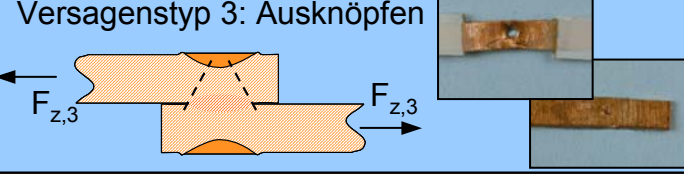
Versagensbild	Ursache
<p>Versagenstyp 1: Abscheren</p> 	<p><u>Parametereinstellung:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Zu geringer Energieeintrag - Zu geringe Anpresskraft
<p>Versagenstyp 2: Leiterabriss</p> 	<p><u>Parametereinstellung:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Optimaler Energieeintrag - Optimale Anpresskraft
<p>Versagenstyp 3: Ausknöpfen</p> 	<p><u>Parametereinstellung:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Zu hoher Energieeintrag - Zu hoher Anpresskraft

Abbildung 5.3.1-2: Versagensbilder

Anhand der ermittelten Hauptschadensbilder wird in Kapitel 6 die Festigkeitsberechnung der Fügestelle vorgenommen

5.3.2 Ermittlung der Elektrodeneinsinktiefe

Das Einsinkverhalten der Elektroden im Prozess kann über die Restdicken der erstellten Proben im Schweißlinsenzentrum ermittelt werden. Bei einer geringen Einsinktiefe der Elektroden bei gleichzeitig ausreichendem Schweißlinsendurchmesser ist eine optimale Fügestelle geschaffen. Eine Schädigung im Scherzugversuch tritt dann üblicherweise im Leiterquerschnitt auf. Bei zu hohem Energieeintrag erhöht sich die Einsinktiefe, und die Randzone der Schweißlinse wird geschwächt. Als Schadensbild tritt das so genannte Ausknöpfen auf.

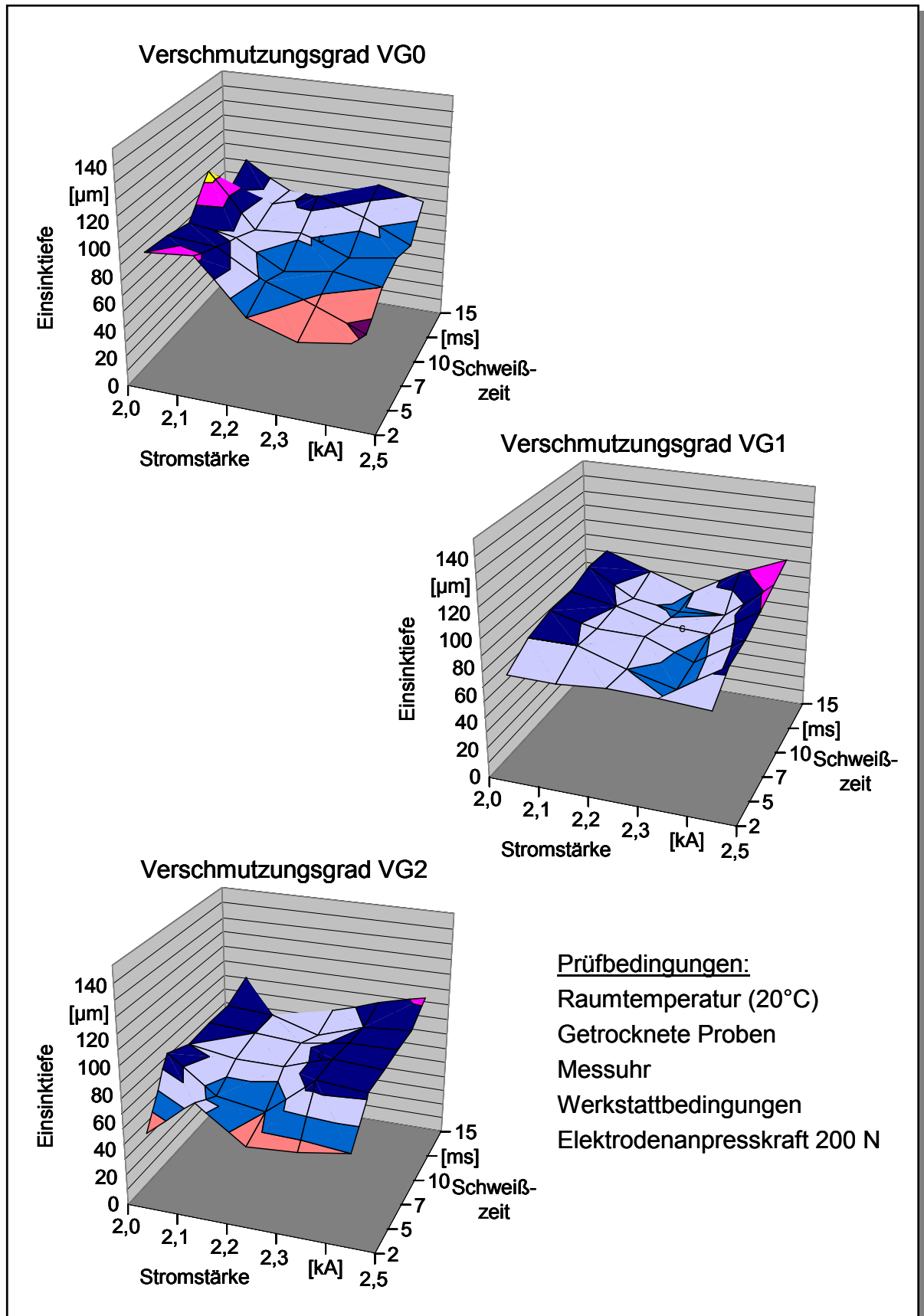


Abbildung 5.3.2-1: Einsinkverhalten der Elektroden in Abhängigkeit der Prozessparameter Stromstärke und Schweißzeit sowie der Eingangsgröße Verschmutzungsgrad

Dem Diagramm ist die Summe der gesamten Einsinkttiefen beider Elektroden in Abhängigkeit der Prozessparameter zu entnehmen. Generell ist eine stärkere Einsinkttiefe bei steigendem Schweißstrom, steigender Schweißzeit und / oder steigender Elektrodenanpresskraft festzustellen. Zu hohe Einsinkttiefen bzw. abweichende Messergebnisse sind nach Prüfung der Fügstellen auf ein Anlegieren der Elektroden und nachfolgendes Ausreißen von Material aus dem Schweißgut zurückzuführen.

5.3.3 Bestimmung der Werkstoffhärte und des Härteverlaufs

Neben der Schweißgutbetrachtung, den Eingangsgrößen in den Prozess, der Prozessbetrachtung und den makroskopischen geometrischen Größen wie Schweißlinsendurchmesser und Elektrodeneinsinkttiefe, nehmen mikroskopische Größen Einfluss auf die Festigkeit der Fügstelle. Hier ist die Materialhärte zu nennen, die sowohl einen Rückschluss auf die möglichen Vorbehandlungen wie das Walzen erlaubt, aber auch eine Beurteilungsgröße der Temperaturbelastung im Schweißprozess darstellt. Die Werkstoffhärte als Beurteilungsgröße wird über Härteuntersuchungen entsprechend der nachfolgenden Abbildung im Schliff durchgeführt.

Die Vickershärteuntersuchung erfolgt am Gerät Micro Testing Hardness 4 (MTH4) gemäß /DIN-04-1/. Eine typische Härteverteilung zeigt Abbildung 5.3.3-1.

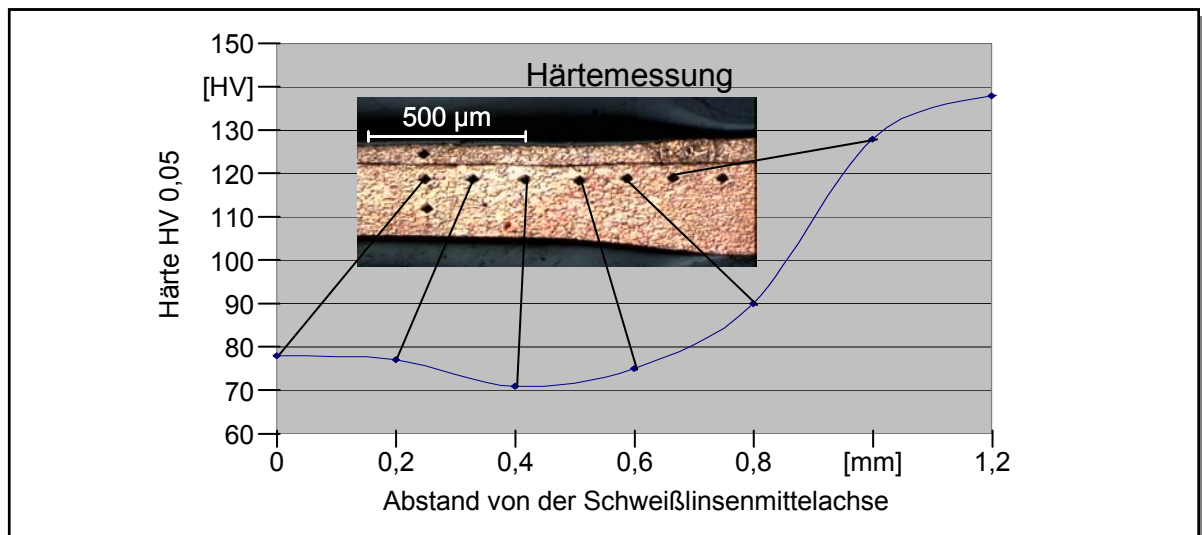


Abbildung 5.3.3-1: Härteverlauf

5.4 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Mit den durchgeführten Versuchen konnte die starke Abhängigkeit der Scherzugfestigkeit der Kontaktstelle von der Oberflächenverschmutzung, der Oberflächenrauheit der beiden Fügepartner und den variierenden Prozessparametern Schweißstrom, Schweißzeit und Anpresskraft sowie der Stellgröße Elektrodenform nachgewiesen werden. Darüber hinaus ist durch die Ermittlung des Übergangswiderstands in Abhängigkeit von der sich im Prozess ändernden Temperatur die notwendige Datenbasis zur Berechnung des Schweißprozesses vorgenommen worden. Im Einzelnen wurden folgende Ergebnisse aus den Versuchen abgeleitet:

- Stark steigende Übergangswiderstände bei steigender Temperatur (Messung bis 200°C).
- Verstärkung der temperaturabhängigen Widerstandserhöhung durch steigende Oberflächenkontamination.
- Verringerung des Übergangswiderstands durch Wahl einer Elektrodenform mit großer Anpressfläche.
- Steigender Übergangswiderstand mit steigender Oberflächenrauigkeit bei geringen Anpresskräften.
- Kein nennenswerter Einfluss der variierenden Prozessparameter auf die elektrischen Kontakteigenschaften.
- Abhängigkeit der Scherzugfestigkeit von Prozessparametern und Eingangsgrößen mit Ausbildung eines definierten, optimalen Parametersatzes. Bei Abweichungen von der Einstellung sind fallende Scherzugfestigkeiten festzustellen.
- Schweißlinsendurchmesser und Elektrodeneinsinktiefen nehmen entscheidenden Einfluss auf das Schadensbild im Scherzugversuch und die erreichbaren Scherzugfestigkeiten.

6 Entwicklung eines Verfahrens zur numerischen Berechnung der mechanischen Festigkeit einer Fügestelle von folienisolierten Flachleitern mit Oberflächenverschmutzung

Um die höchstmögliche mechanische Festigkeit der Fügestelle zu gewährleisten, sind die Prozessparameter in Abhängigkeit von den ermittelten Eingangsbedingungen Fügepartnerwerkstoffe, Fügepartnergeometrien, Oberflächenrauigkeit und Oberflächenkontamination sowie Elektrodenwerkstoff und Elektrodengeometrie anzupassen.

Die im Prozess auftretenden thermodynamischen, mechanischen und elektrischen Effekte sind durch die Temperaturabhängigkeit der Werkstoffkennwerte gekennzeichnet und unterliegen einer gegenseitigen Beeinflussung. In den folgenden Kapiteln werden die thermodynamischen, mechanischen und elektrischen Einflüsse in für das Programm LabView lösbare Subsysteme aufgeteilt und theoretisch betrachtet. Zur Validierung der Lösungen wird ein Vergleich mit Versuchsergebnissen vorgenommen.

Durch die gegenseitige Beeinflussung der Subsysteme ist in der Versuchsführung besonderer Wert auf definierte Eingangsgrößen zu legen. Dabei sind vor allem die in der Berechnung berücksichtigten Geometrien und Materialkennwerte der Fügepartner und Elektroden zu betrachten. Größen wie beispielsweise Positionsungenauigkeiten der Fügepartner, Änderung der Umgebungsbedingungen und Schwankungen im Systemdruck der Luftversorgung können durch Anlagenaufbau und –gestaltung beeinflusst werden und sind deshalb in einer Gesamtstörgröße zusammengefasst. Die Berücksichtigung der Gesamtstörgröße ist nicht Bestandteil der folgenden Betrachtung.

Die für die theoretische Betrachtung notwendigen geometrischen Daten sind folgender Abbildung 6-1 zu entnehmen.

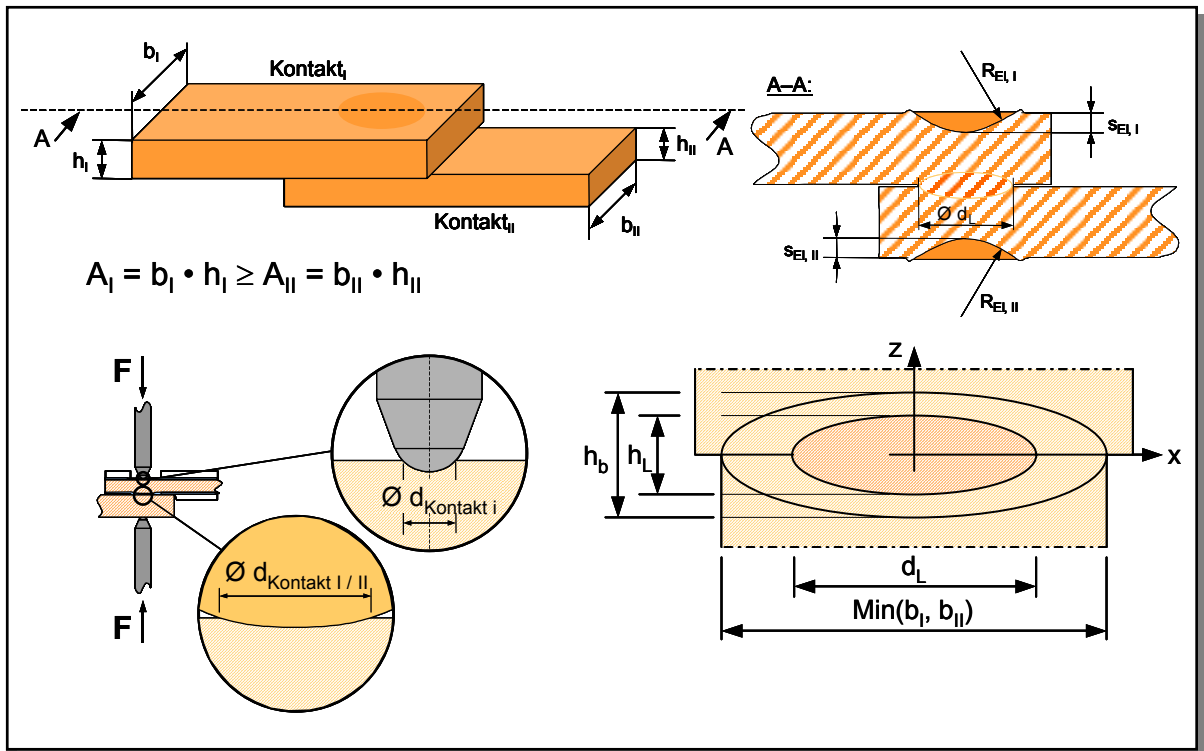


Abbildung 6-1: Definition der geometrischen Abmessungen

Weiterhin sind folgende temperaturabhängige Werkstoffkennwerte in die Betrachtung eingeflossen:

- | | |
|---|--|
| • Längendehnung α | $\alpha_I(T), \alpha_{II}(T)$ |
| • Elastizitätsmodul E | $E_I(T), E_{II}(T), E_{EI}(T)$ |
| • Wärmekapazität c_p | $c_{p,I}(T), c_{p,II}(T), c_{p,EI}(T)$ |
| • Maximale Zugfestigkeit σ | $\sigma_I(T), \sigma_{II}(T), \sigma_{EI}(T)$ |
| • Wärmeleitfähigkeit λ | $\lambda_I(T), \lambda_{II}(T), \lambda_{EI}(T)$ |
| • Spezifischer elektrischer Widerstand ρ | $\rho_I(T), \rho_{II}(T), \rho_{EI}(T)$ |

Die Indizes bedeuten:

I: Leiter 1

II: Leiter 2 bzw. Trägerteil

EI: Elektrode

Nachfolgend sind die Ergebnisse dargestellt, die Herleitung ist dem Anhang in Kapitel 11 zu entnehmen.

6.1 Berechnung der mechanischen Versagensbilder

Zur Beurteilung und Überprüfung der Kontakteigenschaften werden die in Abbildung 5.3.1-3 dargestellten Versagensbilder des Scherzugversuchs herangezogen und eingehend analysiert. Die mechanische Festigkeit der Verbindung ergibt sich aus der minimalen Scherzugfestigkeit der drei zu betrachtenden Schadensbilder:

$$F_{z,max} = \text{Min} (F_{z,1}; F_{z,2}; F_{z,3}) \quad (1)$$

Mit den Versagensbildern

- Abscheren ($F_{z,1}$),
- Leiterabriss ($F_{z,2}$) und
- Ausknöpfen ($F_{z,3}$).

6.1.1 Berechnung des Versagensbilds Abscheren

Abscheren tritt durch eine Trennung beider Fügepartner in der Fügezone bei ungenügend ausgebildeter Schweißlinse auf. Die Belastung der Fügezone ist gemäß Abbildung 6.1.1-1 eine kombinierte Scher- und Zugbelastung.

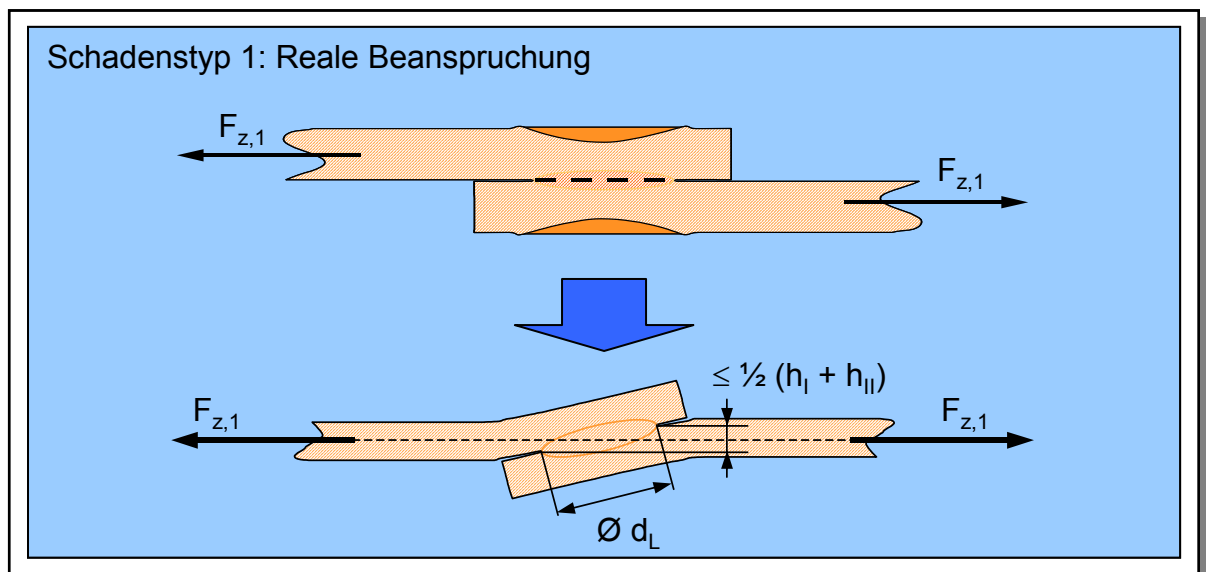


Abbildung 6.1.1-1: Modellannahme

Da die Leiterbahnhöhen im Vergleich zur Schweißlinse klein sind, kann eine geringfügige Auslenkung von

$$\frac{\frac{1}{2}(h_I + h_{II})}{d_L} \ll 1 \quad (2)$$

angenommen werden. Die aus den Biegemomenten resultierenden Zugspannungen aus den Schweißlinsengrenzflächen können ohne wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit des Rechenergebnisses vernachlässigt werden.

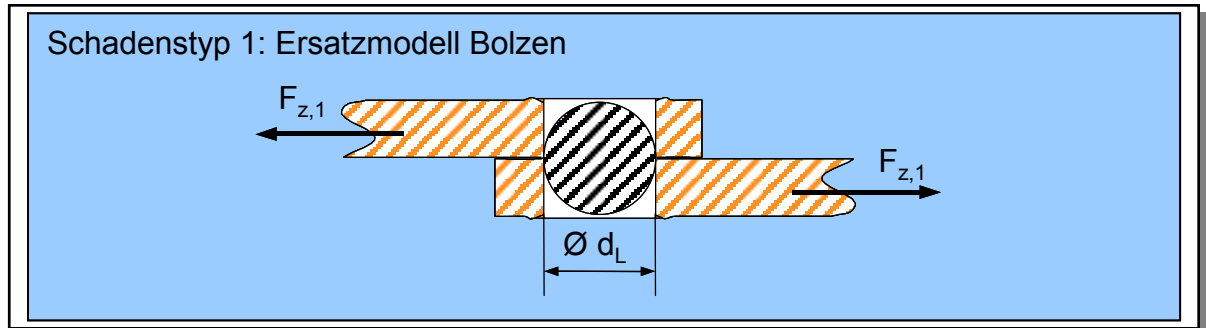


Abbildung 6.1.1-2: Modell Abscheren

Damit kann das Ersatzmodell „Abscheren eines Bolzens“ (siehe Abbildung 6.1.1-2) verwendet werden. Die Schubspannungen werden durch die Zugkraft durch nachfolgende Gleichung

$$\tau_{L,1} = \frac{F_{z,1}}{A_L} = \frac{F_{z,1}}{\pi \cdot \left(\frac{d_L}{2}\right)^2} \quad (3)$$

beschrieben. Unter Berücksichtigung der Eigenspannungen ist für den zum Versagen führenden Gleitbruch die Schubspannungshypothese anzuwenden.

$$\sigma_{V,1} = \sqrt{\sigma_{L,Eigen}^2 + 4 \cdot \tau_{L,1}^2} = \sqrt{\sigma_{L,Eigen}^2 + 4 \cdot \left(\frac{4 \cdot F_{z,1}}{\pi \cdot d_L^2}\right)^2} \quad (4)$$

Die Auflösung der Gleichung (4) nach $F_{z,1}$ und die Verwendung der maximal zulässigen Spannung $\sigma_{V,1} = \frac{\sigma_{zul}}{\beta_K}$ ergibt die zulässige Zugbelastung für den

Schadensfall Abscheren. Die starke Kerbwirkung am Schweißlinsenrand wird dabei durch den Kerbspannungsfaktor β_K berücksichtigt, der nach /DVS-91/ mit $\beta_K = 4$ angenommen wird.

$$F_{z,1,max} = \frac{1}{8} \cdot d_L^2 \cdot \pi \sqrt{\left(\frac{\sigma_{zul}}{\beta_K}\right)^2 - \sigma_{L,Eigen}^2} \quad (5)$$

Für den Fall 1 gilt daher

$$F_{z,1,max} = f(\text{Werkstoff, Linsendurchmesser, Eigenspannung}) \quad (6)$$

6.1.2 Berechnung des Versagensbilds Leiterabriss

Wie im vorangehenden Kapitel wird die Schädigung aufbauend auf einer Betrachtung des unverformten Systems und über die Modellvorstellung der Auswirkungen einer zunehmenden Belastung bis zur Leiterschädigung untersucht. Die Schädigung durch Leiterabriss setzt einen Bruch im Leiter voraus. Die Schweißlingsengeometrie nimmt dabei keinen Einfluss, nur die Geometrie und der Werkstoff der Ausgangsmaterialien. Zur Berechnung wird ein ebener Spannungszustand gemäß den kinematischen Annahmen der Bernoullischen Hypothese nach dem Modell in Abbildung 6.1.2-1 berechnet.

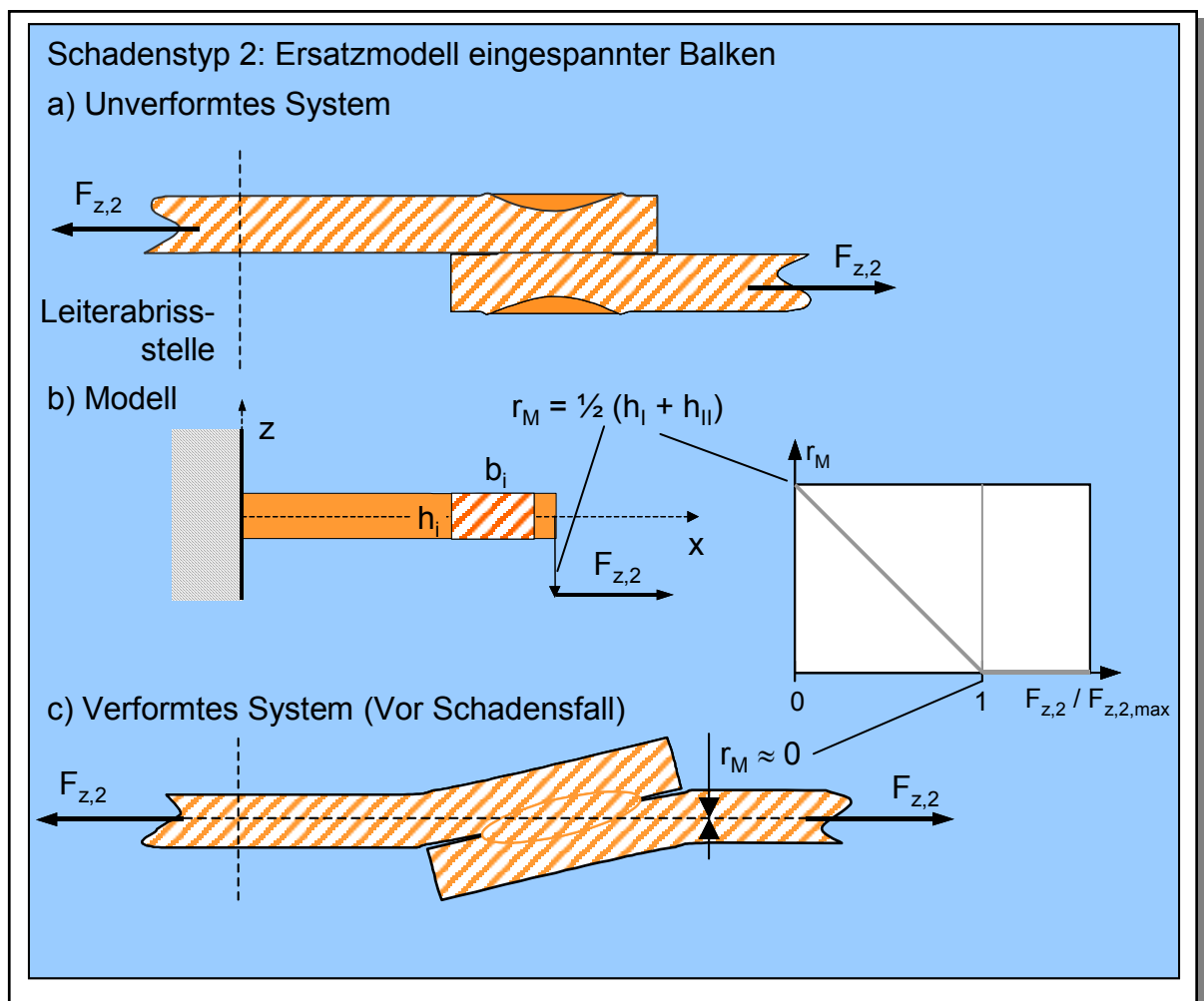


Abbildung 6.1.2-1: Modell Leiterabriss

Die Modellvorstellung der Verformung befindet sich in Übereinstimmung mit der einschlägigen Literatur in der Betrachtung von punktförmigen Kontaktstellen. Die Spannung resultierend aus Normalkraft und Biegemoment ergeben sich wie folgt:

$$\sigma_{z,2,i} = \frac{F_{z,2}}{A_i} \quad (7)$$

$$\sigma_{b,2,i} = \frac{M_{by,2}}{I_{y,i}} \cdot z_i \quad (8)$$

Die Zugspannungen sind gleichmäßig über den Querschnitt verteilt, während die größten Biegespannungen in der Randzone $z_i = \frac{1}{2} h_i$ auftreten. Weiterhin gilt für das Trägheitsmoment des rechteckigen Leiterquerschnitts $I_{y,i} = \frac{1}{12} b_i \cdot h_i^3$. Da keine Kerbwirkung auftritt kann im Versagensfall $\sigma_{V,2,i} = \sigma_{zul,i}$ angenommen werden.

Das die Biegespannungen verursachende Biegemoment $M_{by,2}$ wird durch die Zugkraft $F_{z,2}$ über den wirksamen Hebelarm r_M eingeleitet. Die resultierenden Verformungen durch die Biegespannungen sind auf die nähere Umgebung der Kontaktzone beschränkt und werden bis zur eintretenden plastischen Verformung vor dem Schadensfall über eine elastische Verformung mit der Proportionalitätskonstante des Elastizitätsmoduls E_i bestimmt. Da zur Bestimmung nur der Punkt $F_{z,2} = F_{z,2,max}$ relevant ist, wird die in Abbildung 6.1.2-1 dargestellte vereinfachte funktionale Abhängigkeit zwischen Hebelarm und Zugkraft festgelegt. Mittels der linearen Interpolation und den bekannten Hebelarmen an den Punkten $F_{z,2} / F_{z,2,max} = 0$ und $F_{z,2} / F_{z,2,max} = 1$ ergibt sich folgender Zusammenhang für $F_{z,2} < F_{z,2,max}$.

$$r_M = \frac{1}{2} (h_I + h_{II}) \cdot \left(1 - \frac{F_{z,2}}{F_{z,2,max}} \right) \quad (9)$$

Die beim Leiterabriss auftretende maximale Belastung $F_{z,2,max}$ wird wie folgt ermittelt:

$$F_{z,2,max} = A_i \cdot \sigma_{zul,i} \quad (10)$$

Der allgemeine Spannungszustand ermittelt sich zu:

$$\begin{aligned} \sigma_{V,2,i} &= \sigma_{z,2,i} + \sigma_{b,2,i} = \frac{F_{z,2}}{A_i} + \frac{M_{by,2}}{I_{y,i}} \cdot z_i \\ &= \frac{F_{z,2}}{A_i} + \frac{1}{2} F_{z,2} \frac{(h_I + h_{II}) \cdot \left(1 - \frac{F_{z,2}}{F_{z,2,max}} \right)}{\frac{1}{12} b_i \cdot h_i^3} \cdot \frac{1}{2} h_i \quad \text{mit } i = I, II \quad (11) \\ &= \frac{F_{z,2}}{b_i \cdot h_i} \left[1 + 3 \frac{h_I + h_{II}}{h_i} \left(1 - \frac{F_{z,2}}{F_{z,2,max}} \right) \right] \end{aligned}$$

Entsprechend der Modellvorstellung erreicht im Schadensfall die Zugkraft $F_{z,2}$ den Maximalwert $F_{z,2,max}$, so dass der Anteil der Biegung an der Spannung durch den geringen Hebelarm vernachlässigbar klein wird. Die zulässige Zugkraft ergibt sich durch Auflösung der Gleichung nach $F_{z,2}$.

$$F_{z,2,max} = b_i \cdot h_i \cdot \sigma_{zul,i} \quad (12)$$

Der Eigenspannungszustand kann durch den unbekanntem Walzumfang in der Herstellung des folienisolierten Flachleiters nicht berücksichtigt werden. Da der

Linsendurchmesser in der vorangehenden Gleichung keine Berücksichtigung findet, gilt für den Fall 2

$$F_{z,2,\max} = f(\text{Werkstoff, Geometrie}) \quad (13)$$

6.1.3 Berechnung des Versagensbilds Ausknöpfen

Aus der Analyse der im Scherzugversuch geprüften Proben zeigt sich ein Ausknöpfen an der Querschnittsverjüngung im Randbereich der Schweißlinse zwischen beiden Fügepartnern auf. Die Bruchlinie ist in Abbildung 6.1.3-1 mit a gekennzeichnet. Durch den geringen Überstand an den Rändern tritt kein kegelförmiges Ausknöpfen auf, sondern ein halbkegelförmiges Ausknöpfen mit planem Abriss der Randzonen.

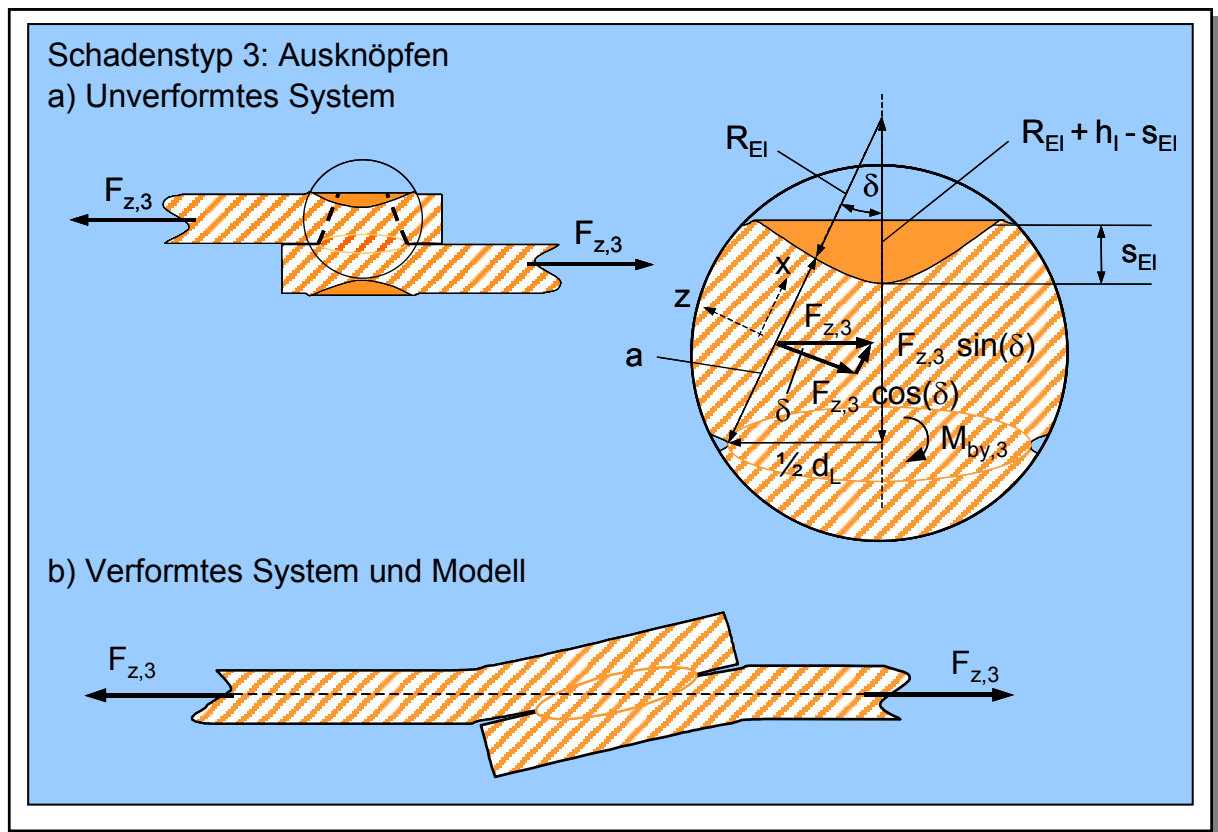


Abbildung 6.1.3-1: Modell Ausknöpfen

Die Bruchlinie a ergibt sich nach Pythagoras zu

$$a = -R_{EI} + \sqrt{\frac{1}{4}d_L^2 + (h_i + R_{EI} - s_{EI,i})^2} \quad (14)$$

Voraussetzung für das Modell ist eine gleichverteilte Zugkraft über der projizierten Fläche. Die projizierte Fläche sowie die Fläche des Kegelstumpfes sind in Abbildung 6.1.3-2 gezeigt.

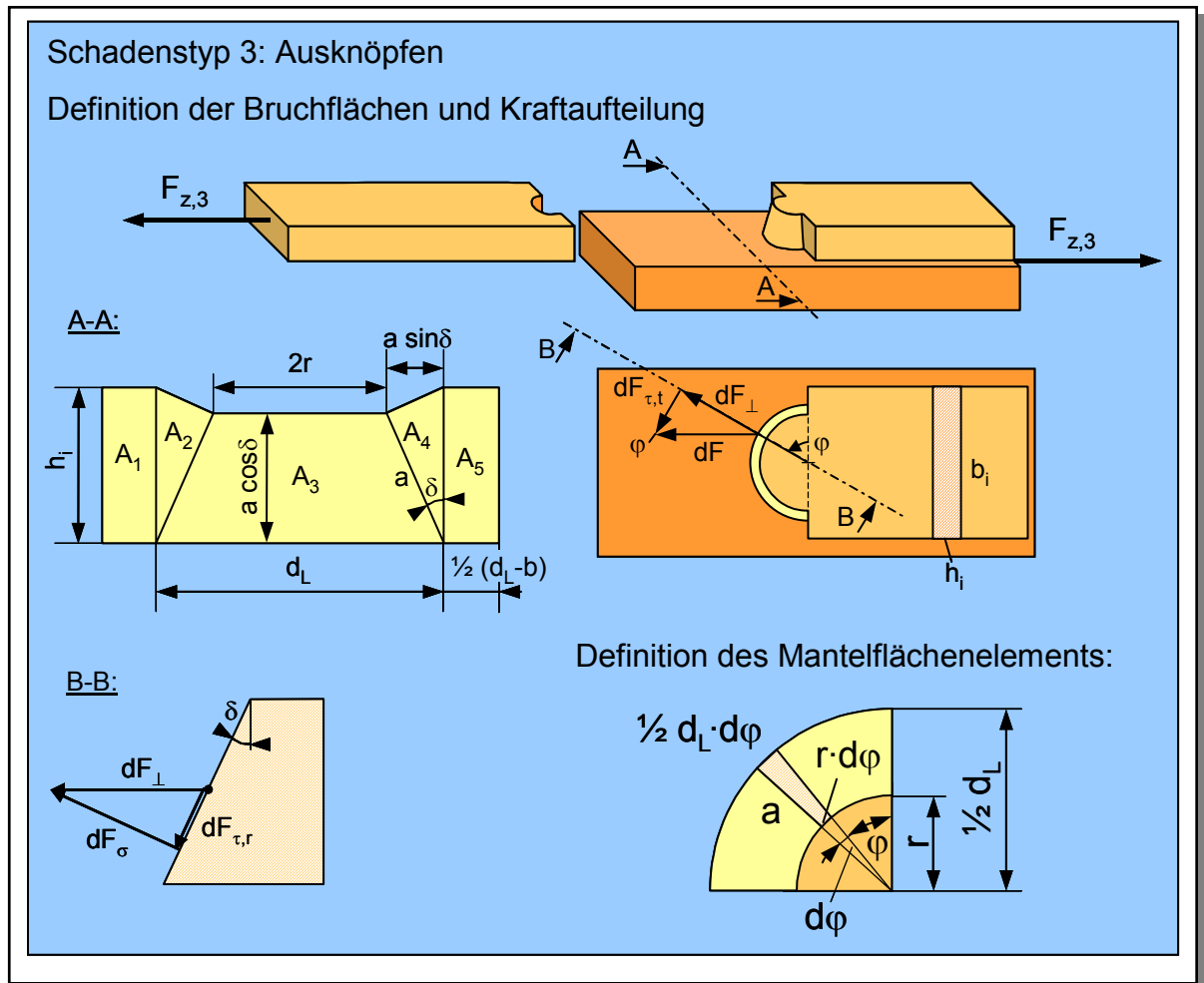


Abbildung 6.1.3-2: Geometrische Abmessungen

Die Kraftverteilung pro Flächeneinheit ergibt sich über die gleichverteilte Kraftaufteilung zu

$$dF_{z,3} = \frac{F_{z,3}}{A_{ges}} \cdot A_{proj} \quad (15)$$

mit

$$A_{ges} = \sum_{i=1}^5 A_i = (r + \frac{1}{2} d_L) \cdot a \cdot \cos \delta + (b - d_L) \cdot h + a \cdot \sin \delta \cdot h \quad (16)$$

Während in den Randzonen nur Normalkräfte wirken, teilt sich die Kraftbeaufschlagung auf der Kegelfläche in eine Normalkraft, eine radiale Quer- und eine tangentielle Querkraft auf. Die Kräfte sind nachfolgend aufgeführt.

$$dF_{\sigma} = dF_{z,3} \cdot \sin \varphi \cdot \cos \delta \quad (17)$$

$$dF_{\tau,t} = dF_{z,3} \cdot \cos \varphi \quad (18)$$

$$dF_{\tau,r} = dF_{z,3} \cdot \sin \varphi \cdot \sin \delta \quad (19)$$

Im Kegelbereich definiert sich über das Trapez der wirksamen Fläche mit

$$dA = a \cdot \frac{1}{2} \cdot (r + \frac{1}{2} d_L) \cdot d\varphi \quad (20)$$

Die zur Kraftbestimmung notwendige projizierte Fläche ist über

$$dA_{proj} = a \cdot \cos \delta \cdot \frac{1}{2} \cdot \sin \varphi \cdot (r + \frac{1}{2} d_L) \cdot d\varphi \quad (21)$$

zu berechnen. Zur übersichtlichen Darstellung der wirkenden Schub- und Normalspannungen, wird der Faktor $\frac{dF_{z,3}}{dA}$ definiert.

$$\frac{dF_{z,3}}{dA} = F_{z,3} \cdot \frac{\cos \delta \cdot \sin \varphi}{(b - d_L) \cdot h + h \cdot a \cdot \sin \delta + a \cdot (r + \frac{1}{2} d_L) \cdot \cos \delta} = F_{z,3} \cdot K_A \cdot \sin \varphi \quad (22)$$

mit der von geometrischen Faktoren abhängigen Konstanten K_A

$$K_A = \frac{\cos \delta}{(b - d_L) \cdot h + h \cdot a \cdot \sin \delta + a \cdot (r + \frac{1}{2} d_L) \cdot \cos \delta} \quad (23)$$

Im Kegel treten folgende Normalspannungen auf.

$$\frac{d\sigma}{d\varphi} = \frac{dF_{\sigma}}{dA} = \frac{dF_{z,3}}{dA} \cdot \sin \varphi \cdot \cos \delta \quad (24)$$

$$\sigma = 2 \cdot \int_0^{\pi/2} \frac{dF_{z,3}}{dA} \cdot \cos \delta \cdot \sin \varphi \, d\varphi = 2 \cdot F_{z,3} \cdot K_A \cdot \cos \delta \int_0^{\pi/2} \sin^2 \varphi \, d\varphi \quad (25)$$

$$\sigma = 2 \cdot F_{z,3} \cdot K_A \cdot \cos \delta \cdot \left(\frac{\pi}{2} - 1\right) \quad (26)$$

Die tangentialen Schubspannungen berechnen sich zu.

$$\frac{d\tau_t}{d\varphi} = \frac{dF_{\tau,t}}{dA} = \frac{dF_{z,3}}{dA} \cdot \cos \varphi \quad (27)$$

$$\tau_t = 2 \cdot \int_0^{\pi/2} \frac{dF_{z,3}}{dA} \cdot \cos \varphi \cdot \sin \varphi \, d\varphi = 2 \cdot F_{z,3} \cdot K_A \int_0^{\pi/2} \sin \varphi \cdot \cos \varphi \, d\varphi \quad (28)$$

$$\tau_t = F_{z,3} \cdot K_A \quad (29)$$

Radiale Schubspannungen im Kegel lassen sich über

$$\frac{d\tau_r}{d\varphi} = \frac{dF_{\tau,r}}{dA} = \frac{dF_{z,3}}{dA} \cdot \sin \varphi \cdot \sin \delta \quad (30)$$

$$\tau_r = 4 \cdot \int_0^{\pi/4} \frac{dF_{z,3}}{dA} \cdot \sin \delta \cdot \sin \varphi \, d\varphi = 4 \cdot F_{z,3} \cdot K_A \cdot \sin \delta \int_0^{\pi/4} \sin^2 \varphi \, d\varphi \quad (31)$$

$$\tau_r = F_{z,3} \cdot K_A \cdot \sin \delta \cdot \left(\frac{\pi}{2} - 1\right) \quad (32)$$

bestimmen. Die gesamte wirksame Schubspannung ist über

$$\tau_{ges} = \sqrt{\tau_t^2 + \tau_r^2} = F_{z,3} \cdot K_A \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\pi}{2} - 1\right)^2 \cdot \sin^2 \delta} \quad (33)$$

zu ermitteln. Unter Anwendung der Gestaltänderungsenergiehypothese ergibt sich

$$\sigma_V = \sqrt{(\sigma + \sigma_{Eigen})^2 + 3\tau_{ges}^2} = F_{z,3} \cdot K_A \cdot \sqrt{\left(1 + 2 \sin^2 \delta\right) \cdot \left(\frac{\pi}{2} - 1\right)^2 + 3} \quad (34)$$

Durch Auflösen der Gleichung nach $F_{z,3}$ und einsetzen der im Schadensfall wirkenden Spannung $\sigma_V = \sigma_{zul}$ ergibt sich $F_{z,3}$ zu

$$F_{z,3,max} = \frac{\sigma_{zul}}{K_A \cdot \sqrt{\left(1 + 2 \sin^2 \delta\right) \cdot \left(\frac{\pi}{2} - 1\right)^2 + 3}} \quad (35)$$

Da die Randbereiche entsprechend dem Leiterabriss beansprucht werden und somit eine geringere Belastung aufweisen, reicht im Fall des Ausknöpfens die Betrachtung der kegelförmigen Schadensfläche.

Somit gilt für den Fall 3 der komplexe Zusammenhang

$$F_{z,3,max} = f(\text{Werkstoff, Linsendurchmesser, Eigenspannung, Elektrodeneinsinktiefe}) \quad (36)$$

Demnach sind nachfolgend neben der Geometrie und den Werkstoffkennwerten weiterhin der Schweißlinsendurchmesser, die Eigenspannungen und die Elektrodeneinsinktiefen aus der Berechnung der Wärmeentstehung, -leitung und der Phasenumwandlung abzuleiten. Die zur Berechnung des Schweißprozesses notwendigen Berechnungsbausteine sind in Abbildung 6.1-1 aufgeführt.

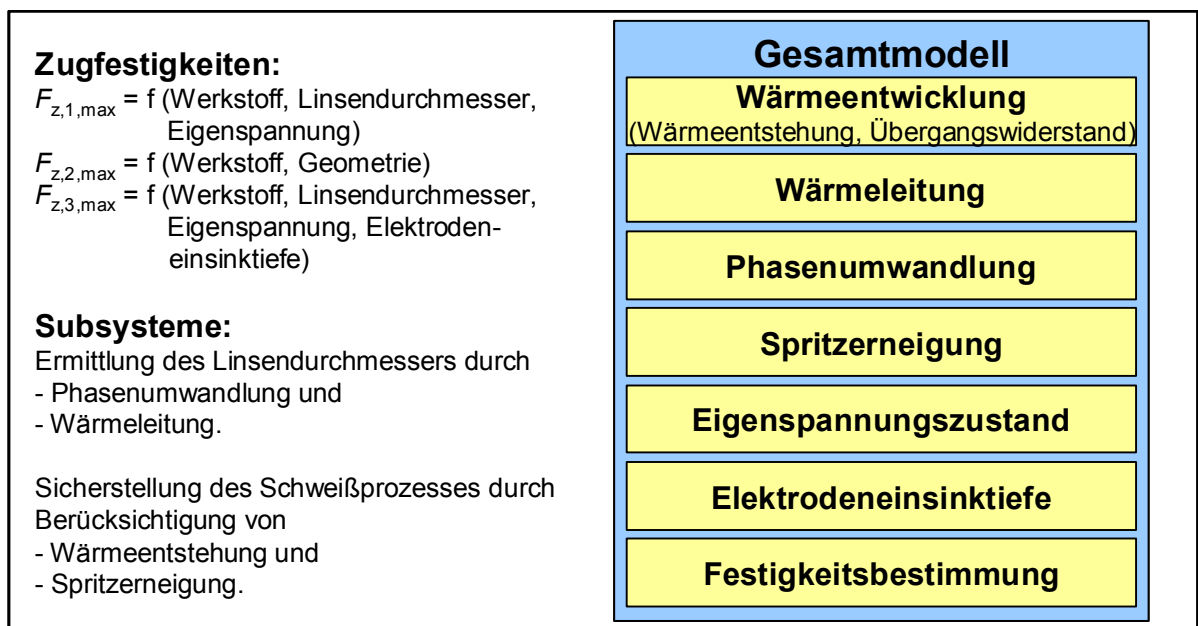


Abbildung 6.1-1: Notwendige Berechnungsbausteine

6.2 Berechnung der Wärmeentwicklung an den Kontaktwiderständen

Die wesentliche physikalische Eigenschaft zur Realisierung des Widerstandpunktschweißprozesses ist die Wärmeentwicklung in der Fügezone der beiden Fügepartner. Im Folgenden wird der generelle Wärmeentstehungsprozess über das Joulesche Gesetz aufgezeigt, das die Grundlage der weiteren Betrachtung bildet. Die Wärmeentstehung wird dabei maßgeblich durch den Übergangswiderstand im Fügebereich bestimmt. Deshalb wird auf den Übergangswiderstand und seine Einflussgrößen im nächsten Kapitel detailliert eingegangen.

6.2.1 Berechnung der Wärmeentstehung

Die Wärmeentstehung nach dem Jouleschen Gesetz ist durch folgenden Zusammenhang gekennzeichnet

$$Q_J = \int_0^{t_s} I^2 \cdot R \, dt \quad (37)$$

Q_J = Joulesche Wärme

I = Stromstärke

R = Ohmscher Widerstand

t = Zeit

mit

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) \, dt} \quad (38)$$

i = Stromstärke (zeitlich veränderlich)

Die Wärmeentstehung setzt sowohl bei einem stromdurchflossenen Festkörper, als auch an Fügestellen ein. Die Abhängigkeit der ohmschen Widerstände von der Temperatur sind für Festkörper hinreichend bekannt und können aus der Literatur entnommen werden /DKI-78/, /DKI-82/, /WIE-99/.

In der Thermoelektrik können bei der Wärmeentstehung noch zwei weitere Effekte auftreten, der Peltier- und der Thompson-Effekt. Beide finden hier keine Berücksichtigung, weil die für den Peltier-Effekt wichtigste Voraussetzung der großen Gradienten der thermoelektrischen Spannungsreihe der zu verschweißenden Materialien nicht vorliegt und die geringen Abmessungen beider Bauteile in diesem Fall nicht den Temperaturgradienten aufweist, den der Thompson-Effekt erfordert.

6.2.2 Theoretische Betrachtung des Übergangswiderstands

Da die Berechnung der Wärmeentstehung in der Fügestelle mit dem Quadrat des ermittelten Übergangswiderstandes korreliert, wird das Ergebnis direkt durch das Modell der Widerstandermittlung beeinflusst. Deshalb ist in diesem Punkt die größtmögliche Genauigkeit des Modells gefordert. Der elektrische Widerstand an der Fügestelle wird durch mehrere Einflussgrößen verändert. Zunächst ist die Elektrodenanpresskraft zu nennen, die einen wesentlichen Einfluss auf den Übergangswiderstand nimmt. In der Literatur werden mehrere Modelle aufgezeigt, um die Abhängigkeit des Widerstands von der Anpresskraft darzustellen (siehe Abbildung 6.2.2-1).

Gleichung	Randbedingungen	Quelle
$R(F) = \frac{\text{Konst.}}{F^n}$	Fügen flacher Bleche: n=1 /GRE-92/	/HOL-41/
$R(F) = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} \cdot \sqrt{\frac{H}{F}}$	Auf Basis von /HOL-67/. Für Steckverbinder optimiert	/COL-02/
$R(F) = 0,89 \cdot \rho \cdot \sqrt{\frac{H}{F}}$	Für Steckverbinder optimiert	/HOR-03/
$R(F) = \sqrt{\frac{\rho^2 \eta \pi H}{4 F}}$	Allgemein	/LEE-99/
R: Übergangswiderstand F: Anpresskraft ρ: Spezifischer Widerstand Kontaktmaterial n: Exponent (Empirisch zu ermitteln) H: Härtefaktor (Definition: s. Literaturstelle) η: Oberflächenfaktor (Empirisch ermittelt, Definition: s. Literaturstelle)		

Abbildung 6.2.2-1: Berechnung des Übergangswiderstands

Die Gleichungen in Abbildung 6.2.2-1 lassen die räumliche Verteilung des Übergangswiderstands unberücksichtigt. Über die Übergangswiderstände und somit über die Wärmeentstehung sind somit nur gemittelte Aussagen möglich. Hieraus formuliert sich die Aufgabe, ein realitätsnahes Modell des Übergangswiderstands aufzubauen. In der Literatur wird dargestellt, dass sich der Übergangswiderstand im Wesentlichen durch die von der Anpresskraft resultierenden Verformung und damit der Einsinktiefe der Fügepartner bestimmt.

Die Verformung wird daher vereinfachend mit dem Modell des elastisch gebetteten Körpers berücksichtigt, Abbildung 6.2.2-2 zeigt die Modellannahme detailliert. Ohne auf die Herleitung genauer einzugehen kann die Verformung durch eine inhomogene Differentialgleichung 4. Ordnung mit konstanten Koeffizienten

$$(E I v''')'' + k v = q_A(x, z) \quad (39)$$

genügend genau beschrieben werden. Die Inhomogenität wird durch die Streckenlast $q_A(x, z)$ dargestellt. Das Gegenlager $q_B = k \cdot v$ (s. Abbildung 6.2.2-2) wird durch das Produkt der Bettungskonstanten k und der Verschiebung v abgebildet.

Das Bett als Gegenlager wird als Zusammenschluss mehrerer Feder aufgefasst und bildet die Reaktionskraft durch die orthogonale Verschiebung multipliziert mit einer „Bettungskonstanten“. Die Bettungskonstante k wird durch die Verwendung von n_q Federn im selben Abstand über dem Kontaktdurchmesser d_K mit der Federsteifigkeit C jeder Feder definiert.

$$k = \frac{n_q \cdot c}{d_K} \quad (40)$$

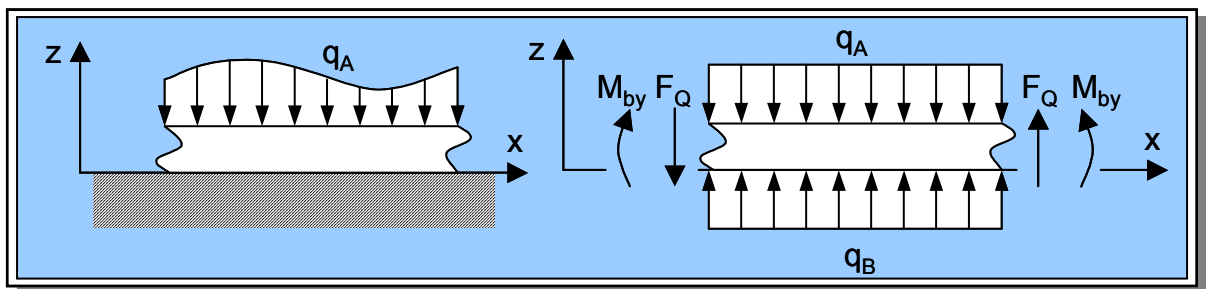


Abbildung 6.2.2-2: Elastisch gebetteter Körper

Die Geometrie der Elektrodenspitze und der Kontaktdurchmesser bestimmen dabei die Belastungsverteilung auf der Kontaktfläche. Während bei ebenen Elektrodenspitzen Spannungsspitzen an den Randzonen auftreten, ist bei balligen Elektroden eine zum Elektrodenrand abfallende Belastung festzustellen. Unter den gegebenen geometrischen Bedingungen ist $\frac{1}{2} d_K \leq R_{EI}$ und der Geometriefaktor ergibt sich mit $n = \frac{\frac{1}{2} d_K}{R_{EI}}$. In guter Annäherung kann für ebene und ballige Elektroden

für $q_A(x, z)$ ein Polynom vierter Ordnung mit der Variablen $\left(\frac{|x|}{\frac{1}{2} d_K} \right)$ angenommen werden. Hieraus ergibt sich die Streckenlast $q_A(x, z)$ zu:

$$q_A(x, z) = q_A(x=0, z) \cdot \frac{d_k}{n_q} \cdot (K_4(n) \cdot \left(\frac{|x|}{\frac{1}{2}d_K}\right)^4 + K_3(n) \cdot \left(\frac{|x|}{\frac{1}{2}d_K}\right)^3 + K_2(n) \cdot \left(\frac{|x|}{\frac{1}{2}d_K}\right)^2 + K_1(n) \cdot \left(\frac{|x|}{\frac{1}{2}d_K}\right) + 1) \quad (41)$$

Die Koeffizienten ergeben sich aus Polynomen dritter Ordnung mit dem Geometriefaktor n als Variable.

$$K_4(n) = -54,44 \cdot n^3 + 106,82 \cdot n^2 - 73,78 \cdot n + 17,85 \quad (42)$$

$$K_3(n) = 79,99 \cdot n^3 - 156,92 \cdot n^2 + 109,93 \cdot n - 27,17 \quad (43)$$

$$K_2(n) = -32 \cdot n^3 + 67,94 \cdot n^2 - 52,32 \cdot n + 14,05 \quad (44)$$

$$K_1(n) = 1,76 \cdot n - 1,34 \quad (45)$$

Im Übergang der beiden Fügepartner ist eine breitere Fügefläche im Vergleich zur Elektrodenkontakfläche festzustellen. Die Belastungsverteilung entspricht qualitativ der Belastung einer balligen Elektrode mit größerem Elektrodenradius und Kontaktdurchmesser, wobei die Verteilung maßgeblich durch die Festigkeit der beiden Fügepartner bestimmt wird.

Der zur Bestimmung des Verlaufs notwendige Mittenwert $q_A(x=0, z)$ ist über folgenden Zusammenhang zu ermitteln.

$$F_{EI} = 2 \cdot \int_0^{\frac{1}{2}d_K} q_A(x) dx \quad (46)$$

Der Kontaktdurchmesser wird über die Hertzsche Gleichung bestimmt.

Mit den gegebenen und errechneten Größen ergibt sich unter Berücksichtigung von $4\gamma^4 = \frac{k}{EI}$ mit folgendem Lösungsansatz

$$v(x) = v_{\text{hom}}(x) + v_{\text{inhom}}(x) \quad (47)$$

und

$$v_{\text{hom}}(x) = C_1 \cdot \cosh(\gamma x) \cdot \cos(\gamma x) + C_2 \cdot \cosh(\gamma x) \cdot \sin(\gamma x) + C_3 \cdot \sinh(\gamma x) \cdot \cos(\gamma x) + C_4 \cdot \sinh(\gamma x) \cdot \sin(\gamma x) \quad (48)$$

$$v_{\text{inhom}} = \frac{1}{k} \left(\frac{1}{EI} q_A(x, n) - 24 \cdot q_A(x=0) \cdot \frac{K_4(n)}{\left(\frac{1}{2}d_K\right)^4} \right) \quad (49)$$

unter Beachtung der allgemeinen Randbedingungen $v'(x=0)=0$, $M(x=\pm\frac{1}{2}d_K)=0$

und $v''(x=0)=\frac{1}{R}$ mit $v''(x=0)=0$ für ebene Elektroden sowie mit

$v''(x=0)=\frac{8 \cdot \Delta v}{4 \cdot \Delta v^2 + d_K^2}$ und $\Delta v = v(x=0) - v(x=\frac{1}{2}d_K)$ für ballige Elektroden die

Verschiebungsfunktion v mit folgenden Koeffizienten. Zur Lösung der Gleichung des dritten Grades wird für die Diskriminante $D < 0$ der trigonometrische Lösungsansatz angewandt. Die Lösungen ergeben sich zu

$$C_1 = 2 \cdot \sqrt{\frac{|u|}{3}} \cdot \cos\left(\frac{\varphi}{3} + \delta\right) - \frac{2}{3}h + \frac{g}{6 \cdot \gamma^2 \cdot \sinh(\gamma \cdot \frac{1}{2}d_k) \cdot \sin(\gamma \cdot \frac{1}{2}d_k)} \quad \text{mit } \delta = 0, 120^\circ, 240^\circ \quad (50)$$

Die verwendeten Faktoren u , g und h sind im Anhang definiert.

Aufgrund der Komplexität des Koeffizienten C_1 werden die folgenden Koeffizienten in Abhängigkeit der vorher berechneten Koeffizienten dargestellt.

$$C_4 = \frac{1}{\gamma^2} \left[\frac{C_1 + h}{\left(\frac{1}{2}d_k\right)^2 + (C_1 + h)^2} - \frac{4}{k \cdot d_k^2} \cdot K_2 \cdot q_A(0, z) \right] \quad (51)$$

$$C_3 = \frac{1}{\cosh(f)\sin(f) + \sinh(f)\cos(f)} \left(C_4 \cosh(f)\cos(f) - C_1 \sinh(f)\sin(f) + q_A(0, z) \frac{6K_4 + 3K_3 + K_2 - K_1 f \sinh(f)\cos(f)}{k \cdot f^2} \right) \quad (52)$$

$$C_2 = -C_3 - \frac{K_1}{k \cdot f} \cdot q_A(0, z) \quad (53)$$

mit der Vereinfachung f gemäß Anhang. Die Herleitung der Größen ist ebenfalls dem Anhang zu entnehmen.

Die Elektrodenanpresskraft und deren Geometrie fließen demnach über folgenden Einflussfaktor der Elektrode in der Berechnung des Übergangswiderstands ein. Da in den Vorversuchen bei Anpresskräften ab 500 N keine nennenswerte Widerstandabnahme zu verzeichnen war, wird der Korrekturfaktor zu dieser Einsinkkraft ins Verhältnis gesetzt.

$$K_{El} = \frac{v(x, F_{El} = 500 \text{ N})}{v(x)} \quad (54)$$

Neben der Elektrodengeometrie und der Elektrodenanpresskraft hat die Oberflächenrauheit bei geringen Elektrodenanpresskräften einen Einfluss auf den Übergangswiderstand.

Die Verschiebung der Widerstandskennlinie aufgrund der Oberflächenrauigkeit wird mittels des Faktors K_{Rz} berücksichtigt. Der Faktor wird aus der in Kapitel 5.2.3 gezeigten Korrelation zwischen der Oberflächenrauigkeit und dem Abisolierverfahren abgeleitet. Somit wird über den Oberflächenfaktor K_{Rz} das Abisolationsverfahren berücksichtigt.

Der Einfluss der Oberflächenrauigkeiten ist auf geringe Anpresskräfte bzw. geringe Oberflächenverformungen beschränkt und bewirkt in diesem Bereich eine deutliche Widerstandserhöhung. Es ist eine Übereinstimmung mit dem quadratischen Faktor aus Oberflächenverformung und Oberflächenrauheit zu erreichen. Der Faktor ergibt sich demnach mit

$$K_{Rz} = \begin{cases} (R_z / v(x))^2 & \text{für } v(x) \leq R_z \\ 1 & \text{für } v(x) > R_z \end{cases} \quad (55)$$

Kontaminierte Fügstellenoberflächen bewirken ebenfalls eine Verschiebung der Kennlinie, die in einem weiteren Faktor berücksichtigt wird. Dieser wird in der praktischen Anwendung durch die Messung der Oberflächenverschmutzung vor dem Schweißvorgang ermittelt.

Der Übergangswiderstand lässt sich über folgende Beziehung darstellen.

$$K_{VG} = 1 - 0,01 \cdot VG + 0,31 \cdot VG^2 \quad (56)$$

Die vollständige Gleichung zur Berechnung des Kontaktwiderstands stellt sich mit dem spezifischen elektrischen Widerständen $\rho_I(T)$ und $\rho_{II}(T)$ der beiden Fügepartner wie folgt dar:

$$\rho(VG, F_{EI}, R_{EI}, R_z, T, x) = \frac{1}{2} K_{EI} \cdot K_{Rz} \cdot K_{VG} \cdot (\rho_I(T) + \rho_{II}(T)) \quad (57)$$

6.3 Berechnung der Elektrodeneinsinktiefe

Die Elektrodeneinsinktiefe setzt sich aus einem elastischen Teil und einem plastischen Teil zusammen. Während der elastische Teil der Elektrodeneinsinktiefe nur bei Anliegen der Elektrodenkraft F_{EI} auftritt, beeinflusst der plastische Teil der Einsinktiefe die Bauteilgeometrie und somit das Festigkeitsverhalten.

$$v(x=0, z=0) = s_{EI} = s_{EI,elast} + s_{EI,plast} \quad (58)$$

Weiterhin gilt

$$\varepsilon(x) = \varepsilon_{elast} + \varepsilon_{plast} \quad (59)$$

Das elastisch-plastische Verhalten der Materialeigenschaften wird für dieses und alle nachfolgend auftretenden plastischen Verformungen durch ein linear verfestigendes Verhalten approximiert. Neben der mechanischen Belastung des Bauteils ist das thermische Ausdehnungsverhalten unter Berücksichtigung der Temperaturgradienten mit in Betracht zu ziehen, die für den idealelastischen Fall in folgender Gleichung dargestellt sind.

$$\begin{aligned}\varepsilon(x) &= \frac{v(x)}{h_i} = \varepsilon_{mech} - \varepsilon_{thermisch} = \frac{\sigma}{E(T)} - \alpha \cdot \Delta T = \\ &= \frac{1}{h_i} \cdot \int_0^{h_i} \frac{q_A(x)}{\pi \cdot x \cdot E(T)} dz - \frac{1}{h_i} \cdot \int_0^{h_i} \alpha(T) \cdot (T(z) - T_{20}) dz\end{aligned}\quad \text{mit } i = I, II \quad (60)$$

Da sich im idealisierten 2-dimensionalen Zustand die Streckenlast $q_A(x)$ auf den halben Umfang mit Radius x bezieht, wird folgende Beziehung für den elastischen Fall zugrundegelegt.

$$\sigma(x) = \frac{F(x)}{A(x)} = \frac{q_A(x) \cdot dx}{\frac{1}{2}(2\pi \cdot x) \cdot dx} = \frac{q_A(x)}{\pi \cdot x} \quad (61)$$

Im plastischen Fall gilt mit Erreichung der Fließspannung

$$\sigma(x) \geq \sigma_F(T) \quad (62)$$

Die bleibende Verformung berechnet sich somit zu

$$\varepsilon_{plast} = \frac{1}{h_i} \cdot \int_0^{h_i} \frac{(\sigma(x) - \sigma_F(T))}{E(T)} dz \quad \text{für alle } \sigma_F(T) \leq \frac{q_A(x)}{\pi \cdot x} \quad (63)$$

Die Ortskoordinate $x = 0$ weist sowohl die größte Streckenlast, als auch das höchste Temperaturniveau auf, so dass in der Festigkeitsbetrachtung die maximale Einsinktiefe der Elektrode an der Position $x = 0$ berücksichtigt wird.

6.4 Berechnung der Phasenumwandlung in der Schweißlinse

Die latente Wärme in der Phasenumwandlung erzeugt eine nichtlineare Funktion der Enthalpie über der Temperatur mit einem Sprung im Bereich des Phasenwechsels. Hierbei gilt

$$H_{flüssig} = H_{fest} + \Delta H_{Schmelze} \quad (64)$$

Der Zusammenhang zwischen Enthalpie und Wärmekapazität bei unterschiedlichen Temperaturniveaus T_1 und T_2 kann wie folgt mathematisch beschrieben werden.

$$H_{T_2} = H_{T_1} + \Delta H = H_{T_1} + V \int_{T_1}^{T_2} \rho \cdot c_p dT \quad (65)$$

Für unlegiertes Kupfer ist gemäß /DKI-78/ für die Erstarrung bzw. Schmelze bei Erreichung der Schmelztemperatur die Ab- bzw. Zufuhr einer Energie von

$$Q = 210 \text{ J/g} \quad (66)$$

notwendig. Die Gesamtumwandlungswärme verteilt sich auf den gesamten Umwandlungsprozess.

6.5 Berechnung der Eigenspannungen in der Wärmeeinflusszone

Eigenspannungen sind Spannungen die sich im Temperaturgleichgewicht befinden und auf die keine äußeren Kräfte oder Momente einwirken. Dabei ist eine Unterteilung in Makroeigenspannungen, oder Eigenspannungen I. Art, und Mikroeigenspannungen, oder Eigenspannungen II. und III. Art, vorzunehmen. Im vorliegenden Fall in der Berechnung der Eigenspannungen zur Festigkeitsberechnung eine Beschränkung auf Makroeigenspannungen nach /RAD-88/ ausreichend ist.

Der Eigenspannungszustand wird bestimmt durch Temperaturunterschiede in Werkstoffbereichen (thermische Eigenspannungen), Phasenumwandlungen (Umwandlungseigenspannungen) und plastische Beanspruchung (Verformungseigenspannungen). Die Elektrodenanpresskraft bestimmt dabei die Verformungseigenspannungen und die über den Querschnitt temperaturabhängigen, veränderlichen Werkstoffkennwerte die thermischen Eigenspannungen. Das thermische Belastungsprofil kann aus der in Kapitel 6.6 ermittelten räumlichen Wärmeverteilung über den Fügepartnern entnommen werden. Das mechanische Belastungsprofil ergibt sich aus den über der Werkstücktiefe ermittelten Beanspruchungen.

Die thermischen Eigenspannungen treten gleichmäßig über den Querschnitt verteilt auf. Aufgrund der ortsnahen, festen Einspannung von Trägerteil und Leiter ist eine Biegung der beiden Fügepartner auszuschließen. Dies hat in thermisch hoch belasteten Zonen eine Stauchung und in Zonen niedriger thermischer Belastung eine Dehnung zur Folge. Im Mittel heben sich die Dehnungen für $x = \text{const}$ auf. Für den Querschnitt $x = \text{const}$ wird der relevante Dehnungszustand in Bezug auf die mittlere Querschnitttemperatur wie folgt berechnet.

$$\bar{T} = \frac{1}{h_i} \cdot \int_0^{h_i} T(x = \text{const}, z) dz \quad \text{mit } i = \text{I, II} \quad (67)$$

$$\varepsilon_{dz} = \alpha \cdot (T(x = \text{const}, z) - \bar{T}) \quad (68)$$

$$\text{mit } \frac{1}{h_i} \cdot \int_0^{h_i} \varepsilon_{dz} dz = 0 \quad (69)$$

Für die bei $x = \text{const}$ auftretenden Dehnungen ε durch Phasenumwandlung gelten die gleichen Randbedingungen wie für die thermischen Eigenspannungen. Allerdings wird die rein thermische Ausdehnung durch eine Dichteänderung in der Phasenumwandlung überlagert. Dies führt bei einem definierten Temperaturpunkt zu einer Dehnungserhöhung bzw. -minderung. Für Temperaturen größer oder gleich der Schmelztemperatur $T(x=\text{const},z) \geq T_S$ mit einer Dichteänderung von $\rho_{D, \text{Phase I}}$ zu $\rho_{D, \text{Phase II}}$ gilt deshalb

$$\varepsilon_{dz} = \alpha_{Phase I} \cdot (T_S - \bar{T}) + \frac{1}{3} \cdot \frac{\rho_{D,Phase II}}{\rho_{D,Phase I}} + \alpha_{Phase II} \cdot (T(x = const, z) - T_S) \quad (70)$$

Bei noch unvollständiger Phasenumwandlung von Phase I zur Phase II mit einem prozentualen Umwandlungsanteil m ergibt sich folgender Dehnungszustand unter Berücksichtigung der gemittelten Dichte.

$$\varepsilon_{dz} = \alpha_{Phase I} \cdot (T_S - \bar{T}) + \frac{1}{3} \cdot \frac{\bar{\rho}_D}{\rho_{D,Phase I}} \quad (71)$$

$$\text{mit } \bar{\rho}_D = (1-m) \cdot \rho_{D,Phase I} + m \cdot \rho_{D,Phase II} \quad (72)$$

Die Phasenänderung wird linear über ein bestimmtes Temperaturintervall berücksichtigt.

Während die äußere Belastung durch die Elektrodenanpresskraft für den betrachteten Prozess als konstant angesehen wird, ändern sich die Materialkennwerte mit der thermischen Belastung. Die auftretenden elastischen und plastischen Verformungen werden analog zur Vorgehensweise in der Elektrodeneinsinktiefe bestimmt.

6.6 Berechnung der Wärmeleitung

Der Energietransport durch Wärmeleitung wird durch die Fourierschen Differentialgleichung beschrieben. Da sich die zweidimensionale Berechnung bereits in anderen Arbeiten als ausreichend genau herausgestellt hat, wird dieser Ansatz hier angewendet.

$$\rho_D \cdot c_P \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \dot{Q}_{WK} \quad (73)$$

Mit einer deduktiven Herangehensweise an die Aufgabe wird ausgehend von der allgemeinen Betrachtung des Cauchyproblems der Wärmeleitung eine Anpassung an die Wärmeleitung im Schweißprozess erfolgen. Für den inkrementellen Zeitschritt wird ein lineares Modell vorausgesetzt, was von der Temperatur unabhängige Materialkonstanten zur Folge hat.

Zunächst ist die homogene Gleichung

$$T_t - \frac{\lambda}{\rho_D \cdot c_P} \Delta T = 0 \quad (74)$$

zu lösen. Mittels einer Fouriertransformation ergibt sich die Lösung der homogenen Wärmeleitungsgleichung mit der Fundamentallösung oder Greenschen Funktion $G(t,x)$ und der Wärmeleitfähigkeit α_W zu

$$T(t, x) = G(t, x) \cdot T_0(x) = \frac{1}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot \alpha_W \cdot t}} \int e^{-\frac{|x-y|^2}{4 \cdot \alpha_W \cdot t}} \cdot T_0(y) dy \quad x, y \in R^3 \quad (75)$$

Die Lösung der inhomogenen Gleichung

$$T_t - \frac{\lambda}{\rho_D \cdot c_P} \Delta T = \frac{1}{\rho_D \cdot c_P} Q_t \quad (76)$$

wird über das Prinzip von Duhamel ermittelt. Die Gesamtlösung ergibt sich nach dem Superpositionsprinzip aus der Lösung der homogenen Gleichung und einer partikulären Lösung der inhomogenen Gleichung.

$$T(t, x) = \frac{1}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot \alpha_W \cdot |t-s|}} \int_0^t \int e^{-\frac{|x-y|^2}{4 \cdot \alpha_W \cdot |t-s|}} \cdot Q_t(y) dy ds + \frac{1}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot \alpha_W \cdot t}} \int e^{-\frac{|x-y|^2}{4 \cdot \alpha_W \cdot t}} \cdot T_0(y) dy \quad (77)$$

Durch den gewählten linearen Ansatz sind für jeden Zeitschritt die temperaturabhängigen Materialkennwerte anzupassen. Die nähere Herleitung ist dem Anhang zu entnehmen.

6.7 Untersuchung der Spritzerneigung im Schweißprozess

Bei zu geringen Anpresskräften und / oder zu geringen die flüssige Schweißlinse umfassende Wandstärken kann flüssiges Material aus der Linse austreten. Da dieser Prozess nur bedingt reproduzierbar ist, beeinflusst er das Schweißergebnis negativ. Deshalb ist die Möglichkeit der Spritzerneigung in der Berechnung zu berücksichtigen und die Parametersätze mit der Gefahr einer Spritzerbildung nicht im Prozess zu verwenden.

Die Spritzerneigung wird durch die Auflagefläche der beiden Fügepartner, die Elektrodenanpresskraft, die Schweißlinsengeometrie sowie den Druck innerhalb der Schweißlinse und die temperaturabhängigen Materialkennwerte der Fügepartner beeinflusst. Die geometrischen Abmessungen sind Abbildung 6-1 zu entnehmen.

Die Phasenumwandlung und das Temperaturprofil in der Schweißlinse und der umgebenden festen Phase erzeugen den Schweißlinseninnendruck. Eine Spritzerbildung ist nicht gegeben, solange der Druck auf der Schweißlinsenfläche die Elektrodenanpresskraft nicht übersteigt und die Druckbelastung auf die reibschlüssig verbundene Randzone der beiden Fügepartner kein Aufreißen der Kontaktfläche verursacht. Dementsprechend ist die Basisanforderung

$$S_{F,El} \cdot F_{El} > p_L \cdot A_L = p_L \cdot \pi \left(\frac{1}{2} d_L\right)^2 \quad (78)$$

Der Faktor $S_{F,EI}$ ist ein Sicherheitsfaktor, der auf Basis der ausgewerteten Versuche mit $S_{F,EI} = 0,9$ festgelegt wird. Bei Werkstoffen mit stark differierenden Werkstoffkennwerten kann sich eine unterschiedliche Ausbreitung der flüssigen Phase ergeben. Deshalb wird für beide Werkstoffe der Schnittpunkt der Isothermen mit der Schmelztemperatur $T_{Schmelz}$ mit der Fügefläche bestimmt (siehe Abbildung 6-1). Dabei ist der ungünstige Fall des größeren Linsendurchmessers mit der kleineren Kontaktbreite zu berücksichtigen.

$$d_{L,max} = \text{Max}(2 \cdot x(T_{Schmelz,I}, z = h_I); 2 \cdot x(T_{Schmelz,II}, z = h_{II})) \quad (79)$$

Der Innendruck der Schweißlinse ergibt sich aus dem unterschiedlichen Ausdehnungsverhalten der umgewandelten flüssigen Phase und der festen, umgebenen Phase. Im Modell aus Abbildung 6-1 entsprechen in Analogie zum Welle-Nabe-Pressverband die Schweißlinse der Welle und der thermisch vorgedehnte plastische Bereich der Nabe. Im Modell einer Vollwelle gilt

$$\sigma_{radial} = \sigma_{tangential} = -p_L \quad (80)$$

was der Charakteristik der Schweißlinse mit gleichmäßiger Druckverteilung entspricht. Mit den Normalen- und Tangentialvektoren ergibt sich für die Spannung in x-Richtung mit

$$\sigma_x = \sigma_{radial} \cdot \frac{1}{2} h_L \cdot \cos(\varphi) - \sigma_{tangential} \cdot \frac{1}{2} d_L \cdot \sin(\varphi) \quad (81)$$

und die Spannung in z-Richtung mit

$$\sigma_z = -\sigma_{radial} \cdot \frac{1}{2} d_L \cdot \sin(\varphi) + \sigma_{tangential} \cdot \frac{1}{2} h_L \cdot \cos(\varphi) \quad (82)$$

Der Schweißlinseninnendruck ergibt sich unter Berücksichtigung des wirksamen Übermaßes \ddot{U} zu

$$p_L = \frac{Q_\xi^2 - Q^2}{2Q_\xi^2} \cdot E \cdot \ddot{U} \quad (83)$$

Das Übermaß kann über die halbe Differenz aus dem Außendurchmesser der nicht eingefassten Schweißlinse sowie dem Innendurchmesser der umgebenden festen Phase bestimmt werden.

$$\ddot{U} = \frac{1}{2} (d_{L,innen}(p_L = 0) - d_{L,außen}(p_L = 0)) \quad (84)$$

Der unbeeinflusste Außendurchmesser der Schweißlinse beträgt

$$d_{L,außen}(p_L = 0) = d_L \cdot \frac{\rho_{D,20}}{3 \cdot \rho_{D,\bar{T}}} \quad (85)$$

Der unbeeinflusste Innendurchmesser wird über eine thermisch beanspruchte Nabe mit einer Innentemperatur gleich der Schmelztemperatur $T_{Schmelz}$ an der Position d_L

und einer über die Wärmeleitung zu bestimmenden Außentemperatur an der Position b_i bestimmt. Durch den radialen Temperaturgradienten wird die Dehnung eines Ringelements unter Temperaturbelastung erfasst. Unter Berücksichtigung von

$$\bar{T}_{Nabe} = \frac{1}{b_i - d_L} \int_{\frac{1}{2}d_L}^{\frac{1}{2}b_i} U_L(x) \cdot T(x) dx \quad i = I, II \quad (86)$$

ergibt sich die gesuchte Größe zu

$$d_{L,innen}(p_L = 0) = d_L \cdot \alpha \cdot (\bar{T}_{Nabe} - T_{20}) \quad (87)$$

Mit den errechneten Größen ist die Bestimmung des Schweißlinseninnendrucks und der Spannungsverläufe möglich.

Neben der Bedingung, dass die Elektrodenkraft größer als die Rückstellkraft des Schweißlinseninnendrucks ist, muss die Schweißlinse eine noch ausreichende Wandstärke umschließen. Nach Auswertung der Schweißlinsendurchmesser und den Schweißergebnissen mit und ohne Spritzerneigung kann als Bedingung herangezogen werden, dass der Linsendurchmesser maximal der 0,8-fachen Kontaktbreite des schmalen Fügekörpers entspricht.

$$d_{L,max} \leq 0,8 b_i \quad i = I, II \quad (88)$$

Mit der Vorgabe der zentrischen Ausrichtung der Fügepartner und Elektroden ist mit der Erfüllung der beiden Bedingungen eine Spritzerbildung auszuschließen.

6.8 Integration der Berechnungsbausteine zu einem Gesamtmodell

Die in den Kapiteln 6.1 bis 6.7 erarbeiteten Ergebnisse sind in ein Gesamtmodell zu übertragen. Durch die zum Teil gegenseitige Abhängigkeit der Berechnungen, ist eine funktionsanalytische Lösung der Problematik nicht möglich, weshalb der numerische Ansatz zur Lösung verfolgt wird. Das Modell wird unter Berücksichtigung der Ablaufreihenfolge, der Funktion und des Datenflusses in Blöcke aufgeteilt.

Zur Berechnung des Prozesses stehen mehrere Hilfsmittel zur Verfügung. Bislang wurden überwiegend FE-Modelle zur Berechnung des Widerstandpunkt-schweißprozesses eingesetzt, die bereits eine gute Übereinstimmung mit den erreichten Schweißergebnissen gezeigt haben. Durch die Dauer der Modellerstellung und die langen Berechnungszeiten eignet sich diese Berechnungsmethode nicht zum Einsatz in der Probenerstellung und im Serieneinsatz, bei geforderten kurzen Reaktionszeiten. Weiterhin ist in den relevanten kleinen und mittelständischen Unternehmen der Einsatz der FE-Modelle bislang nicht üblich, so dass neben den Softwaretools auch das notwendige geschulte Personal nicht verfügbar ist.

Gerade im Labor und im Musterbau von kleinen und mittelständischen Unternehmen, die nahezu ausschließlich mit der Erstellung der Proben betraut werden, steht

Messtechniksoftware zur Verfügung. Diese ist bei vorgegebenen Berechnungsprogrammen schnell zu bedienen und gibt nach kurzer Rechenzeit das Ergebnis aus. Deshalb wird in dieser Arbeit auf die gängige Messtechniksoftware LabView 7.0 zurückgegriffen.

Das verwendete Simulationstool LabView unterstützt den Benutzer nicht in der Modellierung. Da in kleinen und mittelständischen Unternehmen in der Regel kein ausgebildetes Personal zur Modellbildung zur Verfügung steht, ist die Schnittstelle zum Bediener auf die Eingabe der geometrischen Daten, der Prozessparameter und der Materialkennwerte zu begrenzen. Weiterhin ist die Ausgabe auf das Ergebnis der Festigkeitsbetrachtung zu beschränken. Das Programm wird aus den in Abbildung 6.1-1 dargestellten Funktionsblöcken aufgebaut. Die Funktionsblöcke sind gemäß Abbildung 6.8-1 verschaltet.

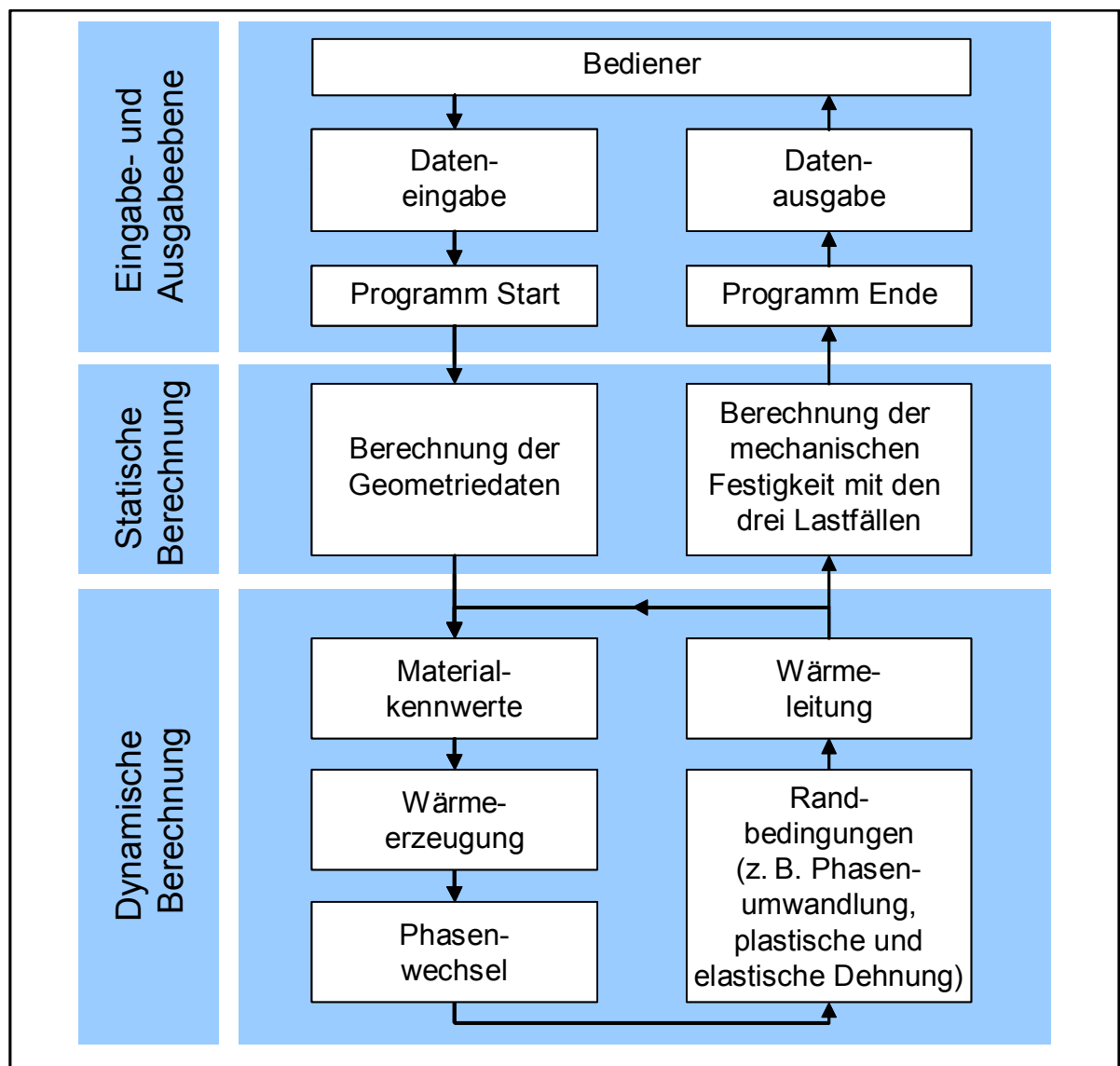


Abbildung 6.8-1: Berechnungsablauf

Zur Reduzierung des Rechenaufwands wird das 3-D-Problem in ein 2-D-Modell mit Spiegelung an der Mittelachse unter Berücksichtigung der Änderungen im Stoff- und Übergangswiderstand überführt. Durch die Anpassung der Widerstände ist ebenfalls eine Anpassung der Stromstärke und der Stromdichte vorzunehmen.

Die Wärmeleitung kennzeichnet zwei Bereiche. An den Kontaktstellen zur Elektrode und an der Modellgrenze innerhalb des Leiters ist ein Wärmetransport möglich. Der Rand entspricht einem Dirichlet-Rand mit für die Dauer eines Simulationsschrittes fester Randtemperatur. Im zweiten Bereich an der isolierten Fläche sowie an der Symmetrieachse erlaubt keinen Wärmetransport über die Systemgrenzen hinaus. Weiterhin wird zur Reduzierung des Rechenaufwands auf die Berechnung der Temperatur verzichtet und die Wärmemenge als Bezugsgröße verwendet. Die Wärmeleitung wird über das explizite Verfahren durch den Aufbau eines 5-Punkt-Sterns mit festem Raster nach Abbildung 6.8-2 vorgenommen werden.

Blockdiagramm des Haupt-VIs

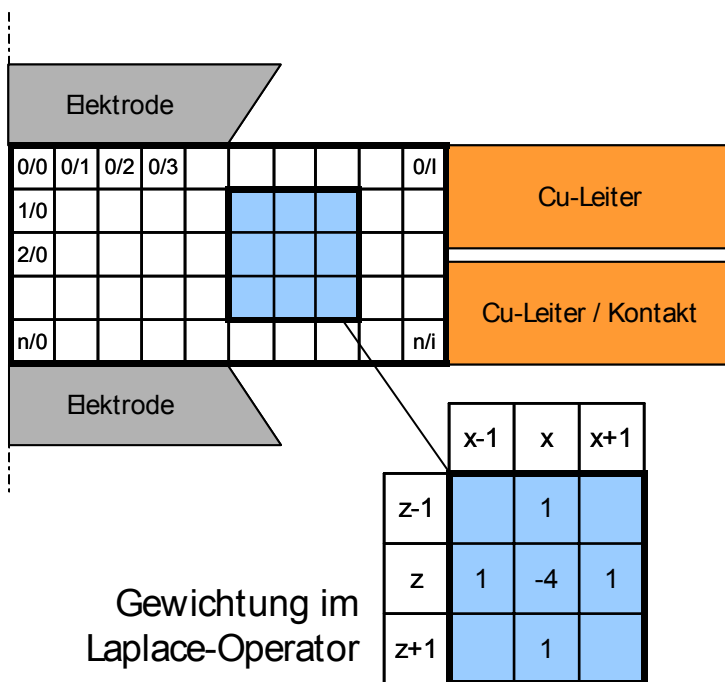
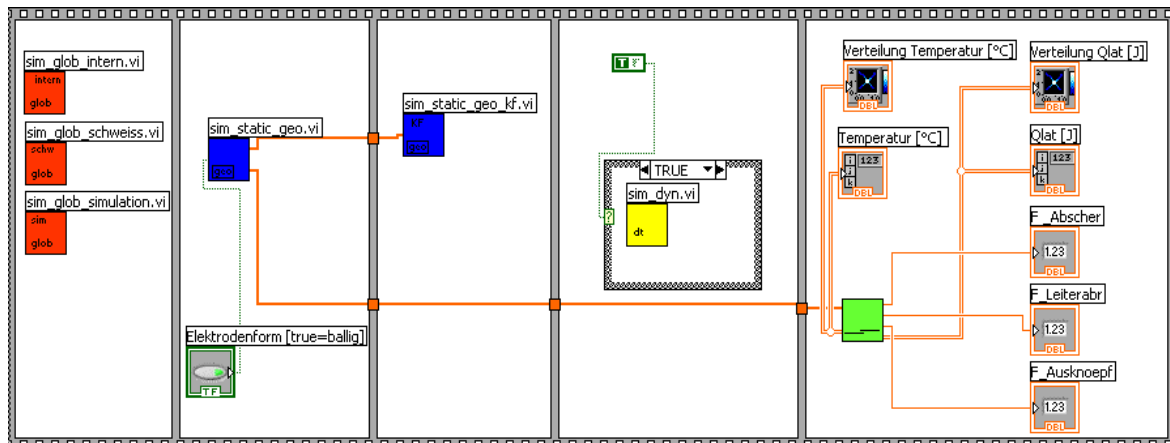


Abbildung 6.8-2: Modell Wärmeleitung

Die äußeren Punkte des 5-Punkt-Sterns werden im Wert des Laplace-Operators einfach gewichtet, während der Mittenwert 4-fach einght.

Der angenäherte Laplace-Operator ergibt sich somit zu

$$\Delta T_d = \frac{1 \cdot f(x, z-1) + 1 \cdot f(x-1, z) + 1 \cdot f(x+1, z) + 1 \cdot f(x, z+1) - 4 \cdot f(x, z)}{d_{x,z}^2} \quad (89)$$

ΔT_d = Laplace Operator

$f(x,z)$ = Temperatur an der Stelle x, z im Temperaturfeld

$d_{x,z}$ = Ortsauflösung, Abstand der Gitterpunkte

Die Temperatur zu einem Zeitpunkt $t+1$ kann aufbauend auf den Laplace-Operator für kleine Zeitschritte über folgenden Zusammenhang ermittelt werden

$$T_{t+1} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \cdot \Delta T_d \cdot d_t + T_t \quad (90)$$

T_t = Temperatur zum Zeitpunkt t

T_{t+1} = Temperatur zum Zeitpunkt $t+1$

d_t = Zeitschrittweite

In der Phasenumwandlung ist die latente Wärme zu berücksichtigen. Bei Erreichung der Schmelztemperatur wird die entstehende Wärme in einen Speicher geschrieben. Sobald der Speicher mit dem Betrag der latenten Wärme beschrieben ist, wird die weitere Temperaturerhöhung fortgeführt.

Vor der dynamischen Berechnung des Schweißprozesses, sind die notwendigen geometrischen Daten und Werkstoffkennwerte in der Eingabemaske (Abbildung 6.8-3) einzugeben. Die eingegebenen Daten werden in der ersten statischen Berechnung weiter verarbeitet und der dynamischen Berechnung bereitgestellt.

Das gesamte Modell wird durch ein festes Raster aufgebaut. Die Rasterung des in diesem Fall betrachteten Bereichs von 0,5 mm auf 0,3 mm wird durch 100 x 60 Punkten aufgelöst.

Im anschließenden dynamischen Teil werden die Wärmeentstehung und -leitung sowie die Phasenumwandlung berechnet. Nach Ablauf der Schweißzeit werden die Daten der statischen Festigkeitsberechnung bereitgestellt. Die ermittelte Scherzugfestigkeit des berechneten Kontakts wird dem Bediener angezeigt.

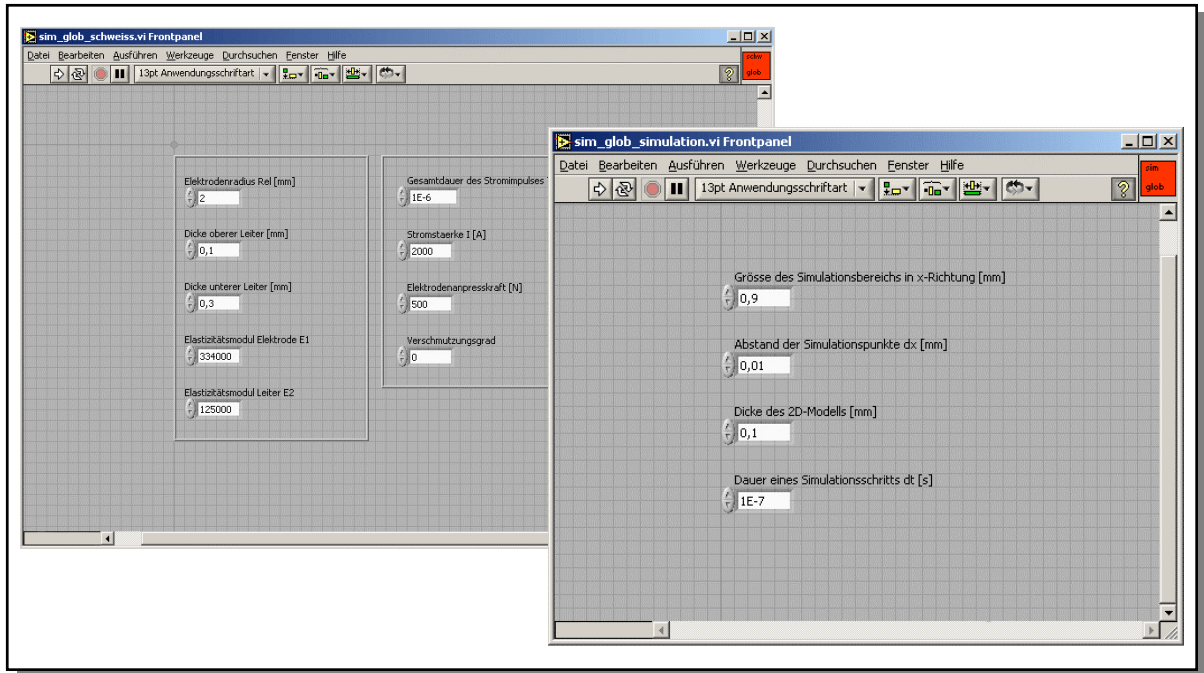


Abbildung 6.8-3: Eingabemaske Programm

Das eingesetzte explizite Verfahren ist durch eine eingeschränkte Stabilität gekennzeichnet. Als Stabilitätskriterium ergibt sich bei fest vorgegebener Raumdiskretisierung folgende Bedingung für die Zeitschritte:

$$d_t \leq \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot c}{\lambda} \cdot d_{x,z}^2 \quad (91)$$

Die Bedingung wird in der Ermittlung der Zeitschrittweite berücksichtigt und verhindert somit Stabilitätsprobleme in der Berechnung.

6.9 Validierung des Berechnungsverfahrens

Nachfolgend wird sowohl der berechnete Übergangswiderstand als Bezugsgröße zur Wärmeerzeugung, als auch die ermittelte Scherzugfestigkeit der Kontakte validiert. Die simulierten Werte werden den Versuchsergebnissen gegenübergestellt. Die zugrundegelegten Werkstoffkennwerte der Kupferleiter sowie der Molybdänelektroden sind folgender Tabelle zu entnehmen.

	Kupfer	Molybdän
Elektrische Leitfähigkeit [$\text{m } \Omega^{-1} \text{ mm}^{-2}$]	58	20
Wärmeleitfähigkeit [$\text{W K}^{-1} \text{ m}^{-1}$]	395	147
Dichte [kg dm^{-3}]	8,9	10,2
Schmelzpunkt [$^{\circ}\text{C}$]	1083	2625
Längenausdehnung (0 .. 100 $^{\circ}\text{C}$) [K^{-1}]	$16,5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$
Elastizitätsmodul [GPa]	125	334

Abbildung 6.9-1: Werkstoffkennwerte bei 20 $^{\circ}\text{C}$ nach /IGN-95/

6.9.1 Prozessvoraussetzungen zur numerischen Berechnung

Um die Gültigkeit der Berechnung zu gewährleisten, sind vom Prozess mehrere Randbedingungen zu erfüllen. Die drei zu bestimmenden Prozessparameter Elektrodenanpresskraft, Schweißstrom sowie Schweißzeit müssen über den Prozess die geforderte Konstanz aufweisen. Die Schweißzeit wird in der Anlagensteuerung vorgegeben und wird mit ausreichender Genauigkeit eingehalten. Eine nähere Betrachtung des Parameters ist somit nicht notwendig.

Die Elektrodenanpresskraft hingegen unterliegt in der Anfangsphase über der Zeit einer Veränderung. In Abbildung 6.9.1-1 ist exemplarisch der Verlauf der Anpresskraft über der Zeit zu entnehmen.

Zur Berechnung des Schweißprozesses ist deshalb eine minimale Vorhaltezeit zur Erreichung konstanter Elektrodenanpresskräfte zu gewährleisten. Im Beispiel aus Abbildung 6.9.1-1 entspricht dies einer minimalen Vorhaltezeit von größer 0,7 s. Nach den 0,7 s stellt sich eine konstante Elektrodenanpresskraft von 225 N ein.

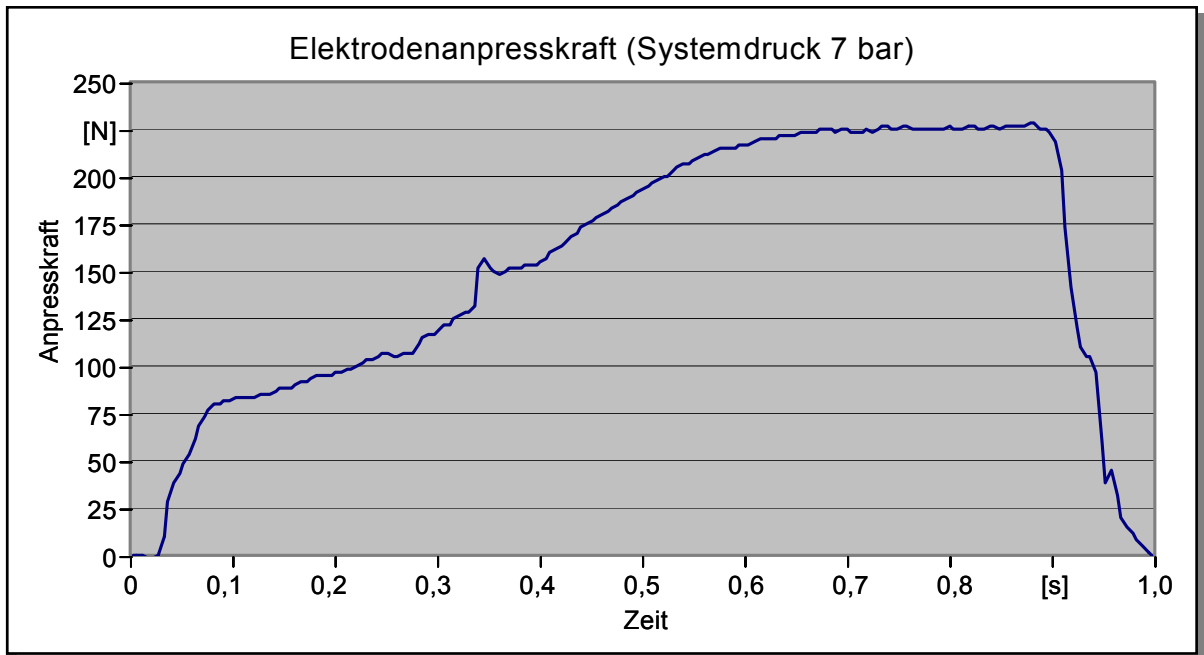


Abbildung 6.9.1-1: Verlauf der Elektrodenanpresskraft

Die aufgenommenen Schweißstromkurven zeigen mit Ausnahme einer zu vernachlässigenden Einlaufphase eine konstante Stromstärke über der Schweißdauer. Sowohl bei der Schweißanlage mit 50 Hz, als auch bei der Schweißanlage mit 1.000 Hz wird schnell die vorgegebene Stromstärke erreicht. Ein Beispiel der Stromkurve zeigt Abbildung 6.9.1-2.

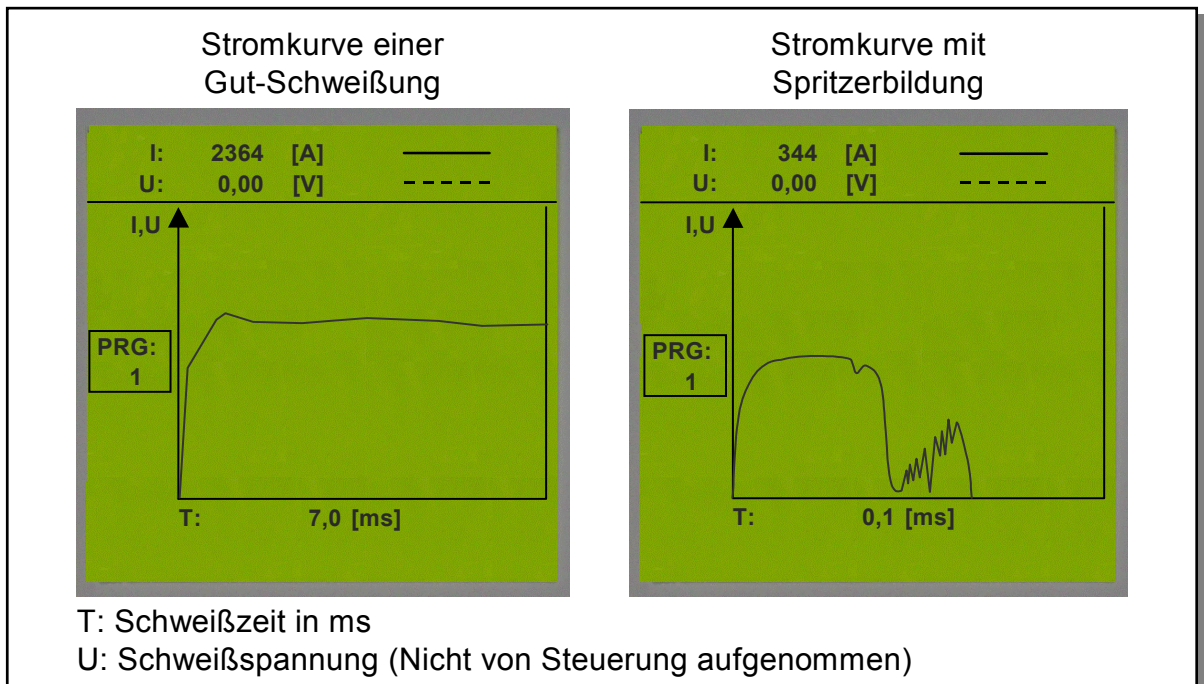


Abbildung 6.9.1-2: Stromverlauf im Schweißprozess

In der rechten Darstellung ist ein Verlauf mit Spritzerbildung dargestellt. Diese Prozessparametersätze sind durch die Berechnung auszuschließen. Darüber hinaus ist die Ermittlung der Spritzerbildung durch eine Verfolgung des Stromverlaufs möglich und kann dem Bedienpersonal angezeigt werden.

Abschließend ist festzuhalten, dass unter Berücksichtigung einer minimalen Vorhaltezeit die notwendige Konstanz der Elektrodenanpresskraft gewährleistet werden kann. Darüber hinaus ist der Stromverlauf in ausreichender Weise gleich bleibend, um die Bedingungen der Berechnung zu erfüllen.

6.9.2 Abstimmung der Übergangswiderstände

In der Anfangsphase des Fügeprozesses wird der Übergangswiderstand neben den Materialkennwerten durch die geometrischen Randbedingungen, die Oberflächenverschmutzung sowie der Kraftbeaufschlagung beeinflusst. Diese Einflussfaktoren sind in den Korrekturfaktoren der Übergangswiderstandermittlung berücksichtigt. Bereits nach kurzer Zeit tritt ein Zusammenbruch des Übergangswiderstands ein, der zu deutlich geringeren Übergangswiderstandswerten ohne Einfluss der vorherigen Oberflächenrauigkeit und Oberflächenverschmutzung führt.

Die Übergangswiderstände nach dem Zusammenbruch hängen wesentlich von der Genauigkeit der vorliegenden Materialkennwerte ab. Diese konnten im vorliegenden Fall direkt vom Hersteller bezogen werden, so dass keine nennenswerten Abweichungen auftreten.

In der Anfangsphase des Fügeprozesses ist die Abweichung der berechneten Kennwerte mit bis zu $\pm 8\%$ höher als in der Phase nach dem Zusammenbruch des Übergangswiderstands. Dabei ist zu bemerken, dass in den relevanten Bereichen der Parameterermittlung um die maximale Scherzugfestigkeit der Fügestellen die Genauigkeit von $\pm 5\%$ erreicht wird und in den Randgebieten die genannten $\pm 8\%$ Abweichung vorliegen können. Neben dem Einfluss der Materialkennwerten treten die Einflüsse der Oberflächenverschmutzung, der Oberflächenrauigkeit, der Genauigkeit der Elektrodengeometrie sowie der Anpresskraft auf. Da die berechneten Werte sowohl geringfügig über, als auch geringfügig unterhalb der gemessenen Linie liegen, ist von einer guten Übereinstimmung der berechneten Werte mit den reellen Werten auszugehen. Die Abweichungen sind auf Ungenauigkeiten der Messtechnik in den Versuchsreihen zurückzuführen.

6.9.3 Vergleich der ermittelten Fügeparameter mit experimentellen Untersuchungen

Die wesentliche Beurteilungsgröße der Kontakteigenschaften ist die Scherzugfestigkeit der erzeugten Kontaktstelle. In der nachfolgenden Tabelle sind vergleichend die ermittelten Scherzugfestigkeiten der Versuche und die berechneten Scherzugfestigkeiten gegenübergestellt.

Schweißstrom [A]	Schweißzeit [ms]	Anpresskraft [N]	Festigkeit (Versuch) [N]	Festigkeit (Berechnung) [N]	Abweichung [%]
1.800	20	200	32,8	28,4	-14,4
1.800	40	200	34,7	33,4	-3,7
2.200	20	200	33,4	32,5	-2,7
2.200	40	200	35,2	33,4	-5,1
2.500	20	200	33,1	31,3	-5,4
2.500	40	200	35,8	33,6	-6,2

Abbildung 6.9.3-1: Vergleich der Scherzugfestigkeiten bei reinen Proben (VG0)

Es ist festzustellen, dass die berechneten Scherzugfestigkeiten durchgängig geringer ausfallen, als die im Versuch ermittelten Werte. Weiterhin ist durch die einseitige negative Abweichung der Werte im Vergleich der Scherzugfestigkeiten eine ausreichend genaue Bestimmung des optimalen Parametersatzes möglich.

Die Rasterung von 100 x 60 Punkten hat sich bei den berechneten Werten verglichen mit den Versuchen als ausreichend herausgestellt. Die festgestellten Abweichungen zwischen den Berechnungsergebnissen und den Versuchsergebnissen sind zum einen auf die Vereinfachungen im Modell, aber auch auf Schwankungen in den Versuchsbedingungen bzw. den Toleranzen in den Scherzugversuchen zurückzuführen.

6.10 Bestimmung der Fügeparameter aus den ermittelten Größen der Oberflächenanalyse

Der nur wenige Millisekunden dauernde Schweißprozess erlaubt bei der aktuellen Leistungsfähigkeit der Berechnungsverfahren keine Inline-Herleitung der Prozessparameter. Aus diesem Grund werden Kennlinien für die drei wichtigsten Prozessparameter definiert und in der Schweißprozesssteuerung hinterlegt. In einer

Vorausberechnung werden die optimalen Prozessparameter in Abhängigkeit von der Oberflächenverschmutzung bestimmt.

Aus den Berechnungen des Gesamtmodells ergeben sich die nachfolgend dargestellten Kennlinien für die Stellgrößen Elektrodenanpresskraft, Schweißstrom sowie Schweißzeit. Vergleichend sind diese aus den in Kapitel 5 experimentell ermittelten optimalen Prozessparametern gegenübergestellt.

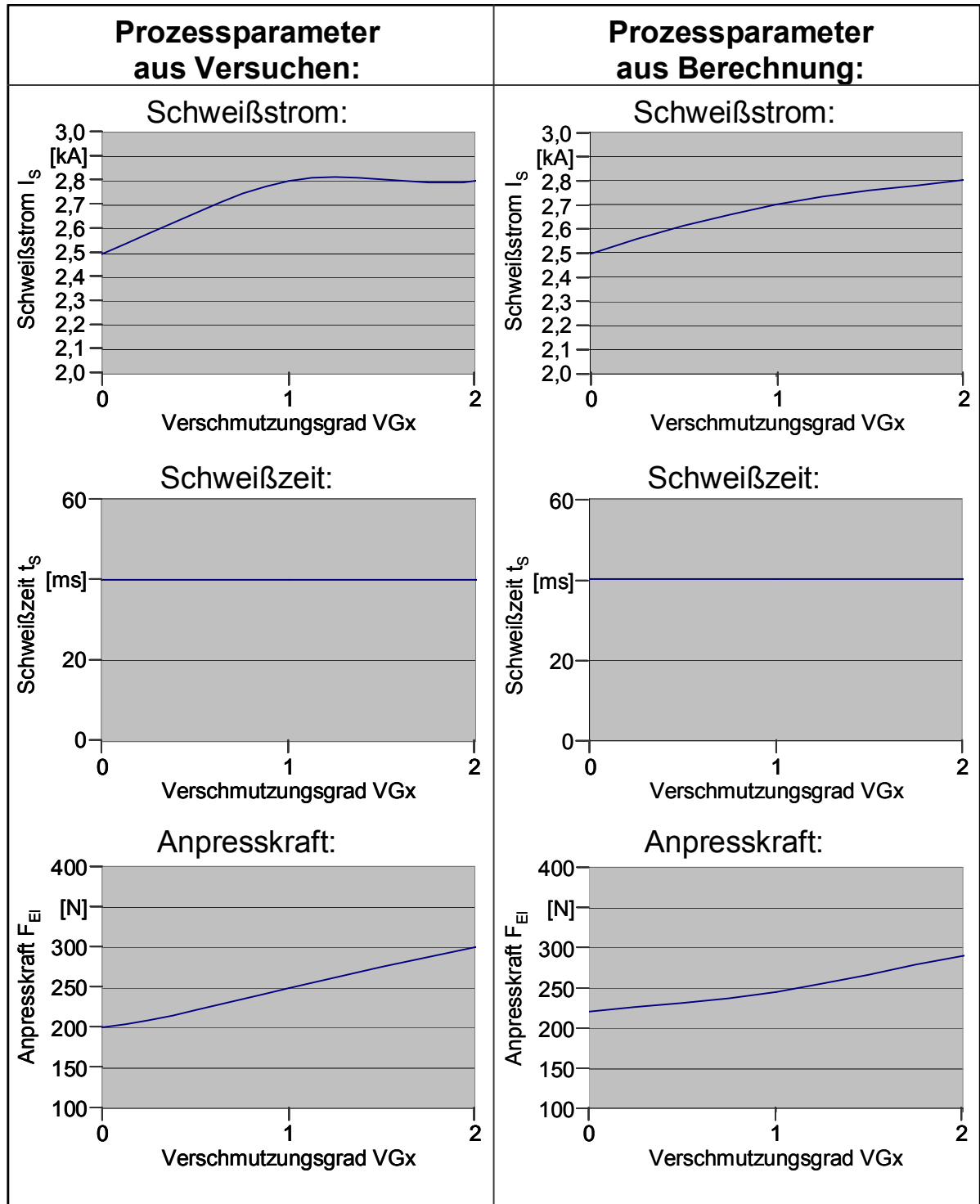


Abbildung 6.10-1: Kennlinien der optimalen Prozessparameter

Die Gegenüberstellung zeigt eine deutliche Übereinstimmung der berechneten Prozessparameter mit den experimentell ermittelten Werten. Um die Allgemeingültigkeit des Verfahrens nachzuweisen, wurden weitere, von den experimentell eingesetzten Fügepartnern in Werkstoff und Geometrien abweichende Kombinationen mit differierenden Verschmutzungsgraden geschweißt. Diese Kombinationen zeigten ebenfalls eine gute Übereinstimmung mit einer Abweichung in der ermittelten Scherzugfestigkeit von max. 12% zwischen Berechnung und Versuch in den relevanten Prozessparameterbereichen.

7 Realisierte Pilotanlage zum automatisierten stoffschlüssigen Fügen folienisolierter Flachleiter

7.1 Gesamtaufbau der Pilotanlage

Die Erprobung der in Kapitel 4 konzipierten Verfahren und Werkzeuge erfolgt in einer realisierten Pilotanlage zum automatisierten stoffschlüssigen Fügen folienisolierter Flachleiter mit Isolationsrückständen auf den Fügeflächen. Die Prozessschritte beinhalten:

- Entnahme des Folienleiters aus dem Speicher,
- Positionierung des Folienleiters in der Fügeinheit,
- Positionierung des Trägerteils in der Fügeinheit,
- Oberflächenanalyse in der Fügezone,
- Ableitung der Prozessparameter,
- Fügen der Fügepartner und
- Entnahme des gefügten folienisolierten Flachleiters.

Die Materialbereitstellung umfasst abgelängte, abisolierte Folienleiter und Kupferträgerteile ohne Oberflächenbehandlung. Die hierfür am Markt verfügbaren Systeme zum Ablängen und Abisolieren der folienisolierten Flachleiter wurden nicht betrachtet.

Zur Bereitstellung, Handhabung, Positionierung und zum Fügen werden, soweit möglich, am Markt erhältliche Standardkomponenten verwendet. Weitere benötigte Verfahren und Werkzeuge werden entsprechend der Konzeption realisiert. Die Pilotanlage ist mit folgenden Komponenten aufgebaut:

- Bereitstellungssystem für folienisolierte Flachleiter,
- Robotergreifer für die Zuführung und Positionierung des folienisolierten Flachleiters,
- Bereitstellung, Zuführung und Positionierung der Trägerteile aus einem Magazin,
- In die Fügeinheit integriertes System zur Oberflächenanalyse und
- Fügeinheit.

Die Betriebsmittel in der Pilotanlage sind entsprechend Abbildung 7.1-1 angeordnet.

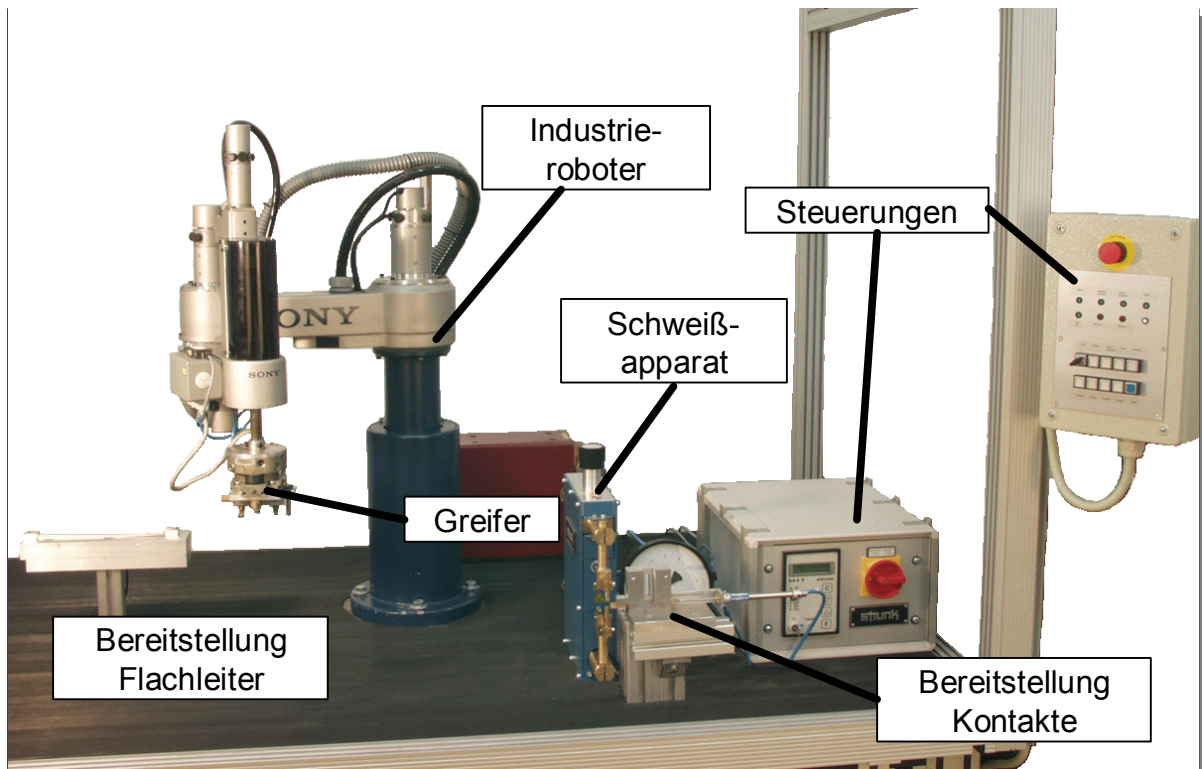


Abbildung 7.1-1: Gesamtaufbau der Pilotanlage

7.2 Eingesetzte Werkzeuge und Komponenten

7.2.1 Verwendete Komponenten

Der in Kapitel 3.1 bereits spezifizierte vierpolige laminierte, folienisolierte Flachleiter im Rastermaß 2,54 mm weist einen Leiterquerschnitt von 1,57 mm auf 0,09 mm auf. Das nicht veredelte Leitermaterial Kupfer ist beidseitig von einer 50 μm dicken Isolationsschicht aus PEN umgeben. Die Flachleiter mit einer Gesamtlänge von 220 mm sind beidseitig nach 5 mm belassener Isolation auf weiteren 5 mm mittels Laser beidseitig abisoliert. Die Restisolation am Leiterende sorgt für die notwendige Stabilität der Leiterbahnen zueinander. Um reproduzierbare Eingangsgrößen zu erhalten, werden die Fügestellenoberflächen gereinigt und mit einer definierten Schichtdicke mit Klebstoff kontaminiert. Der ausgewählte Flachleiter stellt in der Form ein repräsentatives Produkt im Bereich der Verdrahtung mit folienisolierten Flachleitungssätzen dar.

Als Kontaktstück wird ein 30 mm langer Kupferkontakt der Legierung Wieland K14 F20 ohne Oberflächenveredelung mit einem Querschnitt von 1,80 mm auf 0,30 mm verwendet. Die Fügepartneroberfläche wird ebenfalls gereinigt, um reproduzierbare Eingangsbedingungen zu gewährleisten.

7.2.2 Bereitstellung und Zuführung der Komponenten

Die Bereitstellung des abisolierten folienisolierten Flachleiters und des Trägerteils erfolgt über für diesen Anwendungsfall entwickelte Magazine. Während der folienisolierte Flachleiter mit dem in Kapitel 7.2.3 beschriebenen Handhabungssystem aus dem Magazin entnommen und der Fügeeinheit zugeführt wird, erfolgt die Zuführung und Positionierung des Trägerteils über einen auf die Kontaktgeometrie abgestimmten Schieber. Dieser wird durch einen Pneumatikzylinder der Firma Festo betätigt. Beide Bereitstellungseinheiten sind in Abbildung 7.2.2-1 dargestellt. Die Anwesenheit der Folienleiter im Magazin wird über einen Näherungsschalter überprüft, die Zuführung des Trägerteils wird über den Durchgangswiderstand in der Oberflächenanalyse detektiert.

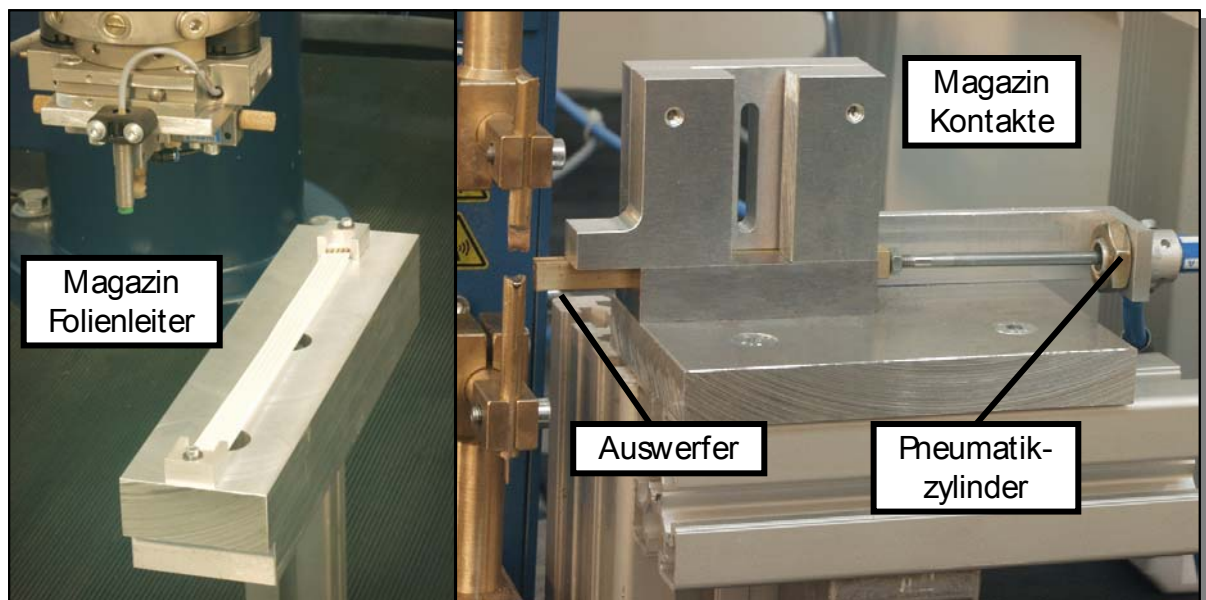


Abbildung 7.2.2-1: Bereitstellungseinheiten

7.2.3 Eingesetztes Handhabungssystem

Die Handhabung und Positionierung des abisolierten folienisolierten Flachleiters wird über einen Sony-SCARA-Roboter SRX-4CH vorgenommen. Die vier frei programmierbaren Achsen sind bei einer Wiederholgenauigkeit von $\pm 0,05$ mm bei einer maximalen Tragfähigkeit von 3 kg zu bewegen. Die Maximalgeschwindigkeit des ersten und zweiten Armes beträgt 5,2 m/sec und die Geschwindigkeit der z-Achse 300 mm/sec. Die Rotationsachse hat eine Rotationsgeschwindigkeit von $720^\circ/\text{sec}$.

Der Vakuumgreifer mit Komponenten der Firma Festo ist über ein Werkzeugwechselsystem der Firma Schunk mit dem Handhabungssystem

verbunden. Neben der sicheren Aufnahme, Handhabung und Positionierung des folienisolierten Flachleiters ist die Anwesenheit des Leiters detektierbar.

7.2.4 System zur Oberflächenanalyse

Zur Oberflächenanalyse werden die Messleitungen an den gereinigten Elektroden kraftschlüssig kontaktiert. Die Aufnahme des Übergangswiderstands erfolgt über das Datenaufnahmegerät 34970 A der Firma Agilent und den 16-Kanal-Multiplexer 34902 A der Firma hp. Eine Auswertung der Daten und Ermittlung der aktualisierten Prozessdaten erfolgt im angeschlossenen PC.

7.2.5 Verwendete Fügeeinheit

Das Fügen der folienisolierten Flachleiter und der Trägerteile wird über die in Kapitel 5 beschriebene Mikro-Schweißanlage des Typs MSM 12/1 der Firma Strunk vorgenommen. Die pneumatisch betriebene Schweißzange ist für Anpresskräfte von bis zu 3.000 N ausgelegt. Weitere technische Daten sind folgender Auflistung zu entnehmen:

- Anschlussleistung 62,4 kVA
- Nennleistung 20 kVA
- Nenn-Primärspannung 400 V
- Nennfrequenz 50 Hz
- Sekundärer Betriebsstrom max. 6,7 kA
- Sekundärer Kurzschlussstrom 25 kA
- Sekundäre Leerlaufspannung bis zu 4 V

7.3 Steuerungskonfiguration der Gesamtanlage

Die am Markt verbreiteten SPS sind für den hier dargestellten Einsatz überdimensioniert und kostenintensiv. Deshalb wird die integrierte Robotersteuerung mit den 36 Ein- und 28 Ausgängen auf die Aufgabe angepasst. Die Gesamtsteuerung ist in drei Ebenen zu unterteilen:

- Mensch-Maschine Schnittstelle (Ein- und Ausgabebene),
- Steuerungsebene und
- Ausführungs- / Prozessebene.

Die Struktur mit den Schnittstellen ist Abbildung 7.3-1 zu entnehmen. Die Ein- und Ausgabebene ist die Schnittstelle zwischen der Pilotanlage und dem Bediener. Der Bediener kann über das Bedienpanel Aktionen auslösen bzw. stoppen. Im Display

bekommt der Bediener Rückmeldung über den Stand der Bearbeitung sowie Fehlermeldungen. In der Steuerungsebene sind die Speicherprogrammierbare Steuerung und die hinterlegten Kennfelder mit den von der Oberflächenverschmutzung abhängigen Prozessparametern hinterlegt. Der Industrieroboter, die Schweißeinrichtung, die Bereitstellungseinheiten sowie die zur Überwachung und Steuerung eingesetzten Aktoren und Sensoren gehören zur Ausführungsebene.

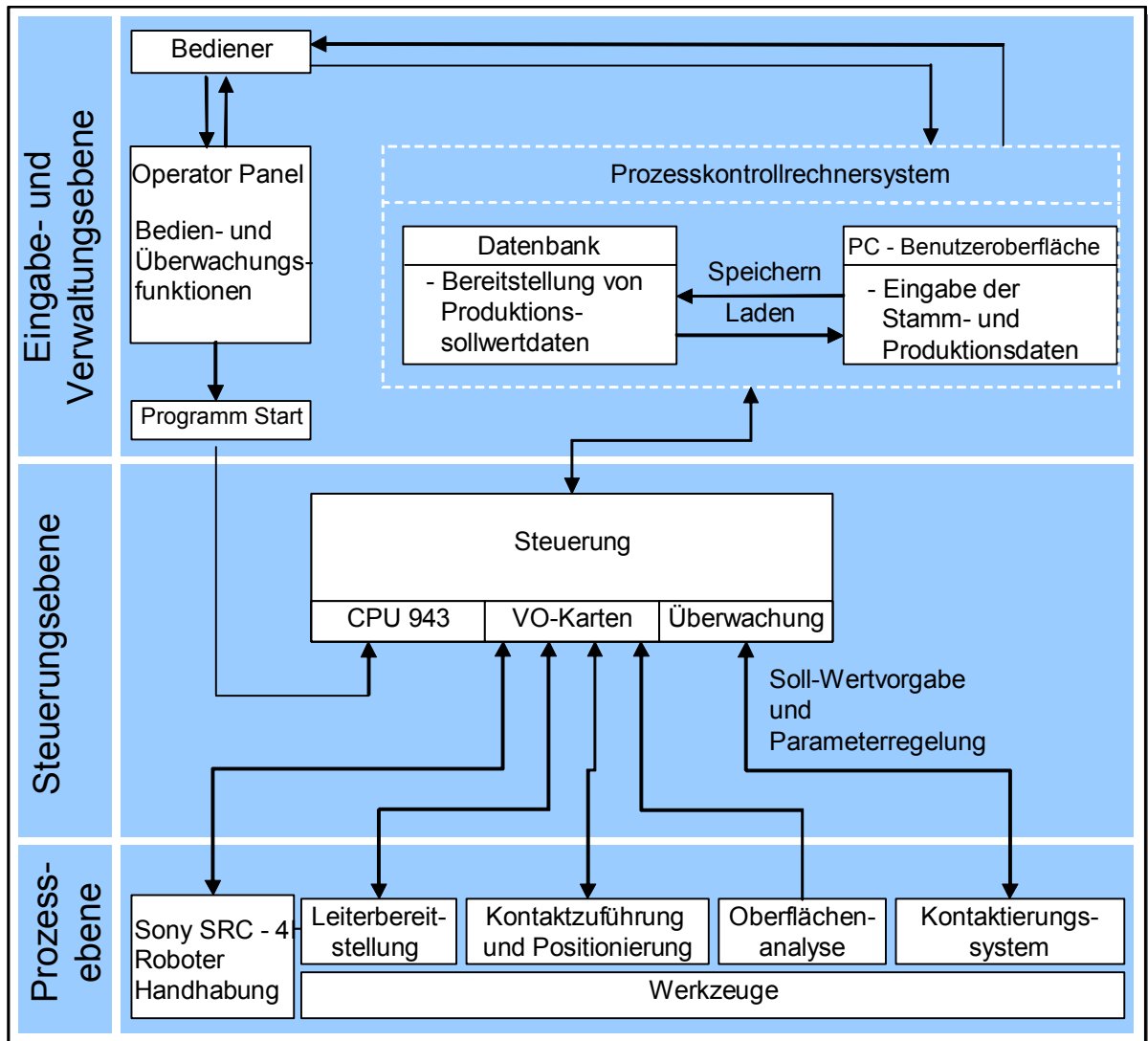


Abbildung 7.3-1: Steuerungsstruktur der Pilotanlage

Der Bewegungsablauf des Industrieroboters wurde im Teach-In-Verfahren erstellt und mit den weiteren notwendigen Komponenten zu nachfolgend dargestellten Programmablauf verknüpft.

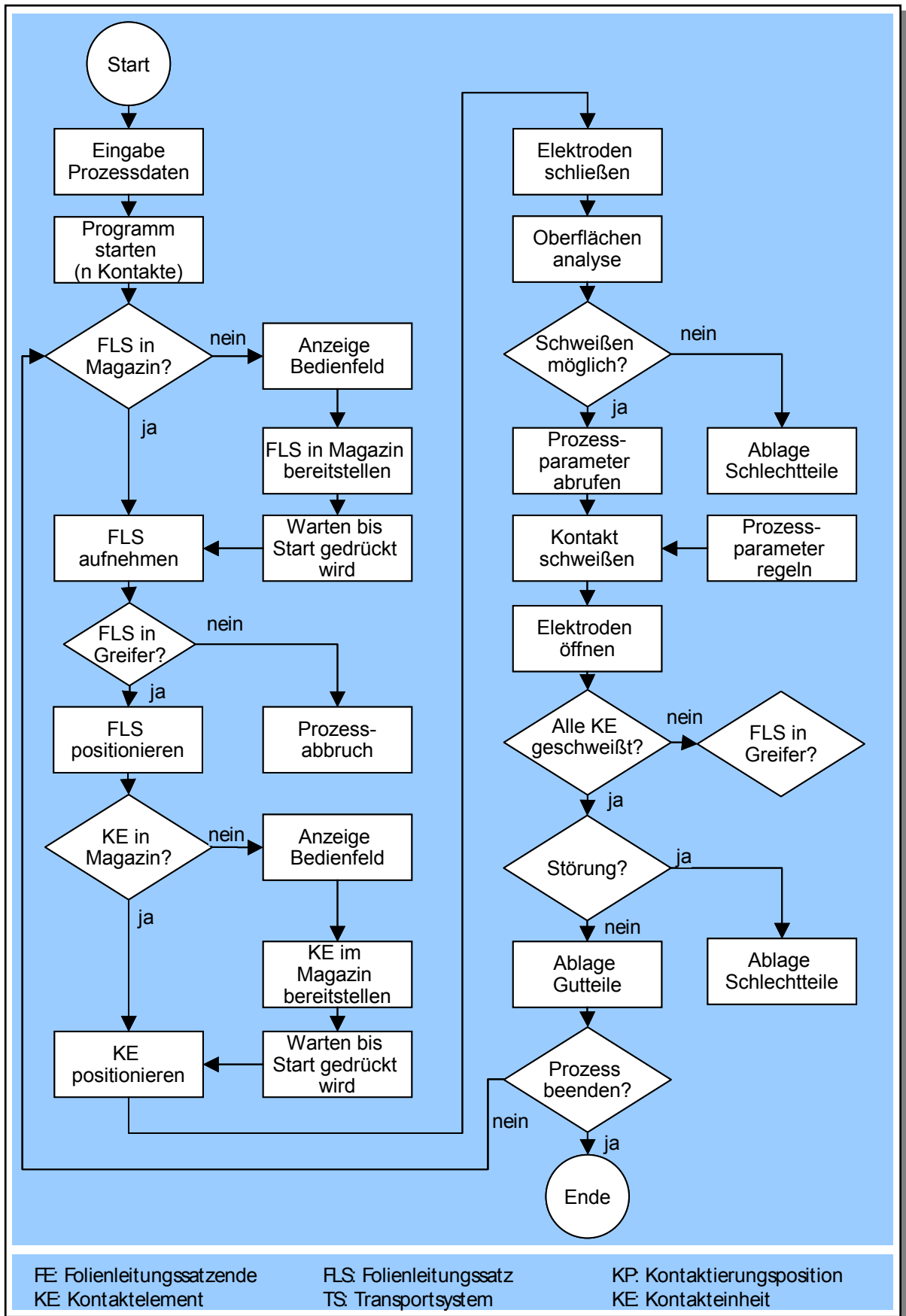


Abbildung 7.3-2: Programmablauf der Versuchsanlage

Der Programmablauf stellt den Fügevorgang eines vierpoligen folienisolierten Flachleiters dar.

7.4 Arbeitsablauf der Pilotanlage

Die Programmierung erfolgt durch den Bediener, der den Arbeitsablauf des Fügevorgangs in der Robotersteuerung hinterlegt. Der Roboter führt dabei folgende Arbeitsschritte durch:

1. Aufnehmen des folienisolierten Flachleiters aus dem Magazin mittels Sauggreifer
2. Positionieren des folienisolierten Flachleiters in der Schweißanlage
3. Positionieren des Trägerteils in der Schweißanlage aus dem Magazin mittels Pneumatikschieber
4. Zustellen der Elektroden
5. Aufnahme des Übergangswiderstands
6. Ableitung der Prozessparameter
7. Schweißen der Fügepartner
8. Öffnen der Elektroden
9. Wiederholung der Prozessschritte 2. bis 8. entsprechend der Polzahl des Flachleiters
10. Entnahme und Ablage des kontaktierten Flachleiters

7.5 Versuchsergebnisse

Nachdem die prinzipielle Berechnung in Kapitel 6 validiert wurde, wird in diesem Kapitel der Anlagenaufbau und –ablauf analysiert und bewertet. Zur Überprüfung werden 200 folienisolierte Flachleiter gemäß der Spezifikation aus Kapitel 3 kontaktiert und die aufgenommenen Prozessabläufe ausgewertet. Die aufgetretenen Taktzeiten, Fehlerarten und –häufigkeiten sowie die abgeleiteten Verbesserungspotenziale sind im Folgenden dargestellt.

7.5.1 Taktzeiten

Die im Prozessablauf ermittelten mittleren Taktzeiten der einzelnen Prozessschritte sind in Abbildung 7.5.1-1 dargestellt. Die Zeiten dienen als Plangrößen zur Integration der Pilotanlage in Konfektionierungsanlagen. Weiterhin kann über die Zeitanalyse und Auswertung der Prozess-, Handhabungs- und Nebenzeiten Verbesserungspotenzial in der Anlage erschlossen werden.

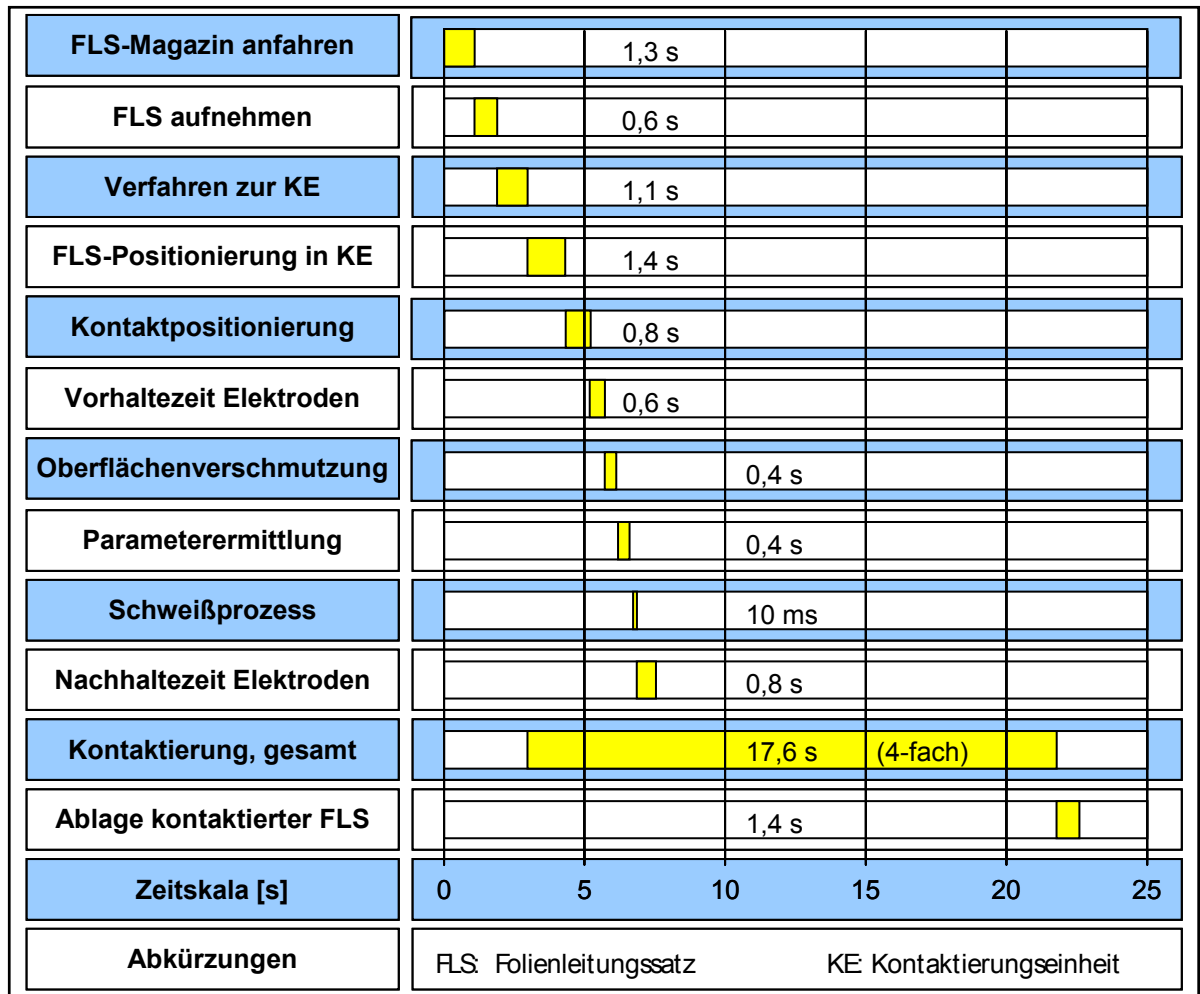


Abbildung 7.5.1-1: Taktzeiten

Das größte Optimierungspotenzial ist in der Handhabung der folienisolierten Flachleiter zu sehen. Durch eine geänderte Anordnung der Bereitstellungssysteme und eine Erhöhung der Verfahrensgeschwindigkeit des Roboters ist eine deutliche Reduzierung zu erreichen. Durch den Einsatz mehrerer Handhabungseinheiten kann durch eine Parallelisierung der Prozesse eine Zeitreduzierung erreichen.

7.5.2 Systemverfügbarkeit

Die durchgeführten Fügeprozesse folienisolierter Flachleiter in der Pilotanlage zeigen die in Abbildung 7.5.2-1 aufgetretenen Fehlerarten und -häufigkeiten. Der Hauptanteil der Fehler stellt die Trägerteilzuführung und Positionierung. Dies ist auf die manuelle Vorbereitung der Trägerteile zurückzuführen. Das Abschlagen der Trägerteile aus Bandmaterial verursacht Scherkanten an den Rändern, die je nach Lage im Magazin das Gleitverhalten und das Verhaken im Magazin beeinflussen. Darüber hinaus ist durch die manuelle Positionierung des Bandmaterials in der Abschlagschere eine weitere Toleranz in den Trägerteilabmessungen festzustellen. Diese sorgt im Ausschubvorgang aus dem Magazin für ein verkanten.

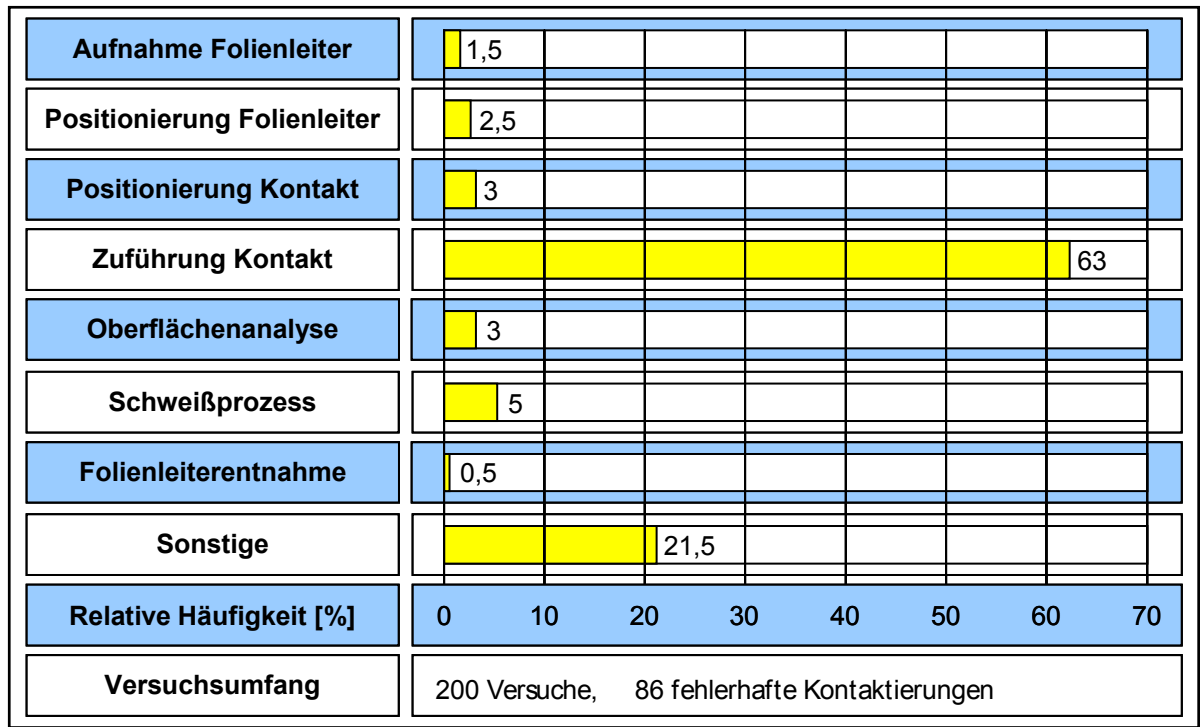


Abbildung 7.5.2-1: Häufigkeit und Verteilung der in der Versuchsphase aufgetretenen Fehler

Die auftretenden Störungen sind demnach auf den prototypischen Aufbau der Anlage und die manuelle Vorbereitung der Trägerteile und nicht auf die Konzeption und Entwicklung zurückzuführen.

7.6 Folgerung aus den Versuchen

Die Einsatzmöglichkeiten der entwickelten Verfahren zum stoffschlüssigen Fügen der folienisolierten Flachleiter bei höchstmöglicher Scherzugfestigkeit konnten durch die Versuchsergebnisse bestätigt werden. Der bisherige Nachteil der schwankenden mechanischen Festigkeiten der Fügestelle konnte für die bestimmten Fügepartner durch die entwickelten Verfahren und Werkzeuge beseitigt werden.

Durch den Einsatz einer kostengünstigen Berechnungssoftware und Zugrundelegung des Berechnungsverfahrens bei Verwendung weitestgehend am Markt verfügbarer Komponenten wurde die Realisierung einer Versuchsanlage zur Erreichung höchstmöglicher mechanischer Scherzugfestigkeit möglich.

Zum industriellen Serieneinsatz sind die in Kapitel 7.5.2 aufgeführten Optimierungspotenziale zu erschließen, die eingesetzten Magazine produktflexibel auszulegen und das Zuführsystem der Trägerteile auf gängige Steckverbinderkontakte zu erweitern.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Der Einsatz folienisolierter Leiter eignet sich besonders für Anwendungen, bei denen der Bauraum und das Gewicht konventioneller Leitungssätze und Leitungssatzanteile reduziert werden müssen. Die Haupteinsatzbereiche liegen demnach in der Automobilindustrie, der Luft- und Raumfahrt sowie der Elektroindustrie, die durch eine zunehmende Miniaturisierung der Bauteile, eine steigende Ausstattung mit Funktionen und die Notwendigkeit zur Gewichtsreduzierung geprägt sind. Der hieraus zu erwartende steigende Einsatz der folienisolierten Flachleiter, der sich bereits in den letzten Jahren abgezeichnet hat, verlangt nach automatisierten Fügeverfahren mit Erfüllung der elektrischen Anforderungen und Erreichung der höchstmöglichen mechanischen Festigkeit.

Ziel der Arbeit ist es, montage-technische Automatisierungslösungen zum stoffschlüssigen Fügen folienisolierter Flachleiter in kleinen und mittelständischen Unternehmen zu erarbeiten. Schwerpunkt der Arbeit ist die Ableitung der optimalen Fügeparameter aus einer vorherigen Oberflächenanalyse zur Sicherung einer gleichbleibenden Scherzugfestigkeit der Kontakte. Das zugrundeliegende Berechnungsverfahren wurde durch die systematische Entwicklung wissenschaftlicher Grundlagen in der Oberflächendetektion, der Berechnung des Prozessablaufs, der Ermittlung der Scherzugfestigkeit der Kontakte und der Ableitung von Fügeparametern erstellt.

Ausgehend von einer Analyse des Standes der Technik beim Fügen folienisolierter Flachleiter wird im Rahmen von Expertengesprächen mit Konfektionären, Herstellern folienisolierter Leiter und Kontaktherstellern der Ist-Zustand beim Fügen folienisolierter Flachleiter untersucht. Insbesondere werden die unterschiedlichen Abisolier- und Fügeverfahren, die eingesetzten Komponenten, Montagevorgänge, auftretende Fehler sowie Automatisierungshemmnisse ermittelt und basierend darauf die Anforderungen an ein automatisiertes System zum Fügen von folienisolierten Flachleitern bei höchstmöglicher Scherzugfestigkeit abgeleitet. Die technischen und organisatorischen Automatisierungshemmnisse beinhalten die Handhabung und Positionierung der biegeschlaffen folienisolierten Flachleiter, die Bestimmung der Oberflächenreinheit der abisolierten Fläche sowie die hohe Typen- und Variantenvielfalt bei geringen Stückzahlen. Die Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Prozessparameter werden auf den Einsatz in kleinen und mittelständischen Unternehmen geprüft.

In Voruntersuchungen werden die zur Verfügung stehenden Abisolier- und Fügeverfahren in Kombination auf ihre Eignung für einen Einsatz zum automatisierten Fügen folienisolierter Flachleiter untersucht. Durch die geforderte universelle Einsetzbarkeit des Verfahrens, wird keine Einschränkung in den

Abisolierverfahren vorgenommen. Die besten mechanischen und elektrischen Eigenschaften unter den Fügeverfahren werden mit dem für weitere Untersuchungen ausgesuchten Widerstandpunktschweißen erreicht.

Unter Berücksichtigung des ausgewählten Verfahrens werden die notwendigen Untersuchungs- und Entwicklungsschwerpunkte abgeleitet. Diese umfassen

- die Handhabung und Positionierung der laminierten, folienisolierten Leiter,
- die Bestimmung der Oberflächenrückstände und die Vorausberechnung der Prozessparameter im Fügeprozess sowie
- das Fügen und die Überwachung der Prozessparameter.

Der durch kleine und mittelständische Unternehmen geprägte Markt der Konfektionäre ist nicht in der Lage, für diese Programme das spezialisierte Personal vorzuhalten. Deshalb ist ein intuitiv bedienbares Softwaretool zu entwickeln, das die Intelligenz im Programm beinhaltet und nicht in der Modellerstellung verlangt. Zur Vorausberechnung der Prozessparameter ist die Aufnahme der Abisolationsrückstände notwendig. Das eingesetzte Verfahren ist sowohl in der Lage, geringe Schichtdicken in kurzen Taktzeiten feststellen, als auch eine Aussage über die mögliche Weiterverarbeitung zu treffen. Basierend auf diesen Ergebnissen ist die Berechnung der Parameter des Fügeprozesses möglich.

Die entwickelten Verfahren und Werkzeuge wurden in den Teilsystemen zum Handling folienisolierter Flachleiter, zur Beurteilung der abisolierten Stelle sowie zum Fügen konzipiert und in einer Versuchszelle realisiert. Unter Verwendung typischer Komponenten wurde die technische Machbarkeit des prozessüberwachten Fügens nachgewiesen und eine hohe Verfügbarkeit und gute Wirtschaftlichkeit in den durchgeführten Versuchsreihen und der Erprobung im Dauerbetrieb gezeigt. Das entwickelte Berechnungsverfahren, das unter Berücksichtigung unterschiedlicher Oberflächenrückstände die erreichbaren Scherzugfestigkeiten ermittelt, konnte mit den durchgeführten Versuchen sehr gut verifiziert werden.

Durch die Weiterentwicklung der Teilsysteme und die Integration weiterer Montageschritte können die neu entwickelten Verfahren und Werkzeuge wirtschaftlich bei kleinen Losgrößen und gleichzeitig hohen Anforderungen an die Typen- und Variantenvielfalt eingesetzt werden. Weiterhin können zur näheren Prozesskontrolle und -optimierung die zeit- und ortsabhängigen Werte in der Software ausgegeben werden.

Mit den in der vorliegenden Arbeit entwickelten Verfahren und Werkzeugen konnte die Umsetzbarkeit des prozessüberwachten Fügens von folienisolierten Flachleitern mit höchstmöglicher Scherzugfestigkeit nachgewiesen und die Erhöhung des Automatisierungsgrades zum Fügen von Folienleitungssätzen realisiert werden.

9 Summary

Electronic devices like automobiles or aircrafts are characterised by a huge increase in functionality. This leads to a higher need for current and therefore to higher conductor cross sections and space problems. Some alternative wiring technologies show the same capability in current transfer, like round copper wires with the advantage of reduced space and weight demand. For example, the increased number of applications of flexible flat cables in wiring of components in automobile roof and door-applications, in the electronic industry in cameras and PDAs as well as in aviation. Further, a fast increase of applications with flex wiring is expected according to space problems.

The highly automated production process of flexible flat cables is followed by a partly automated joining process. The reason for a low automated joining processes is a high number of variants and types of products and mainly small and medium sized enterprises in wiring technologies. This limited automation in joining technologies leads into a wide range of contact features, like tensile strength, conductivity and heat impact. The high number of rework or spare parts in high current applications is the consequence of the wide range in tensile strength after joining. For low current applications /KRI-02/ has developed initial results in a process monitored joining technology. The increasing demand of flexible flat cables will also cause an increased number of applications for high current applications. Using today's technology will generate an increased number of rework and spare parts. Further, the market demands low cost contacts, high quality and improved time to market. To solve these sometimes contraire market-demands, the development of an automated joining station considering variable input parameters is necessary.

Therefore, the aim of this thesis is a systematic work out of results for an automated high current joining technology for flexible flat cables with the highest possible tensile strength. The small and medium sized enterprises need a tool to insure the highest tensile strength of joining while taking the highly variable input parameters into consideration. The strong development in the market of flexible flat cables requires the need for an analysis from types and variants, used components, processes, tools and boundary conditions as well as actual development trends. The outcome will specify product and process specific conditions for an automated high current joining technology for flexible flat cables.

Further on the system for joining flexible flat cables is divided into subsystems. The subsystems taken into account are:

- Handling and positioning of flexible flat cable and contact
- Investigation of contact surface and calculation of optimised process parameters
- Joining and process monitoring

For all subsystems several concepts were realised and benchmarked. The chosen subsystems are combined in a prototypical joining station. Unavailable components were developed and realised.

For the handling of non-rigid parts /KRI-02/ has realised an application for mechanical joining technologies which will be enhanced by material continuity joining processes. Therefore a basic investigation of high current joining technologies with a focus on the process in small and medium sized enterprises is required. The result of the analysis of handling, positioning and joining processes have shown no available process control and process monitoring for high current applications to avoid or reduce the influence of variable input parameters. In tests the resistance spot welding has shown the highest capability in reaching high tensile strength. Therefore the resistance spot welding will be implemented in the prototypical joining station.

The investigation of stripping and cleaning processes has shown different contamination after stripping with an obvious influence on the contact features. In general, the tensile strength decreases with increasing contact surface contamination. To reduce the influence of variable input parameters like surface contamination on the tensile strength of the joining, a clean contact surface is essential. Therefore possible cleaning processes were examined. All tested cleaning processes are not able to produce a reproducible surface or take a long, non balanced tact time in comparison to usual tact times in assembly lines. Therefore cleaning is in production no alternative and an adjustment of parameter sets according to a detected contamination is needed.

Actually no surface investigation processes for flexible flat cables are available. To implement a surface investigation in the prototypical joining station a comparison of different investigation processes was required. The criteria of capital investment, reproducibility, tact time and high resolution show a clear benefit of a resistance measurement on the contact surface. This contact surface investigation can be done between the two electrodes of the spot welding machine.

In handling and positioning of flexible flat cable and contact the industrial SCARA-robot with a vacuum gripper for the flexible flat cable and a magazine with ejection for contacts is implemented in the prototypical joining station.

One result of the analysis shows the necessary understanding of interaction between the variable input parameters and joining features. To gain this knowledge pre-tests have to be initiated. The aim of these pre-tests is to get a function between tensile strength of joining and the variable input parameters. The process parameters for the pre-tests are defined by:

- Welding current
- Welding time
- Electrode force

The input parameters include:

- Electrode geometry and material
- Flexible flat cable geometry and material
- Contact geometry and material
- Surface roughness depending on stripping technology
- Surface contamination

The detailed results of these pre-tests are shown in chapter 5.

Based on the results of these pre-tests, a software model for a process calculation was developed. The boundary condition to develop a tool for small and medium sized enterprises demands simple and inexpensive software. In nearly every company a test lab-software like LabView and hp-Vee is available. Therefore the software model was realised in LabView. Typical in small and medium sized companies limited educated staff for simulation software is available. This requires a tool with a manual input of only material and geometric properties. Creating a software-model has to be done by the software itself.

The welding process is influenced by thermal, mechanical and physical effects. Based on this information a tool has been developed to calculate the optimised process parameters for getting the highest possible tensile strength of the joining. To solve this problem a numerical calculation with several sub models is necessary.

Based on the facts of the pre-tests and the investigated probes the following sub models are defined:

- Heat creation
- Heat conduction
- Phase changing
- Spatter behaviour
- Residual stress calculation
- Plastic deformation by electrode
- Calculation of tensile strength

This software tool was implemented in a prototypical realisation of a joining station. The conclusion of this technology shows a high correlation with the pre-tests.

The function of the developed and realised components as well as the verification of the theoretically solved results are checked in a prototypical joining station with a focus on small and medium sized enterprises. The developed software tool and the prototypical joining station show a high correlation of pre-tests and calculation. Therefore, a joining of contaminated contact surfaces with the highest tensile strength in production is possible with using this software tool. The tests have shown that for an industrial application an optimisation of contact tolerances and geometry is required. Further on, the handling and positioning time has to be shortened. Otherwise the availability and the economic efficiency of the joining station is not sufficient.

10 Literatur

- /ADA-02/ o. V.: ADAC Pannenstatistik 2002
[http://www.adac.de/Auto_Motorrad/Fahrzeugmaegel/Pannenstatistik/Die Verteilung der Pannen_2003/default.asp?ComponentID=52083&SourcePageID=9990%231](http://www.adac.de/Auto_Motorrad/Fahrzeugmaegel/Pannenstatistik/Die_Verteilung_der_Pannen_2003/default.asp?ComponentID=52083&SourcePageID=9990%231)
(2003-11-19)
- /ADA-03/ Adams, M.: Extrudierte Flachleiter für vielseitige automotive Anwendungen.
In: Auto & Elektronik 1 (2000), Nr. 2-3, S. 18-19
- /ADR-01/ Adrian, J.: Stoffschlüssige Kontaktierungstechnik in der Verdrahtungstechnik am Beispiel FFC
In: Kabelkonfektion – Quo vadis?
Tagung München 19. und 20.11.2001, Essen: HdT, 2001, o. Z.
- /ADR-02/ Adrian, J.: Leistungsfähigkeit stoffschlüssiger Kontaktierungsverfahren
In: IIR Deutschland GmbH:
Bordnetz der Zukunft
Tagung Stuttgart 11. und 12.03.2002, Sulzbach/Ts.: IIR, 2002, o. Z.
- /ATN-03/ o. V.: ATN: Maschinen
<http://www.atn-berlin.de/sites/produkte.html>
(2003-11-19)
- /AXO-03/ o. V.: Axon Kabel: Flat Flexible Cable – General Characteristics (2003)
www.axon-cable.com/product/axon/ffc/ffcdoc3.htm (2003-11-19)
- /BAU-95/ Baur, M., u. a.: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben AIF/DVS 9514. Experimentelle und theoretisch/numerische Untersuchung zur Festigkeit und Zähigkeit von Aluminium-Schweißverbindungen. Freiburg, Fraunhofer IWM, November 1995 (IWM-Bericht W7/95)
- /BAU-00/ Baumann, G.: Schnittiges Verfahren.
In: Draht 86 (2000), Nr. 3, S. 58-59

- /BAU-01/ Bauer, G., u. a.: Der DC-Bus: Quantensprung für das Bordnetz
In: Kabelkonfektion – Quo vadis?
Tagung München 19. und 20.11.2001,
Essen: HdT, 2001, o. Z.
- /BEE-00/ Beer, A.: X-by-Wire – die sichere Alternative?
In: Auto & Elektronik 1 (2000), Nr. 2-3,
S. 73-75
- /BER-93/ o. V.: Berg Electronics GmbH
Flexible Circuitry Systems.
Oberursel, 1993 – Firmenschrift
- /BER-00/ Bertram, T.: Mechatronik, Elektronik und Informations-
technik rücken enger zusammen.
In: MTZ 61 (2000) Special Automotive
Electronics, Oktober, S. 78-83
- /BLA-02/ Blaschke, J.: „FPC“ Flexible Printed Circuit
In: Kabelkonfektion – Quo vadis?
Tagung München 04. und 05.12.2002,
Essen: HdT, 2002, o. Z.
- /BOE-04/ Boeck, M.: Mehr Mechatronik – weniger Unfälle.
In: VDI-Nachrichten 58 (2004), Nr. 12, S. 12
- /BUE-01/ Bühler, L.: Realisierte Produktionsanlagen zur
Verarbeitung alternativer
Übertragungstechnologien
In: Kabelkonfektion – Quo vadis?
Tagung München 19. und 20.11.2001,
Essen: HdT, 2001, o. Z.
- /BRA-01/ Brabetz, L.: Die Bordnetzarchitektur der Zukunft
In: Kabelkonfektion – Quo vadis?
Tagung München 19. und 20.11.2001,
Essen: HdT, 2001, o. Z.
- /CMC-03/ o. V.: CMC-Klebetchnik: Flachkabel-Laminatfolie
(2003)
[http://www.cmc-
klebetchnik.de/flachkabel.htm](http://www.cmc-klebetchnik.de/flachkabel.htm) (2003-11-20)
- /CRA-95/ Cramer, R.: Flexibel automatisierte Montage hochpoliger
Rundkabel.
Berlin: Springer, 1995.
Zugl. Stuttgart, Universität, Diss., 1995

- /CRE-03/ o. V.: Credé: Schweißtechnik (2003)
<http://www.crede-elektronik.de/html/schweisstechnik.html> (2003-11-19)
- /CZA-00/ Czabanski, J., u. a.: Flex-Wiring und MID substituieren konventionelle Leitungssätze.
In: Draht 86 (2000), Nr. 3, S. 54-56
- /DEG-02/ Dégardins, P.: Latest trends in automotive architecture and technologies
In: Kabelkonfektion – Quo vadis?
Tagung München 04. und 05.12.2002,
Essen: HdT, 2002, o. Z.
- /DEU-02/ Deutmarg, S., u. a.: Folienleiter – The solution
In: Kabelkonfektion – Quo vadis?
Tagung München 04. und 05.12.2002,
Essen: HdT, 2002, o. Z.
- /DIE-67/ Dies, K.: Kupfer und Kupferlegierungen in der Technik.
Berlin: Springer, 1967.
- /DIN-86/ Norm DIN 41650 Teil 1 1986-05
Rahmennorm für Steckverbinder –
Steckverbinder für gedruckte Schaltungen
- /DIN-96/ Norm DIN ISO 12085 1996-08
Geometrische Produktspezifikation (GPS) –
Oberflächenbeschaffenheit:
Tastschnittverfahren
- /DIN-00/ Norm DIN EN ISO 15609 Teil 5 E 2000-08
Schweißenanweisung – Widerstandsschweißen
- /DIN-02/ Norm DIN ISO 857 Teil 1 2002-11
Schweißen und verwandte Prozesse -
Begriffe – Teil 1: Metallschweißprozesse
- /DIN-03/ Norm DIN 8593 Teil 0 2003-09
Fertigungsverfahren Fügen
- /DIN-04-1/ Norm DIN ISO 857 Teil 2 2004-02
Schweißen und verwandte Prozesse -
Begriffe – Teil 2: Weichlöten, Hartlöten und
verwandte Begriffe
- /DIN-04-2/ Norm DIN EN ISO 6507-1 2004-07
Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach
Vickers – Teil 1: Prüfverfahren

- /DKI-78/ o. V.: Schweißen von Kupfer und Kupferlegierungen
Düsseldorf: Deutsches Kupferinstitut, 1978
- /DKI-82/ o. V.: Kupfer
Düsseldorf: Deutsches Kupferinstitut, 1982
- /DVS-91/ Radaj, D.: Zukünftige Leitungssatztechnologien.
In: Berechnung, Gestaltung und Fertigung von Schweißkonstruktionen im Zeitalter der Expertensysteme, Sondertagung Essen 20. und 21. Februar 1991
Düsseldorf: DVS Verlag GmbH, 1991, o. Z., (DVS-Berichte 133)
- /EMM-92/ Emmerich, H.: Flexible Montage von Leitungssätzen mit Industrierobotern.
Berlin: Springer, 1992.
Zugl. Stuttgart, Universität, Diss., 1992.
- /FIS-03/ Fischer, A., u. a.: Technologietrends in der Automobilindustrie und ihre Auswirkungen auf die Zulieferindustrie.
In: Tagung „Regionalmanagement Wirtschaftsregion“, Tagung Bamberg-Forchheim, 29.10.2003, Schlüsselfeld: 2003, o. Z.
- /GIL-92/ Gilleo, K.: Handbook of Flexible Circuits.
New York: Van Nostrand Reinhold, 1992
- /GOR-01/ Goroncy, J.: Flach statt rund.
In: Automobil Industrie 46 (2001), Nr. 5, S. 60-63
- /GOR-03-1/ o. V.: Gore: Flat Cable (2003)
www.goreelectronics.com/products/bulk_cable/ribbon_cables.html (19.11.2003)
- /GOR-03-2/ Goroncy, J.: Elektronik-Innovationen nicht um jeden Preis.
In: VDI-Nachrichten 57 (2003), Nr. 12, S. 11
- /GOR-04/ Goroncy, J.: Querdenken vermeidet Elektronikfehler.
In: VDI-Nachrichten 58 (2004), Nr. 13, S. 13
- /GRE-92/ Greitmann, M. J.: Untersuchungen zum Widerstandsschweißen von Hartmetall auf Stahl.
Stuttgart, Universität, Diss. 1992

- /HAR-03/ o. V.: Harms+Wende: IQR – Qualitätsregelung beim Widerstandspunktschweißen (2003)
<http://www.harms-wende.de/pages/highlights1.htm> (2003-11-19)
- /HOL-41/ Holm, R.: Die technische Physik der elektrischen Kontakte
Berlin: Springer, 1941
- /HOL-67/ Holm, R.: Electric Contacts, 4th Edition
Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1967
- /HOR-41/ Horn, J.: Schichtwerkstoffe und Beschichtungsverfahren für Steckverbinderkontakte,
In: IIR Deutschland GmbH:
Werkstoffe und Technologien im Kfz-Bordnetz, Tagung Sindelfingen
05. und 06. Mai 2003,
Sulzbach/Ts.: IIR, 2003, o. Z.
- /IGN-95/ Ignatowitz, E., u. a.: Werkstofftechnik für Elektroberufe
Bibliothek des Technikers BDT,
Europa-Nr.: 51917
Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel,
Nourney, 1995
- /IPC-50/ o. V. IPC-T-50:
Terms and Definitions
Evanston, Illinois: Institute of Printed Circuits
- /JET-03/ o. V.: Jet-Laser: Flex JET Kabelstripping (2003)
www.jetlaser.de/D/Kabelbearbeitung.htm
(2003-11-19)
- /KLI-97/ Klinger, M.: Flexleiter revolutionieren Bordnetzkonzepte.
In: Siemens Components 36 (1997), Nr. 6,
S. 21-23
- /KOL-94/ Koller, S.: Direktmontage von Leitungen mit Industrierobotern.
Berlin: Springer, 1994.
Zugl. Stuttgart, Universität, Diss., 1994
- /KOM-00/ Komax: Komax AG: New Wave 1/00
CH-6036 Dierikon, 2000 – Firmenschrift
- /KRA-00/ Krause, N., u. a.: Elektrische Verbindungen in der Automobiltechnik.
In: MTZ 61 (2000) Special Automotive Electronics, Oktober, S. 72-75

- /KRI-99-1/ Krieger, J.: Dramatisch weniger Steckverbinder.
In: Automobil-Produktion 13 (1999),
Suppl. September, S. 16, 18.
- /KRI-00-1/ Krieger, J., Dreyer, H.: Verdrahtungstechnik im Umbruch.
In: F&M 108 (2000), Nr. 7, S. 90-92
- /KRI-00-2/ Krieger, J., Ankele, A.: Folienleitungssätze revolutionieren
das Kfz-Bordnetz.
In: Elektronik 49 (2000), Special Automotive
S. 52-55
- /KRI-00-3/ Krieger, J.: Neue Übertragungstechnologien im
Automobilbau.
In: BAIKA Bayern Innovativ GmbH:
„Industriearbeitskreis Bordnetze“
Kooperationsforum München 04.05.2000,
Nürnberg: BIAKA, 2000, o. Z.
- /LIE-02/ Liebl, J.: Inline Prozess-Überwachung bei
der Kabelkonfektion
In: Kabelkonfektion – Quo vadis?
Tagung München 04. und 05.12.2002,
Essen: HdT, 2002, o. Z.
- /LEX-92 / Lexin, J.: Comparison of printed flexible circuits and
traditional cabling.
In: Interconnection Technology 8 (1992),
Nr. 12, S. 14-17
- /MEI-03/ Meisser, C.: Vollautomatische JIT Fertigung von
Kabelsätzen mit programmierbaren
Crimppressen und hochflexible
Bestückungsautomaten
In: Kabelkonfektion – Quo vadis?
Tagung Stuttgart 05. und 06.11.2003,
Essen: HdT, 2003, o. Z.
- /MOL-03-1/ o. V.: Molex: Datenblatt Flexfolienverbinder:
2.54mm (.100") C-Grid SL™ Single Row,
Female, Version A Receptacle (2003)
[http://www.newproduct.molex.com/datasheet
.asp?ProductID=2027&BV_SessionID=@@
@@1424949775.1069314470@@@&BV
EngineID=ccceadcjmflikegcflgcehedffgdfmk.
0&Catalog=\(2003-11-20\)](http://www.newproduct.molex.com/datasheet.asp?ProductID=2027&BV_SessionID=@@ @@1424949775.1069314470@@@&BV_EngineID=ccceadcjmflikegcflgcehedffgdfmk.0&Catalog=(2003-11-20))

- /MOL-03-2/ o. V.: Molex: Datenblatt Flexfolienverbinder: INACTIVE - 0.30mm (.012") SMT, Right Angle, ZIF, Bottom Contact Style Receptacle (2003)
http://www.newproduct.molex.com/datasheet.asp?ProductID=2019&BV_SessionID=@@1424949775.1069314470@@@&BV_EngineID=ccceadcjmfliekgcflqcehedffgdfmk.0&Catalog= (2003-11-20)
- /MOR-94/ Mortier, C., u.a.: Efficient Shielding for Flat Flexible Cable. In: Evaluation Engineering 33 (1994), Nr. 9, S. 116-118
- /MOT-99/ o. V.: Opel: Opel achieves break-through on FPC-technology (1999)
<http://www.opel.de/german/nova/news/pages/1991209a.htm>. (1999-12-09)
- /NIE-02/ Niemeier, J.: Lötten auf Folienleitern
In: Kabelkonfektion – Quo vadis? Tagung München 04. und 05.12.2002, Essen: HdT, 2002, o. Z.
- /ODE-02/ Odening, J., u. a.: Bordnetz-Entwicklung bei Volkswagen
In: Kabelkonfektion – Quo vadis? Tagung München 04. und 05.12.2002, Essen: HdT, 2002, o. Z.
- /PAN-03/ o. V.: Panta: Produktbeschreibung Folienkabel (2003)
www.panta.de/panta/cms/kat/cms/cont/cms.php?lang=de&cat (2003-11-19)
- /PAR-00/ o. V.: Parlex Corporation.
A cost effective process for flexible interconnects requiring EMI shielding and controlled impedance,
Methuen, MA/USA: 2000 – Firmenschrift
- /POR-95/ Porsch, L., u.a.: Crimpqualität mit System sichern.
In: Productronic 15 (1995), Nr. 5, S. 14-15, 17
- /RAD-88/ Radaj, D.: Wärmewirkung des Schweißens
Berlin: Springer, 1988

- /RAI-99/ Raiser, E.-C.: Untersuchungen zum Prozessablauf und der Verbindungsbildung beim Widerstandspunktschweißen von metallisch überzogenen Kupferlegierungen. Düsseldorf: 2000. Zugl. Stuttgart, Universität, Diss., 1999. (DVS-Bericht 210)
- /REG-03/ Reger, L.: Entwicklungstrends Steckverbinder für zukünftige Bordnetzsysteme
In: Kabelkonfektion – Quo vadis?
Tagung Stuttgart 05. und 06.11.2003,
Essen: HdT, 2003, o. Z.
- /REN-01/ Renner, G.: Extrudierte Folienleiter –
Herstellungsverfahren und
Verarbeitungstechniken
In: Kabelkonfektion – Quo vadis?
Tagung München 19. und 20.11.2001,
Essen: HdT, 2001, o. Z.
- /RIN-03/ Riner, J.: Alternative Verbindungstechnik für
Folienleiter. In: Kabelkonfektion – Quo
vadis?
Tagung Stuttgart 05. und 06.11.2003,
Essen: HdT, 2003, o. Z.
- /SCH-76/ Schraft, R. D.: Systematisches Auswählen und Konzipieren
von programmierbaren
Handhabungsgeräten. Mainz: Krausskopf,
1976
Zugl. Stuttgart, Universität, Diss., 1976.
- /SCH-78/ Schweizer, M.: Taktile Sensoren für programmierbare
Handhabungsgeräte.
Mainz: Krausskopf, 1978
Zugl. Stuttgart, Universität, Diss., 1978.
- /SCH-03/ Scharf, A.: Automobilelektronik belebt die
Chipkonjunktur.
In: VDI-Nachrichten 57 (2003), Nr. 47, S. 39
- /STE-96/ Stearns, T. H.: Flexible Printed Circuity
New York: McGraw-Hill, 1996
- /STR-03/ o. V.: Strunk Schweißtechnik: Steuerungstechnik
MCD PC/2
[http://www.strunk.de/deutsch/
st_steuerungstechnik_MCDpc2.htm](http://www.strunk.de/deutsch/st_steuerungstechnik_MCDpc2.htm)
(2003-11-19)

- /TKR-03/ o. V.: TKR-Tools: Werkzeugauswahl
http://www.tkr-tools.de/online-katalog/index_g.htm (2003-11-19)
- /VDI-90/ Norm: VDI 2860 1990-05
Montage- und Handhabungstechnik:
Handhabungsfunktionen,
Handhabungseinrichtungen, Begriffe,
Definitionen, Symbole
Berlin, Köln: Beuth, 1990
- /VOL-04/ Vollmer, A.: Elektr(on)ik-Trends im Automobil.
In: Auto & Elektronik 5 (2004), Nr. 4, S. 50-51
- /WAS-95-1/ Waschkies, E.: Schutzrecht DE 43 25 856 C2 (1995-08-24)
Waschkies, E.: DE 42 25 251.2 1992-07-31
- /WAS-95-2/ Waschkies, E.: Schutzrecht DE 43 25 858 C2 (1995-07-27)
Waschkies, E.: DE 42 25 251.2 1992-07-31
- /WAS-97/ Waschkies, E.: Prüfen des Widerstandspunktschweißprozesses mit Ultraschall
In: Schweißen & Schneiden 49 (1997),
Nr. 1, S. 15-19
- /WEI-04/ Weidenhammer, P.: Nur mit Elektronik mehr Sicherheit.
In: VDI-Nachrichten 58 (2004), Nr. 14, S. 13
- /WES-96/ Westkämper, E.: Null-Fehler-Produktion in Prozessketten.
Berlin: Springer, 1996
- /WET-03/ o. V.: W. E. T.: Flachbandkabel in der
Automobilbranche (2003)
www.wet.de (2003-11-19)
- /WIE-99/ Baumann, H. P.: Wieland-Kupferwerkstoffe - Herstellung,
Eigenschaften und Verarbeitung,
Ulm: Süddeutsche Verlagsgesellschaft,
1999.
- /WOE-03/ Wörner, S.: Bordnetzentwicklung im Hause
DaimlerChrysler
In: Kabelkonfektion – Quo vadis?
Tagung Stuttgart 05. und 06.11.2003,
Essen: HdT, 2003, o. Z.

11 Anhang

Nachfolgend sind die Herleitungen der in Kapitel 6 aufgeführten Gleichungen aufgeführt.

Versagensbild Ausknöpfen:

Bei symmetrischer Ausbildung der Schweißlinse gilt nach Pythagoras (siehe Abbildung 6.1.3-1)

$$(a + R_{EI})^2 = \left(\frac{1}{2}d_L\right)^2 + (h_i + R_{EI} - s_{EI})^2 \quad (A1)$$

Die Auflösung der quadratischen Gleichung und die Weiterverfolgung der sinnvollen positiven Lösung ergeben

$$a = -R_{EI} + \sqrt{\frac{1}{4}d_L^2 + (h_i + R_{EI} - s_{EI,i})^2} \quad (A2)$$

Übergangswiderstand:

Der Kontaktdurchmesser wird über die Hertzsche Gleichung mit

$$d_K = 2 \cdot \sqrt[3]{\frac{1,5 \cdot (1 - \nu^2) \cdot F_{EI} \cdot R_{EI}}{E}} \quad (A3)$$

mit der Querkontraktionszahl $\nu = 0,35$ für Kupfer bestimmt. Bei unterschiedlichen Materialien gilt in der vorherigen Gleichung für den Elastizitätsmodul:

$$E = 2 \cdot \frac{E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2} \quad (A4)$$

Zur Lösung der Verschiebung v wird für die Lösung der Gleichung des dritten Grades für die Diskriminante $D < 0$ der trigonometrische Lösungsansatz angewandt.

$$C_1 = 2 \cdot \sqrt{\frac{|u|}{3}} \cdot \cos\left(\frac{\varphi}{3} + \delta\right) - \frac{2}{3}h + \frac{g}{6 \cdot \gamma^2 \cdot \sinh\left(\gamma \cdot \frac{1}{2}d_K\right) \cdot \sin\left(\gamma \cdot \frac{1}{2}d_K\right)} \quad \text{mit } \delta = 0, 120^\circ, 240^\circ \quad (A5)$$

mit

$$\cos \varphi = -\frac{w}{2 \cdot \sqrt{\left(\frac{|u|}{3}\right)^3}} \quad (A6)$$

und

$$u = \frac{1}{4(3j)^3} (-4h^3 j^3 - 12gh^2 j^2 + 6g^2 hj - 2g^3 - 9hd_k^2 j^3 - 36hj^2 \cosh(f) \cos(f) - 9gd_k^2 j^2 - 36gj \cosh(f) \cos(f)) \quad (\text{A7})$$

$$w = \frac{1}{4(3j)^2} (3d_k^2 j^2 - 4h^2 j^2 - 24hjg - 12g^2 - 6j \cosh(f) \cos(f)) \quad (\text{A8})$$

Dabei ergeben sich die berücksichtigten Vereinfachungen mit

$$f = \frac{\gamma \cdot d_k}{2} \quad (\text{A9})$$

$$g = \frac{q_A \cdot \gamma^2}{k \cdot f^2} \left(\frac{K_1 \cdot f}{\cosh(f) \cdot \sin(f) + \sinh(f) \cdot \cos(f)} - 2 \cdot K_2 \cosh(f) \cdot \cos(f) + m \right) \quad (\text{A10})$$

$$h = \frac{q_A}{k} \cdot \left[1 - \frac{384}{d_k^4} \cdot E \cdot l \cdot K_4 \right] \quad (\text{A11})$$

$$j = 2 \cdot \gamma^2 \cdot \sinh(f) \cdot \sin(f) \quad (\text{A12})$$

$$m = 12 \cdot K_4 + 6 \cdot K_3 + 2 \cdot K_2 - K_1 \cdot f \cdot \sinh(f) \cdot \cos(f) \quad (\text{A13})$$

Aufgrund der Komplexität des Koeffizienten C_1 werden die folgenden Koeffizienten in Abhängigkeit der vorher berechneten Koeffizienten dargestellt.

$$C_4 = \frac{1}{\gamma^2} \left[\frac{C_1 + h}{\left(\frac{1}{2} d_k\right)^2 + (C_1 + h)^2} - \frac{4}{k \cdot d_k^2} \cdot K_2 \cdot q_A(0, z) \right] \quad (\text{A14})$$

$$C_3 = \frac{1}{\cosh(f) \sin(f) + \sinh(f) \cos(f)} (C_4 \cosh(f) \cos(f) - C_1 \sinh(f) \sin(f) + q_A(0, z) \frac{6K_4 + 3K_3 + K_2 - K_1 f \sinh(f) \cos(f)}{k \cdot f^2}) \quad (\text{A15})$$

$$C_2 = -C_3 - \frac{K_1}{k \cdot f} \cdot q_A(0, z) \quad (\text{A16})$$

Wärmeleitung:

Ausgehend von der allgemeinen Betrachtung des Cauchyproblems der Wärmeleitung erfolgt eine Anpassung an die Wärmeleitung im Schweißprozess. Für den inkrementellen Zeitschritt wird ein lineares Modell vorausgesetzt, was von der Temperatur unabhängige Materialkonstanten zur Folge hat.

Zunächst ist die homogene Gleichung

$$T_t - \frac{\lambda}{\rho_D \cdot c_P} \Delta T = 0 \quad (\text{A17})$$

zu lösen. Mittels einer Fouriertransformation ergibt sich die Lösung der homogenen Wärmeleitungsgleichung mit der Fundamentallösung oder Greenschen Funktion $G(t,x)$

$$G(t, x) = \frac{1}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot \alpha_W \cdot t}} \cdot e^{-\frac{|x|^2}{4 \cdot \alpha_W \cdot t}} \quad (\text{A18})$$

und der Wärmeleitfähigkeit α_W

$$\alpha_W = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_P} \quad (\text{A19})$$

zu der in Kapitel 6.6 aufgeführten Lösung

$$T(t, x) = G(t, x) \cdot T_0(x) = \frac{1}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot \alpha_W \cdot t}} \int e^{-\frac{|x-y|^2}{4 \cdot \alpha_W \cdot t}} \cdot T_0(y) dy \quad x, y \in \mathbb{R}^3 \quad (\text{A20})$$

Die Lösung der inhomogenen Gleichung

$$T_t - \frac{\lambda}{\rho_D \cdot c_P} \Delta T = \frac{1}{\rho_D \cdot c_P} Q_t \quad (\text{A21})$$

wird über das Prinzip von Duhamel ermittelt. Unter Verwendung der Funktion $S(t, x)$ als Lösung der homogenen Gleichung und

$$T(t, x) = \int_0^t S(s, t, x) ds \quad (\text{A22})$$

ergibt sich die Gesamtlösung nach dem Superpositionsprinzip aus der Lösung der homogenen Gleichung und einer partikulären Lösung der inhomogenen Gleichung.

$$T(t, x) = \frac{1}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot \alpha_W \cdot |t-s|}} \int_0^t \int e^{-\frac{|x-y|^2}{4 \cdot \alpha_W \cdot |t-s|}} \cdot Q_t(y) dy ds + \frac{1}{\sqrt{4 \cdot \pi \cdot \alpha_W \cdot t}} \int e^{-\frac{|x-y|^2}{4 \cdot \alpha_W \cdot t}} \cdot T_0(y) dy \quad (\text{A23})$$

Spritzerneigung:

Der Innendruck der Schweißlinse ergibt sich aus dem unterschiedlichen Ausdehnungsverhalten der umgewandelten flüssigen Phase und der festen, umgebenen Phase. Der Umfang der Schweißlinse ergibt sich zu

$$U_L = 4 \int_0^{\frac{1}{2}\pi} \sqrt{\left(\frac{1}{2} d_L\right)^2 \cdot \cos^2(x) + \left(\frac{1}{2} h_L\right)^2 \cdot \sin^2(x)} dx \quad (\text{A24})$$

Da keine exakte Lösung existiert, wird mit der Näherungsformel von Ramanujan der Umfang mit

$$U_L \approx \frac{1}{2} (d_L + h_L) \cdot \pi \cdot \left(1 + \frac{3 \cdot \delta^2}{10 + \sqrt{4 - 3 \cdot \delta^2}}\right) \quad \text{mit } \delta = \frac{d_L - h_L}{d_L + h_L} \quad (\text{A25})$$

oder für unterschiedliche x in der Schweißlinse über

$$U_L(x) \approx \left(x + \frac{1}{2} h_L \cdot \sqrt{1 - \frac{x^2}{\left(\frac{1}{2} d_L\right)^2}}\right) \cdot \pi \cdot \left(1 + \frac{3 \cdot \delta^2}{10 + \sqrt{4 - 3 \cdot \delta^2}}\right)$$

$$\text{mit } \delta = \frac{x - \frac{1}{2} h_L \cdot \sqrt{1 - \frac{x^2}{\left(\frac{1}{2} d_L\right)^2}}}{x + \frac{1}{2} h_L \cdot \sqrt{1 - \frac{x^2}{\left(\frac{1}{2} d_L\right)^2}}} \quad (\text{A26})$$

bestimmt. Somit ergibt sich die mittlere Linsentemperatur zu

$$\bar{T}_L = \frac{1}{A_L} \int_0^{\frac{1}{2} d_L} U_L(x) \cdot T(x) dx \quad (\text{A27})$$

und die Volumendehnung der Schweißlinse im Verhältnis der beiden Dichten

$$V_{L,\bar{T}} = \frac{\rho_{D,20}}{\rho_{D,\bar{T}}} \cdot V_{20} \quad (\text{A28})$$

Die weiteren Spannungen im festen Bereich ergeben sich unter Berücksichtigung der beiden nachfolgenden Vereinfachungen zu

$$Q = \frac{d_L}{b_i} \quad \text{mit } i = \text{I, II} \quad (\text{A29})$$

$$Q_\xi = \frac{\frac{1}{2} d_L}{\xi} \quad (\text{A30})$$

$$\sigma_{\text{radial}} = -\rho_L \cdot \frac{Q_\xi^2 - Q^2}{1 - Q^2} \quad (\text{A31})$$

$$\sigma_{\text{tangential}} = \rho_L \cdot \frac{Q_\xi^2 + Q^2}{1 - Q^2} \quad (\text{A32})$$

Diese Beziehung gilt für alle

$$\frac{x^2}{\xi^2} + \frac{z^2}{\left(\frac{h_L}{d_L}\right)^2 \xi^2} = 1 \quad (\text{A33})$$

und

$$\xi = \text{const} \quad (\text{A34})$$

Zur Transformation in das verwendete kartesische Koordinatensystem sind zunächst der Normalen \vec{n} und der Tangentialvektor \vec{t} zu bestimmen.

$$\vec{n} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} h_L \cdot \cos(\varphi) \\ \frac{1}{2} d_L \cdot \sin(\varphi) \end{bmatrix} \quad 0 \leq \varphi < 2\pi \quad (\text{A35})$$

$$\vec{t} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} d_L \cdot \sin(\varphi) \\ \frac{1}{2} h_L \cdot \cos(\varphi) \end{bmatrix} \quad 0 \leq \varphi < 2\pi \quad (\text{A36})$$

Mit den Normalen- und Tangentialvektoren ergibt sich für die Spannung in x-Richtung mit

$$\sigma_x = \sigma_{radial} \cdot \frac{1}{2} h_L \cdot \cos(\varphi) - \sigma_{tangential} \cdot \frac{1}{2} d_L \cdot \sin(\varphi) \quad (\text{A37})$$

und die Spannung in z-Richtung mit

$$\sigma_z = -\sigma_{radial} \cdot \frac{1}{2} d_L \cdot \sin(\varphi) + \sigma_{tangential} \cdot \frac{1}{2} h_L \cdot \cos(\varphi) \quad (\text{A38})$$