

FAU Studien aus dem Maschinenbau 419

Matthias Friedlein

Zuverlässigkeitsmethoden zur Beschleunigung von Qualifizierungsuntersuchungen für Steckkontakte



Matthias Friedlein

Zuverlässigkeitsmethoden zur Beschleunigung von Qualifizierungsuntersuchungen für Steckkontakte

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 419

Herausgeber/-innen:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein Prof. Dr.-Ing. Sebastian Müller Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack Matthias Friedlein

Zuverlässigkeitsmethoden zur Beschleunigung von Qualifizierungsuntersuchungen für Steckkontakte

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Erlangen FAU University Press 2023 Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Bitte zitieren als

Friedlein, Matthias. 2023. Zuverlässigkeitsmethoden zur Beschleunigung von Qualifizierungsuntersuchungen für Steckkontakte. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 419. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-626-8.

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Die Rechte an allen Inhalten liegen bei ihren jeweiligen Autoren. Sie sind nutzbar unter der Creative-Commons-Lizenz BY-NC.

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über den OPUS-Server der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar: https://opus4.kobv.de/opus4-fau/home

Verlag und Auslieferung: FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-625-1 (Druckausgabe) eISBN: 978-3-96147-626-8 (Online-Ausgabe) ISSN: 2625-9974 DOI: 10.25593/978-3-96147-626-8

Fakultätstitelblatt

Zuverlässigkeitsmethoden zur Beschleunigung von Qualifizierungsuntersuchungen für Steckkontakte

Der Technischen Fakultät der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

zur Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Matthias Friedlein, M.Sc.

aus Nürnberg

Als Dissertation genehmigt von der Technischen Fakultät der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung: 07.10.2022

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke Prof. Dr.-Ing. Jürgen Wilde

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Mein Dank gilt insbesondere dem Lehrstuhlinhaber Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke, der durch das in mich gesetzte Vertrauen mir die Promotion ermöglichte. Die stetige Unterstützung meiner Forschungstätigkeiten im Bereich der Zuverlässigkeit von Steckverbindern sowie die zahlreichen wertvollen Diskussionen hinsichtlich Forschungsvorhaben, Veröffentlichungen und Lehrveranstaltungen haben meine Arbeit entscheidend geprägt und bereichert. Darüber hinaus möchte ich mich für die Übernahme des Erstgutachtens bedanken.

Des Weiteren geht mein Dank an Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte, für die Übernahme des Vorsitzes des Promotionsverfahrens sowie Prof. Dr.-Ing. Jürgen Wilde, Professor für Aufbau- und Verbindungstechnik am Institut für Mikrosystemtechnik der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, für die Übernahme des zweiten Gutachtens und Prof. Dr.-Ing. Georg Fischer als weiteres Mitglied des Prüfungsausschusses. Ich möchte mich ebenfalls dafür bedanken, dass mir durch den europäischen Fond für regionale Entwicklung und das Forschungsprojekt "E-Connect" die vorliegende Promotion ermöglicht wurde.

Ein großer Dank gilt zudem allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern am Lehrstuhl FAPS. Speziell geht mein Dank an alle Kolleginnen und Kollegen des Forschungsbereichs Bordnetze aufgrund des regen fachlichen Austauschs, des kollegialen Zusammenhalts und der angenehmen Arbeitsatmosphäre. Insbesondere bedenke ich mich bei Daniel Gräf, Florian Hefner, Marlene Kuhn, Huong Nguyen, Nikolas Piechulek, Jan Fröhlich, Moritz Meiners, Simon Fröhlig sowie Robert Süß-Wolf und außerdem der Technik und Verwaltung. Ferner bedanke ich mich bei allen hoch motivierten und engagierten studentischen Mitarbeitenden für ihr Mitwirken an dieser Arbeit.

Mein herzlicher Dank gilt auch meinen Eltern, die mir meinen Bildungsweg ermöglicht und mich stets unterstützt haben sowie meiner Frau Sabine, die mir während der Anfertigung Rückhalt gegeben und Verständnis entgegengebracht hat. Sabine vielen lieben Dank!

Inhaltsverzeichnis

Vorwo Inhalts Forme Symbo Bildver Tabelle	ort sverze lzeich olverze rzeich enver	iii iichnis
1	Ein	leitung 1
	1.1	Motivation und Hintergrund 2
	1.2	Zielsetzung
	1.3	Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit
2	Zeit	t- und kostenintensive Qualifizierungsuntersuchungen 5
	2.1	Vielschichtige Strukturen aktueller Bordnetze
		2.1.1 Kabel und Leitungen
		2.1.2 Kontakte und Steckverbinder
	2.2	Aktuelle Herausforderungen für das Bordnetz12
		2.2.1 Komplexitätszunahme durch technologischen Wandel122.2.2 Auswirkungen der Änderungen im Nutzungsverhalten14
	2.3	Qualifizierungsstrategien vor dem Hintergrund des Wandels in
		Bordnetzen
		2.3.1 Notwendigkeit der Qualifizierung
	2.4	Beschleunigung von Qualifizierungstests durch ein dreigliedriges
	4	Lösungssystem
3	Rei	bkorrosion als Hauptschädigungsmechanismus
-	kra	ftschlüssiger Kontakte 27
	3.1	Grundlagen kraftschlüssiger Kontakte
		3.1.1 Abgrenzung zu anderen Verbindungsarten
		3.1.2 Mechanische und elektrische Grundlagen der Kontaktzone 30
	3.2	Auftretende Schädigungsmechanismen
		3.2.1 Mechanische Schädigungsmechanismen
		3.2.2 Chemische Schädigungsmechanismen
		3.2.3 Physikalische Effekte
		3.2.4 Keibkorrosion als kombinierter Schadigungsmechanismus40

4	Entkopplung der thermischen, chemischen und mechanischen Einflüsse		10
41 Methodik zur Entkopplung der Einflüsse			T 2
	4.1	A 11 Versuchsaufbau zur Entkopplung der Einflüsse	50
	4.2	Durchführung von Relativbewegungstests	50
	4.2	A 2 1 Auswertung der Widerstandsverläufe	5≁ ≂6
		4.2.2 Auswertung der Rauheitsprofile	50 63
	4.3	Vergleich mit klassischen thermischen Tests	58
	4.4	Zusammenfassung	74
5	Prü	fung anwendungsnaher Lastprofile	75
	5.1	Methodik zur Erstellung von Lastprofilen	76
		5.1.1 Analyse der Feldbelastung	76
		5.1.2 Erstellung von Lastprofilen	82
	5.2	Durchführung von Lastprofiltests	85
		5.2.1 Auswertung der Widerstandsverläufe	86
		5.2.2 Auswertung der Rauheitsprofile	94
	5.3	Vergleich zwischen Lastprofiltests und Temperaturwechseltests1	.01
	5.4	Zusammenfassung	07
6 Kombinierte Anwendung von CALT und Raffungsmoo		nbinierte Anwendung von CALT und Raffungsmodellen 10	9
	6.1	Methodik zur kombinierten Anwendung auf Relativbewegungstestst	10
		6.1.1 Grundlagen der CALT-Methodik1	10
		6.1.2 Grundlagen von Raffungsmodellen	113
	6.2	Durchführung der kombinierten Methodik	18
		6.2.1 Anwendung der CALT-Methodik	.19
	62	Vergleich zwischen konventioneller und kombinierter CALT-	-4
	0.3	Methodik	33
	6.4	Zusammenfassung	34
7	Zus	ammenfassung und Ausblick1	37
8	Sun	nmary and outlook1	39
Liter	atur	verzeichnis1	41
Verzei Verzei	chnis chnis	promotionsbezogener, eigener Publikationen1 promotionsbezogener studentischer Arbeiten1	60 61

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen

Abkürzung	Einheit	Definition
а	mm	Radius eines A-Spots
ā	mm	Mittlerer Radius der A-Spots
AF		Raffungsfaktor (engl. acceleration factor)
a_h	mm	Holm Radius der A-Spots
a _i	mm	Radi der einzelnen Mikroflächen
A_s	mm ²	Scheinbare Kontaktfläche
A _t	mm ²	Tragende Kontaktfläche
A_w	mm ²	Wirksame Kontaktfläche
ar		Geometriefaktor des Scheuermann- Modells
С	Bit/s	Datenrate
<i>C</i> ₁		Konstante des Arrhenius-Ansatzes
<i>C</i> ₂		Konstante des Bayerer-Modells
<i>C</i> ₃		Konstante des Coffin-Manson-Modells
<i>C</i> ₄		Konstante des Eyring-Modells
<i>C</i> ₅		Konstante des Eyring-Modells
<i>C</i> ₆		Konstante des allgemeinen Eyring- Modells
<i>C</i> ₇		Konstante des allgemeinen Eyring- Modells
<i>C</i> ₈		Konstante des Norris-Landzberg- Modells
С9		Konstante des Norris-Landzberg- Modells

<i>C</i> ₁₀		Konstante des modifizierten Norris-Landzberg-Modells
C ₁₁		Konstante des modifizierten Norris-Landzberg-Modells
<i>C</i> ₁₂		Konstante des Scheuermann-Modells
C ₁₃		Konstante des Scheuermann-Modells
<i>C</i> ₁₄		Konstante des Bayerer-1-Modells
<i>C</i> ₁₅		Konstante des Bayerer-1-Modells
C ₁₆		Konstante des Bayerer-1-Modells
<i>C</i> ₁₇		Konstante des Bayerer-2-Modells
C ₁₈		Konstante des Bayerer-2-Modells
C ₁₉		Konstante des Bayerer-2-Modells
E_a	eV	Aktivierungsenergie
f	Hz	Frequenz
f _{Diode}		Korrekturfaktor für verschiedene Chipdicken
F_k	Ν	Kontaktkraft
FL		Belastungsgrenze (engl. foolish limit)
g	m s ⁻²	Fallbeschleunigung
Ι	А	Stromstärke
J	$\mathrm{A}\mathrm{m}^{-2}$	Elektrische Stromdichte
k _b	$eV K^{-1}$	Boltzmann-Konstante
l_0	m	Ausgangslänge
L_h	h	Lebensdauer
L_{ha}	h	Lebensdauer im beschleunigten Test
m	kg	Masse
m_D	g	Masse an Wasserdampf
m_f	kg	Masse weibliches Kontaktelement
n _a		Anzahl A-Spots

N_v		Zyklen des Versuchs
p	Pa	aktueller Wasserdampfdruck
p_D	Ра	Sättigungsdampfdruck
p_W	Pa	Wasserdampfpartialdruck
p_{WS}	Pa	Sättigungspartialdruck
q		Konstante des Coffin-Manson-Modells
r _a	K min ^{−1}	Aufheizrate
r_1	μm	Relativbewegung 1 Lastprofil 1.1
r_2	μm	Relativbewegung 2 Lastprofil 1.1
r_3	μm	Relativbewegung 3 Lastprofil 1.2
r_4	μm	Relativbewegung 4 Lastprofil 1.2
r_5	μm	Relativbewegung 5 Lastprofil 1.3
r_6	μm	Relativbewegung 6 Lastprofil 1.3
r_7	μm	Relativbewegung 7 Lastprofil 1.3
r ₈	μm	Relativbewegung 8 Lastprofil 1.3
R_A	mΩ	Anfangswiderstand
R_E	mΩ	Engewiderstand
R_F	mΩ	Fremdschichtwiderstand
R_K	mΩ	Kontaktwiderstand
R_W	$kg m^2 s^{-2} mol^{-1} K^{-1}$	Gaskonstante
SL ₁		90 %-Belastungsniveau (engl. Stress Level)
SL ₂		80 %-Belastungsniveau (engl. Stress Level)
SL ₃		70 %-Belastungsniveau (engl. Stress Level)
t	h	Zeit
t_1	h	Haltedauer 1 Lastprofil 1.1
t_2	h	Haltedauer 2 Lastprofil 1.1

t_3	h	Haltedauer 3 Lastprofil 1.2
t_4	h	Haltedauer 4 Lastprofil 1.2
t_5	h	Haltedauer 5 Lastprofil 1.3
t_6	h	Haltedauer 6 Lastprofil 1.2
t _a	h	Aktive Parkzeit
t _i	h	Inaktive Parkzeit
t _h	h	Haltedauer
t _{on}	S	Lastimpulsdauer
t _{tA}	h	Temperatur während der Auslagerung
t _u	h	Umlagerungsdauer
t_v	h	Versuchsdauer
T _{92,5%}	°C	92,5 % Niveau der maximalen Temperatur
T_A	°C	Untere Temperatur Temperatur- wechseltest
T _B	°C	Obere Temperatur Temperatur- wechseltest
T_{B1}	°C	Obere Temperatur 1 Temperatur- wechseltest mit Lastprofil
T_{B2}	°C	Obere Temperatur 2 Temperatur- wechseltest mit Lastprofil
T_{C1}	°C	Mittlere Temperatur 1 Temperatur- wechseltest mit Lastprofil
T_{C2}	°C	Mittlere Temperatur 2 Temperatur- wechseltest mit Lastprofil
T _{fl}	°C	Thermische Belastungsgrenze (engl. foolish limit) der Steck- verbinderkontakte
T_{max}	°C	Maximale Temperatur
T_{RBT}	°C	Temperatur im Relativbewegungstest
T_{tA}	°C	Temperatur während der Auslagerung

U	V	Spannung
u _s	μm	Schwerpunktsverschiebung
v_{cb}	V	Kollektorgrundspannung bei Transis- toren
V	T. b. d.	Wählbare Spannung in Raffungs- modellen
V_{Fl}	m^3	Bestimmtes Gesamtvolumen
V_p	bar	Dampfdruck
Wl	μm	Verschleiß-Länge
W _{lm}	μm	Verschleiß-Länge aufgrund von mech- anischen Beanspruchungen
W _{lt}	μm	Verschleiß-Länge aufgrund von thermischen Beanspruchungen
Wq	μm^2	Verschleiß-Fläche
W _{qm}	μm^2	Verschleiß-Fläche aufgrund von mechanischen Beanspruchungen
W _{qt}	μm^2	Verschleiß-Fläche aufgrund von thermischen Beanspruchungen
x_{med}		Median der statistischen Auswertung
у		Konstante des Scheuermann-Modells

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen

Abkürzung	Definition
ANOVA	Varianzanalyse (engl. Analysis of Variance)
CALT	Kalibrierte Lebensdauertests (engl. calibrated accelerated lifetime test)
CuO ₂	Kupferoxid
CuSn ₄	Kupferlegierung mit 4 % Zinn, Bronze
CuZn ₃₀	Kupferlegierung mit 30 % Zink, Messing
E/E	Elektrisch und elektronisch
HALT	Stark beschleunigte Grenzlastprüfung (engl. highly accelerated lifetime test)
HASA	Prozessüberwachung (engl. highly accelerated stress audit)
HASS	Sortierprüfung bei stark erhöhter Belastung (engl. highly accelerated stress screening)
HAST	Prüfung bei stark erhöhter Belastung (engl. highly accelerated stress test)
LP	Lastprofil
LM	Levenberg-Marquardt-Verfahren
NiO	Nickeloxid
RBT	Relativbewegungstest
p-Wert	Signifikanzwert (engl. probability value)
RMS	Mittlerer quadratischer Fehler (engl. root mean square)
SnO	Zinnoxid
TaaS	Personentransport als Dienstleistung (engl. Transport as a Service)
Ts	Temperaturschock
Tw	Temperaturwechsel

Symbolverzeichnis

Verzeichnis der verwendeten griechischen Symbole

Abkürzung	Einheit	Definition
α		Wärmeausdehnungskoeffizient
α_{CuZn30}		Wärmeausdehnungskoeffizient CuZn30
β_0		Konstante des Scheuermann-Modells
β_{1-4}		Konstanten des Bayerer-Modells
$\Delta \varepsilon_{er}$		Kriechdehnung
ΔI	А	Teilströme
ΔR	mΩ	Widerstandsänderung
ΔR_{krit}	mΩ	Ausfallkriterium
ΔT	°C	Temperaturhub
$\Delta \bar{x}$		Abweichung vom Mittelwert in %
κ	$m \Omega^{-1} m m^{-2}$	Elektrische Leitfähigkeit
μ		Reibungskoeffizient
μ_r		Relative Permeabilität
μ_{Zn}		Reibungskoeffizient Zinn
ρ	$\Omega~mm^2~m^{-1}$	Spezifischer Widerstand
λ		Ausfallrate
σ	Ωm^2	Widerstand einer dünnen Schicht

Bildverzeichnis

Bild 1:	Ursachen der Belastungen in elektronischen Bauteilen während des Betriebs nach [17]2
Bild 2:	Kapitelübersicht Kapitel 2, "Zeit- und kostenintensive Qualifizierungs-strategien"
Bild 3:	Exemplarische Übersicht über die Komponenten eines modernen, automobilen Bordnetzes nach [18]6
Bild 4:	Exemplarischer Aufbau eines <i>Sternvierer-Kabels</i> , welches häufig im Kraftfahrzeugbereich eingesetzt wird nach [24, 25]7
Bild 5:	Bestandteile eines Steckverbinders, mit Unterscheidung in Kontaktstift und Kontaktbuchse nach [28, 29]9
Bild 6:	Schichtaufbau lösbarer Steckverbinderkontakte nach [34] 10
Bild 7:	Möglichkeiten der Beschleunigung von Lebensdauertests nach [49]16
Bild 8:	Einteilung beschleunigter Lebensdauertests in qualitative Prüfungen und quantitative Prüfungen nach [49, 55]18
Bild 9:	Zusammenhang zwischen Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t_x)$ und Zuverlässigkeit $R(t_x)$ über der Ausfallzeit t nach [54]19
Bild 10:	Empfehlung der ISO 16750-4 für zu verwendende Temperaturklassen in Abhängigkeit des Einbauorts nach [64]
Bild 11:	Ablauf der Qualifizierungsprüfungen während der Prüf- gruppe 19 "Umweltsimulation" der Volkswagen Konzern- norm VW 75174 für Steckverbinder nach [53] 23
Bild 12:	Beitrag von unter anderem Lebensdauermodellen zur Reduktion der Komplexität während der Produkt- entstehung im automobilen Bordnetz-bereich nach [P1] 26
Bild 13:	Aufbau des Kapitels ₃ "Reibkorrosion als Haupt- schädigungsmechanismus" 27

Bild 14:	Einteilung von unterschiedlichen elektrischen Verbin- dungsarten nach Ur-, Umformen und in stoff- beziehungsweise form- und kraftschlüssige Verbind- ungsarten nach [30]
Bild 15:	Scheinbare, tragende, quasimetallische und wirksame Kontaktfläche sowie die unterschiedliche Auswirkung einer niedrigen beziehungsweise hohen Kontaktkraft nach [65, 26, 28]
Bild 16:	Schema der Stromfäden im homogenen Leiter und mit Stromenge nach [51]
Bild 17:	Arten von Berührungsflächen bei elektrischen Kontakten nach [79]
Bild 18:	Fehler an kraftschlüssigen Kontakten unterteilt nach Einfluss, Auswirkung und zugrundeliegenden Schädi- gungsmechanismus nach [34]
Bild 19:	Ablauf des Adhäsions- und Polierverschleiß und deren Verschleißerscheinungsformen nach [31, 82]
Bild 20:	Ablauf des abrasiven Verschleiß und dessen Verschleißerscheinungsformen nach [82]
Bild 21:	Unterschiedliche Arten von bei Steckkontakten auftretenden Fremdschichten nach [28]
Bild 22:	Wachstum von Oxidschichten von Kupferoxid (CuO2), Zinnoxid (SnO) und Nickeloxid (NiO) nach [77]
Bild 23:	Exemplarische Darstellung der <i>Spannungsrelaxation</i> an Steckkontakten, Darstellung der <i>Kontaktkraft</i> in % bei T_{max} von 85 °C, 105 °C und 125 °C im Vergleich zu 22 °C 39
Bild 24:	Schematischer Ablauf des Reibkorrosionsprozesses zwi- schen zwei Kontaktpartnern nach [77, 88]41
Bild 25:	Charakteristische Schäden beim Auftreten von Reib- korrosion nach [91, 92]
Bild 26:	Einflüsse auf die Reibkorrosion unterteilt nach den Haupteinflussfaktoren Material, Kontakteigenschaften, Umwelt und Kontaktbedingungen
Bild 27:	Aufbau Kapitel 4 "Entkopplung der thermischen und mechanischen Einflüsse"

Bild 28:	Schematische Darstellung des entwickelten Versuchs- aufbaus zur Einbringung von Relativbewegungen in die Kontaktzone von Steckverbindungen inklusive der benötigten Komponenten
Bild 29:	Detailansicht des Versuchsaufbaus mit Lagerung der Kontakte und beispielhafter Relativbewegung
Bild30:	Verwendete Standard-Timer-Kontakte mit entsprech- enden Abmessungen, inklusive metallographische Schliffbilder zur Bestimmung der Zinn-schichtdicke a) männliches Kontaktelement aus CuSn4, b) weibliches Kontaktelement aus CuZn30 [121, 122]53
Bild31:	Anlieferungszustand der Standard-Timer-Kontakte a) Digital-Mikroskopieaufnahme, b) Laser-Scanning Mikro- skopieaufnahme mit farblich markierter Ober- flächenunregelmäßigkeit sowie Flächenplot der Oberflächenrauheit des Bereichs
Bild 32:	Vergleich der auftretenden Relativbewegungen zwischen a) thermischen Test (Temperaturschock) und b) mechanischem Test (Relativbewegungstests), bei $T_{max} =$ 105 °C und $t_h = 15$ min, mit dargestellten Verschleiß- Längen W_l und Verschleiß-Flächen Wq nach [P3]
Bild 33:	Ablauf der Methodik zur Auswertung der Durch- gangswiderstände der Steckverbinderkontakte mithilfe der Berechnungssoftware MATLAB
Bild 34:	Übersicht über die Widerstandsverlaufskategorien a) Klasse 1 "konstanter Verlauf", b) Klasse 2 "kontinuierlicher Anstieg", c) Klasse 3 "irregulärer Verlauf"
Bild 35:	Vergleichende Betrachtung der Widerstandsverläufe für a) $T_{RBT} = 105 \text{ °C}$ und b) $T_{RBT} = 125 \text{ °C}$; je 10 Kontaktpaare; 100 h thermische Auslagerung; bei $T_{tA} = 125 \text{ °C}$; Relativbewegungen: $r_1 = 500 \mu\text{m}$; Haltezeit: $t_1 = 0,25 h$; $v = 8,4 \cdot 10 - 7 \text{ m s} - 1$
Bild 36:	Nach [P ₅] kategorisierte Widerstandsverläufe bei Relativ- bewegungstests (Relativbewegungen: $r_1 = 500 \mu$ m), a) Versuch 4.1 $T_{RBT} = 105 ^{\circ}$ C, b) Versuch 4.2 $T_{RBT} = 125 ^{\circ}$ C, es treten nur Verläufe der Klasse 1 "konstanter Verlauf" und der Klasse 2 "kontinuierlicher Anstieg" auf

Bild 37:	Boxplots der maximalen Widerstände der Relativ- bewegungstests bei $T_{RBT} = 105$ °C und $T_{RBT} = 125$ °C, mit Angabe des Ausfallkriteriums und des Medians <i>xmed</i> … 60
Bild 38:	Vergleichende Betrachtung der Widerstandsverläufe der Relativbewegungstests für a) $r_1 = 500 \mu\text{m}$ und b) $r_1 = 250 \mu\text{m}$; je 10 Kontaktpaare; 100 h thermische Auslagerung; bei $T_{tA} = 125 ^{\circ}\text{C}$; Temperatur: $T_{RBT} =$ $125 ^{\circ}\text{C}$; Haltezeit: $t_1 = 0,25 \text{h}$; $v = 8,4 \cdot 10^{-7} \text{m s}^{-1}$ 61
Bild 39:	Nach [P5] kategorisierte Widerstandsverläufe bei Relativbewegungstests (Temperatur: $T_{RBT} = 125$ °C), a) $r_1 = 500 \mu\text{m}$, b) $r_1 = 250 \mu\text{m}$, es treten nur Verläufe der Klasse 1 "konstanter Verlauf" und der Klasse 2 "kontinuierlicher Anstieg" auf
Bild 40:	Boxplots der maximalen Widerstände der Relativbewegungstests mit $r_1 = 500 \mu\text{m}$ und $r_1 = 250 \mu\text{m}$, mit Angabe des Ausfallkiteriums und des Medians x_{med}
Bild 41:	Schematischer Ablauf der Methodik zur Auswertung der Mikroskopieaufnahmen der Kontaktzonen mithilfe der Berechnungssoftware MATLAB
Bild 42:	Vergleich der Digitalmikroskopieaufnahmen im Relativbewegungstest a) Versuch 4.1, $T_{RBT} = 105$ °C, $r_1 = 500 \ \mu\text{m}$, b) Versuch 4.2, $T_{RBT} = 125$ °C, $r_1 = 500 \ \mu\text{m}$, c) Versuch 4.3, $T_{RBT} = 125$ °C, $r_1 = 250 \ \mu\text{m}$
Bild 43:	Vergleich der Mikroskopieaufnahmen a), b) und c) sowie der Oberflächen-rauheiten der Relativbewegungsversuche 4.1, 4.2 und 4.3, d), e) und f) innerhalb der Kontaktzone sowie g), h) und i) außerhalb der Kontaktzone
Bild 44:	Boxplots der maximalen Höhe S_z und der mittleren arithmetischen Höhe S_a der Oberflächen sowie der <i>Verschleiß-Fläche Wq</i> , gemittelt anhand von je sechs Kontaktproben der Relativbewegungstests mit $T_{RBT} =$ 105 ° <i>C und T_{RBT}</i> = 125 ° <i>C</i> , unter Angabe des Medians x_{med}

Bildverzeichnis

Bild 45:	Boxplots der maximalen Höhe S_z und der mittleren arithmetischen Höhe S_a der Oberflächen sowie der Verschleiß-Fläche W_q , gemittelt anhand von je sechs Kontaktproben der Relativbewegungstests mit Relativbewegung $r_1 = 250 \mu\text{m}$ und $r_1 = 500 \mu\text{m}$, unter Angabe des Medians x_{med}
Bild 46:	Vergleich der Widerstandsverläufe zwischen a) Relativbewegungstest und b) konventionellen Temperaturwechseltest; je 10 Kontaktpaare; 100 h thermische Auslagerung; bei $T_{tA} = 125$ °C, $T_{RBT} / T_B =$ 125 °C
Bild 47:	Vergleich der Widerstandsverlaufskategorien nach [P ₅] a) Relativbewegungstest mit $r_1 = 250 \mu\text{m}$ b) Temperaturwechselversuch mit $t_h = 2 \text{h}$ und $t_u = 2 \text{h}$, Temperatur $T_{RBT} / T_B = 125 ^{\circ}\text{C}$
Bild ₄ 8:	Boxplots der maximalen gemessenen Widerstände <i>Rmax</i> , gemittelt anhand von je zehn Kontaktproben des Relativbewegungstests mit $T_{max} = 125$ °C und zehn Kontaktproben des Temperaturwechseltests mit T_{RBT} / $T_B = 125$ °C, unter Angabe des Medians x_{med}
Bild 49:	Vergleich der Digitalmikroskopieaufnahmen a) Versuch 4.2, Relativ-bewegungstest, $T_{RBT} = 125$ °C, $r_1 = 500 \mu\text{m}$, b) Versuch 6.1, Temperaturwechseltest, $T_B = 125$ °C, $t_h = 2 \text{ h}, t_u = 2 \text{ h}$
Bild 50:	Vergleich der Mikroskopieaufnahmen a) und b) sowie der Oberflächenrauheiten des Relativbewegungstests mit $T_{RBT} = 125$ °C und des Temperaturwechsels mit $T_B = 125$ °C, c) und d) innerhalb der Kontaktzone, e) und f) außerhalb der Kontaktzone
Bild 51:	Boxplots der maximalen Höhe S_z und der mittleren arithmetischen Höhe S_a der Oberflächen sowie die <i>Verschleiß-Fläche</i> in der Kontaktzone W_q , gemittelt anhand von je sechs Kontaktproben der Relativ- bewegungstests mit $T_{RBT} = 125$ °C und sechs Kontaktproben der Temperaturwechseltests mit $T_B =$ 125 °C, unter Angabe des Medians x_{med}

Bild 52:	Aufbau Kapitel 5 "Prüfung anwendungsnaher Lastprofile" mit Unterteilung in Methodik beziehungsweise Zusammenfassung, Durchführung sowie Auswertung
Bild 53:	Schematische Darstellung der Temperaturverteilung im Motorraum während eines Fahrzyklus, inklusive der Einteilung in die Bereiche I – III nach [50]77
Bild 54:	p.T-Diagramm von Wasser mit Triplepunkt und Taupunkt sowie Phasenbereiche nach [133]79
Bild 55:	Verteilung der Luftfeuchtigkeitsklassen unterteilt nach Kaltland, Feucht- / Warmland sowie Heißland nach [16]80
Bild 56:	Schematische Darstellung des Temperaturprofils im Motorraum auf Basis des täglichen Nutzungsverhaltens europäischer Pkw-Fahrer nach [140]82
Bild 57:	Relativbewegungs-Zeit-Verlauf des Relativbewegungs- Lastprofils A.1 "jahreszeitlicher Verlauf" mit oberer und unterer Haltezeit t_1 und t_2 sowie Relativbewegung 1 r_1 und Relativbewegung 2 r_2 nach [P6]
Bild 58:	Relativbewegungs-Zeit-Verlauf des Relativbewegungs- Lastprofils A.2 "täglicher Verlauf" mit oberer und unterer Haltezeit t_3 und t_4 sowie Relativbewegung 3 r_3 und Relativbewegung 4 r_4
Bild 59:	Relativbewegungs-Zeit-Verlauf des Relativbewegungs- Lastprofils A.3 "komb-inierter Verlauf" mit oberer und unterer Haltezeit t_5 und t_6 sowie Relativbewegungen r_5 , r_6 , r_7 , r_8 nach [P6]
Bild 60:	Temperatur-Zeit-Verlauf des Lastprofils B.1 "kombinierter Verlauf Tw" mit oberer und unterer Haltezeit t_7 und t_8 sowie Temperaturen T_{B1} , T_{B2} , T_{C1} , T_{C2} mit Temperaturänderungsgeschwindigkeit vt nach [P6]85
Bild 61:	Vergleichende Betrachtung der Widerstandsverläufe für a) RB-Lastprofil A.1 "jahreszeitlicher Verlauf" und b) A.2 "tägliche Nutzung"; je 10 Kontaktpaare; 100 h thermische Auslagerung; bei $T_{tA} = 125$ °C; $T_{RBT} = 125$ °C; Relativ- bewegungen: $r_1 = 500 \ \mu\text{m}$; $r_2 = 250 \ \mu\text{m}$; $r_3 = 500 \ \mu\text{m}$; $r_4 = 250 \ \mu\text{m}$; Haltezeit: $t_{1/2} = 0.5 \ \text{h}$, $t_3 = 0.25 \ \text{h}$; $t_4 = 0.5 \ \text{h}$; $v = 0.840 \ \mu\text{m/s}$

Bild 62:	Widerstandsverläufe für RB-Lastprofil A.3 "kombinierter Verlauf", 100 h thermische Auslagerung 100 h thermische Auslagerung; bei $T_{tA} = 125$ °C; $T_{RBT} = 125$ °C; Relativbewegungen: $r_5 = 500$ µm; $r_6 = 250$ µm; $r_7 = 250$ µm; $r_8 = 125$ µm; Haltezeit: $t_5 = 0.5$ h, $t_6 = 0.25$ h; v = 0.840 µm/s nach [P6]
Bild 63:	Nach [P5] kategorisierte Widerstandsverläufe bei der Lastprofilprüfung im Relativbewegungstests, a) RB- Lastprofil A.1 "jahreszeitlicher Verlauf", b) RB-Lastprofil A.2 "täglicher Verlauf, c) RB-Lastprofil A.3 "kombinierter Verlauf", mit $T_{RBT} = 125$ °C, es treten nur Verläufe der Klasse 1 und der Klasse 2 auf
Bild 64:	Boxplots der maximalen Widerstandsänderung ΔR der Lastprofil-Versuche mit den RB-Lastprofilen A.1 "jahreszeitlicher Verlauf", A.2 "tägliche Nutzung" und A.3 "kombinierter Verlauf", bei $T_{RBT} = 125$ °C, mit Angabe des Medians <i>xmed</i>
Bild 65:	Vergleichende Betrachtung der Widerstandsverläufe für a) RB-Lastprofil A.3 "kombinierter Verlauf" und b) TW- Lastprofil B.1 "kombinierter Verlauf TW"; je 10 Kontaktpaare; 100 h thermische Auslagerung; bei $T_{tA} =$ 125 °C, $N_V = 2$, $t_V = 80$ h mit $T_{RBT} / T_{B1} = 125$ °C nach [P6]
Bild 66:	Vergleichende Betrachtung der Widerstandsverläufe für a) RB-Lastprofil A.3 "kombinierter Verlauf" und b) TW- Lastprofil B.1 " kombinierter Verlauf Tw"; je 10 Kontaktpaare; 100 h thermische Auslagerung; bei T_{tA} = 125 °C, N_V = 10, t_V = 400 h mit T_{RBT} / T_{B1} = 125 °C91
Bild 67:	Widerstandsverlaufskategorien kategorisiert nach [P5] a) Versuch 5.4 mit RB-Lastprofil A.3 "kombiniert" 80 h Dauer, b) Versuch 5.5 mit RB-Lastprofil A.3 400 h Dauer, c) Versuch 5.6 mit TW-Lastprofil B.1 "kombiniert TW" 80 h, d) Versuch 5.7 mit TW-Lastprofil B.1 400 h, mit T_{RBT} / $T_{B1} = 125 ^{\circ}\text{C}$

Bild 68:	Boxplots der maximalen Widerstandsänderung ΔR der Lastprofil-Versuche mit den Lastprofilen A.3 "kombi- nierter Verlauf" und Lastprofilen B.1 "kombiniert Temperaturwechsel", bei $T_{RBT} / T_{B1} = 125$ °C, mit Angabe des Medians x_{med}
Bild 69:	Vergleich der Temperaturverläufe von Klimakammer und einem einzelnen Steckkontakt, zusätzlich ist der Taupunkt eingezeichnet
Bild 70:	Vergleich der Digitalmikroskopieaufnahmen a) Versuch 5.1, RB-LP A.1 "jahreszeitlicher Verlauf", b) Versuch 5.2, RB-LP A.2 "tägliche Nutzung", c) Versuch 5.3, RB-LP A.3 "kombinierter Verlauf", bei jeweils $T_{RBT} = 125$ °C
Bild 71:	Vergleich der Mikroskopieaufnahmen a) bis c) sowie Oberflächenrauheiten der Lastprofiltests 5.1, 5.2 und 5.3, mit RB-Lastprofilen A.1 "jahreszeitlich", A.2 "täglich" sowie A.3 "kombiniert", e) – g) Innerhalb der Kontaktzone, i) – k) außerhalb der Kontaktzone
Bild 72:	Boxplots der maximalen Höhe S_z und der mittleren arithmetischen Höhe S_a der Oberflächen, gemittelt anhand von drei Kontaktproben der Relativbewegungstests mit den RB-Lastprofilen A.1 "jahreszeitlich", A.2 "täglich" sowie A.3 "kombiniert", unter Angabe des Medians x_{med}
Bild 73:	Vergleich der Digitalmikroskopieaufnahmen a) Versuch 5.5, RB-LP A.3 "kombinierter Verlauf", b) Versuch 5.7, TW-LP A.3 "kombiniert TW", bei $T_{RBT} / T_{B1} = 125$ °C97
Bild 74:	Vergleich der Mikroskopieaufnahmen a) und b) sowie Oberflächenrauheiten der Lastprofiltests 5.4 und 5.6 mit RB-Lastprofil A.3 "kombiniert", sowie TW-Lastprofil B.1 "kombiniert Tw" c) und d) Innerhalb der Kontaktzone, e) und f) außerhalb der Kontaktzone, mit $t_e = 80 h$

Bildverzeichnis

- Bild 76: Boxplots der maximalen Höhe S_z und der mittleren arithmetischen Höhe S_a der Oberflächen sowie der Verschleiß-Fläche W_q , gemittelt anhand von drei Kontaktproben der RB-Lastprofiltests 5.4 und 5.5 (Lastprofil A.3 "kombiniert") sowie der Lastprofiltests im Temperaturwechsel 5.6 und 5.7 (Lastprofil B.1 "kombiniert TW")............100
- Bild 77: Vergleich der Widerstandsverläufe zwischen a) konventionellem TW-Test und b) TW-Test mit Lastprofil B.1 "kombinierter Verlauf Tw"; je 10 Kontaktpaare; 100 h thermische Auslagerung; bei $T_{tA} = 125$ °C, $t_{tA} = 100$ h101
- Bild 78: Vergleich der Widerstandsverlaufskategorien nach [P5] a) Versuch 6.1 konventioneller Temperaturwechsel, b) Versuch 5.7 mit Lastprofil B.1 "kombinierter Verlauf Tw" 102
- Bild 80: Vergleich der Digitalmikroskopieaufnahmen a) Versuch 6.1, Temperatur-wechsel mit $T_A = -40$ °C, $T_B = 125$ °C, b) Versuch 5.7, TW-LP B.1 "kombiniert Tw", bei $T_B = 125$ °C......103

Bild 82:	Boxplots der maximalen Höhe S_z und der mittleren arithmetischen Höhe S_a der Oberflächen sowie der Verschleiß-Fläche W_q gemittelt anhand von drei Kontaktproben, der Versuche 6.1 Temperaturwechsel sowie des Lastprofiltests im Temperaturwechsel Versuch 5.7 (TW-Lastprofil B.1 "kombiniert Tw")
Bild 83:	Vergleichende Betrachtung der Polynominalen Fits der Versuche 5.5 Relativbewegungs-Lastprofil A.3, 5.7 Temperaturwechsel-Lastprofil B.1 und 6.1 klassischer Temperaturwechsel mit $T_B = 125$ °C unter Angabe der polynominalen Gleichungen sowie dem verwendeten Temperatur-Zeit- bzw. Relativbewegungsweg-Zeit-Profil106
Bild 84:	Aufbau des Kapitels 6, "Kombinierte Anwendung von CALT und Raffungsmodellen"
Bild 85:	Beispielhaftes Vorgehen nach der CALT-Methodik, mit eingetragener Belastungsgrenze <i>FL</i> , Lebensdauern bei <i>SL</i> ₁ , <i>SL</i> ₂ sowie <i>SL</i> ₃ , mittlerer Lebensdauer und eingetragener 1 %- sowie 99 %-Vertrauensgrenzen nach [142] 112
Bild 86:	Temperatur-Zeit-Verlauf der Bestimmung der mit der Belastungsgrenze <i>FL</i> gleichzusetzenden Temperatur T_{Fl} bei kraftschlüssigen Steckverbinder-kontakten mit $T_A =$ -40 °C, $t_h = 2$ h, $t_u = 2$ h119
Bild 87:	Nach [P ₅] kategorisierte Widerstandsverläufe bei Temperaturwechseln zur Bestimmung der Belastungsgrenze <i>FL</i> , a) $T_B = +105$ °C, b) $T_B = +115$ °C, c) $T_B = +125$ °C, d) $T_B = +135$ °C
Bild 88:	Boxplots der maximalen Widerstände R_{max} der Versuche zur Bestimmung der Belastungsgrenze <i>FL</i> , bei $t_h = 2$ h, $t_u = 2$ h, mit Angabe des Ausfallkriteriums sowie des Medians
Bild 89:	Konturdiagramm der Ausfallwahrscheinlichkeiten für Temperaturwechsel mit $T_A = -40$ °C, $t_u = 2$ h, $N_V = 30$, 40 Kontaktpaare
Bild 90:	Vergleichende Betrachtung der Widerstandsverläufe für a) TW-Test mit $T_B = 115$ °C und b) TW-Test mit $T_B = 125$ °C; je 10 Kontaktpaare; 100 h thermische Auslagerung; bei $T_{tA} =$ 125 °C, $N_V = 30$, $t_V = 240$ h

Bild 91:	Vorhersage der Lebensdauer für einen Temperatur- wechselversuch auf 77,8 %-Niveau ($\Delta T = 145$ °C, $T_B =$ +105 °C) der Belastungsgrenze <i>FL</i> mithilfe von zwei Belastungstests auf 92,5 % ($\Delta T = 165$ °C, $T_B =$ +125 °C) sowie 85,2 % $\Delta T = 165$ °C, $T_B =$ +115 °C der Belastungsgrenze
Bild 92:	Vorgehen bei der Anwendung von Raffungsmodellen, Auswahl des passenden Modells und Validierung durch einen weiteren Temperaturwechselversuch125
Bild 93:	Lebensdauervorhersage für eine maximale Temperatur von 105 °C / Temperaturdifferenz von 145 °C anhand der Raffungsmodelle a) Arrhenius-Modell, b) Coffin-Manson- Modell
Bild 94:	Lebensdauervorhersage für eine maximale Temperatur von 105 °C / Temperaturdifferenz von 145 °C anhand der Raffungsmodelle a) Norris-Landzberg-Modell, b) Modifiziertes Norris-Landzberg-Modell
Bild 95:	Lebensdauervorhersage für eine maximale Temperatur von 105 °C / Temperaturdifferenz von 145 °C anhand der Raffungsmodelle a) Bayerer-Modell 1, b) Bayerer-Modell 2 . 129
Bild 96:	Verifikation der Lebensdauervorhersage für eine maximal Temperatur von $T_{max} = 105$ °C und einer Temperatur- änderung von $\Delta T = 145$ °C
Bild 97:	Kombination des passenden Raffungs-Modells mit der kalibrierten Lebensdauermethodik und Vorhersage der Lebensdauer für eine Maximaltemperatur von $T_{max} = 105$ °C und einer Temperaturänderung von $\Delta T = 145$ °C
Bild 98:	Vergleich der Lebensdauervorhersage mittels kon- ventioneller und kombinierter CALT-Methodik für eine Maximaltemperatur von $T_{max} = 105$ °C und einer Temperaturänderung von $\Delta T = 145$ °C

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Temperaturklassen für Qualifizierungstests von Kraftfahrzeugkomponenten in Abhängigkeit des Ein- bauorts nach [63–65]
Tabelle 2:	Quantifizierung der Schädigung nach [92] zwischen thermischen Test (Temperaturschock) sowie mech- anischen Test (Relativbewegung)
Tabelle 3:	Randomisierter vollfaktorieller Versuchsplan mit den Faktoren A – Temperatur und B – Bewegungsamplitude, jeweils 10 Kontaktpaare
Tabelle 4:	Klassifizierung der durchschnittlichen Temperatur- differenzen anhand der Temperaturklassen nach [131]
Tabelle 5:	Mittelwerte der Kenngrößen der Pkw-Nutzung in Deutschland nach [130, 140]
Tabelle 6:	Übersicht der auf ihre Eignung für Steckkontakte überprüften Raffungsmodelle inklusive der in die Gleichungen eingehenden Parameter und den damit abzubildenden Spannungen
Tabelle 7:	Übersicht der untersuchten Raffungsmodelle mit berechneten Parametern, Lebensdauervorhersage in h und Abweichung zum realen Versuch in %

1 Einleitung

Beim Kauf eines Neuwagens ist die Zuverlässigkeit die wichtigste Produkteigenschaft für Kunden. Sie wird als relevanter als die Bewertungskriterien Kaufpreis oder Fahrzeugdesign eingestuft. [1] Aufgrund dieser enormen Bedeutung der Zuverlässigkeit versuchen Unternehmen sich durch eine erhöhte Zuverlässigkeit einen komparativen Wettbewerbsvorteil zu verschaffen [2]. Gleichzeitig steigt jedoch durch technologischen Fortschritt die Anzahl an elektronischen und elektrischen Bauteilen in Fahrzeugen und damit einhergehend in Bordnetzen stetig an [3]. Als Resultat ist das Bordnetz mit 45 kg bis 54 kg in durchschnittlichen Fahrzeugen [4] zum schwersten Zukaufteil im Automobil geworden. Darüber hinaus entsprechen die Kosten für den Kabelbaum mittlerweile circa dem Wert der Rohkarosse [5]. Diese Zahlen verdeutlichen die Bedeutung des Bordnetzes für das Gesamtfahrzeug. Jedoch steigen mit der Komplexitätszunahme nicht nur der Preis und das Gewicht, sondern auch die Anzahl an Verbindungsstellen, den sogenannten Kontakten [6].

Bisher konnte beim Nachweis der Zuverlässigkeit auf Erfahrungswerte zurückgegriffen werden. Vor dem Hintergrund des Wandels in der Automobilindustrie und der damit einhergehenden Anwendung der Norm zur funktionalen Sicherheit ISO 26262 [7] müssen neue Konzepte zur Beurteilung der Lebensdauer gefunden werden. [8] In diesem Zusammenhang sind Steckverbinder häufig für Fehlfunktionen in der Automobilelektronik verantwortlich [9]. Bevor jedoch die Zuverlässigkeit untersucht oder verbessert werden kann. muss ein umfassendes Verständnis der zugrunde liegenden Fehlerursachen geschaffen werden [10]. Daher liegt der Fokus dieser Arbeit auf der Entwicklung von Methoden zur schnelleren Beurteilung der Zuverlässigkeit von automobilen Klemmkontakten, vor allem Anwendung in einer frühen zur Entwicklungsphase.

1.1 Motivation und Hintergrund

Mit zunehmender Automatisierung von Fahrfunktionen steigen auch die Anforderungen an die Zuverlässigkeit des Bordnetzes. Laut einer Studie wird der weltweite automobile Mobilitätsmarkt bis 2030 zu über einem Drittel von selbstfahrenden Fahrzeugen eingenommen [11]. Dabei muss das Fahrzeug in der Lage sein, im Normal- oder Fehlerfall ohne Eingriff des Fahrers zu reagieren [12]. Dies macht geeignete Methoden zur Absicherung der funktionalen Sicherheit notwendig [13]. Da 75 % der Fehler ihre Ursache in der Planungs- und Entwicklungsphase haben [14], sind diese einem möglichst in frühen Stadium während des Produktentstehungsprozesses zu beheben [15]. Hierbei ist iedoch ein standardisiertes Vorgehen ohne Anpassungen an das entsprechende Produkt nicht zielführend [16]. Daher ist es essenziell für jedes Produkt beziehungsweise jeden Schädigungsmechanismus eine individuelle Prüfstrategie zu entwickeln.

Im Speziellen sind die auftretenden Belastungen separat auf ihre Auswirkungen auf das zu entwickelnde Bauteil zu untersuchen. Unter anderem stellen beispielsweise Temperaturbeanspruchungen mit circa 55 % die häufigste Ursache an äußeren Belastungen für elektronische und elektrische Komponenten (E/E-Komponenten) dar (siehe Bild 1) [17]. Aus diesem Grund fokussiert sich diese Arbeit auf die Untersuchung und Absicherung von Temperaturbelastungen bei Steckverbinderkontakten im Fahrzeug.



Bild 1: Ursachen der Belastungen in elektronischen Bauteilen während des Betriebs nach [17]

1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit besteht in der Entwicklung von Methoden zur Beschleunigung von Lebensdauerprüfungen während der Entwicklung und Qualifizierung von elektrischen Kontakten. Hierzu werden drei unterschiedliche Strategien erarbeitet und an einer beispielhaften Kontaktgeometrie evaluiert. Das Augenmerk liegt auf einer im Vergleich zu konventionellen thermischen Tests zeit- und kostensparenden Methodik, die dennoch einen Erkenntnisgewinn über die zugrunde liegenden Schädigungsmechanismen und die zu erwartende Lebensdauer ermöglicht.

Die Erste der drei entwickelten Methodiken basiert auf der Entkopplung der thermischen und mechanischen Schädigungen während der thermischen Prüfung von Steckkontakten. Hierzu soll ein Versuchsaufbau entwickelt werden, der eine getrennte Steuerung der auftretenden thermischen sowie mechanischen Belastungen ermöglicht.

Zweitens sollen nach einer Analyse des Pkw-Nutzungsverhaltens, Lastprofile entwickelt werden, welche die tatsächlich auftretenden Belastungen während des Fahrbetriebs besser widerspiegeln. Hierzu werden sowohl jahreszeitliche als auch tägliche Veränderungen in der Belastung untersucht.

Abschließend soll auf Basis der Ermittlung des Ausfallverhaltens der Kontaktierung die Anwendung von analytischen Lebensdauermodellen, die vor allem bei Lötverbindungen weite Anwendung finden, überprüft werden. Als grundlegende Neuerung wird eine Kombination der Raffungsmodelle mit der kalibrierten Lebensdauertest-Methodik (CALT, engl. calibrated accelerated lifetime test) angestrebt, um den Aufwand und die benötigte Anzahl an Tests möglichst gering zu halten. Hierdurch sollen dennoch fundierte Aussagen über die Lebensdauer der Kontakte ermöglicht werden.

Ziel ist es insgesamt einen Lösungsweg für die zukünftige Qualifizierung neu entwickelter Kontakte aufzuzeigen und ein systematisches, abgesichertes Vorgehensmodell aufzustellen.

1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Kapitel 2 beschreibt die Grundlagen moderner Bordnetze, die Notwendigkeit der Qualifizierung sowie die durch den Wandel in der Mobilität entstehenden Herausforderungen für die Kabelbäume. Hierbei geht Kapitel 2.1 kurz auf die Komponenten, vor allem die Steckverbinder ein, aus denen Bordnetze bestehen. Kapitel 2.2 stellt anschließend die aktuellen und zukünftigen Herausforderungen in der automobilen Signalund Leistungsvernetzung dar, bevor Kapitel 2.3 die bestehenden Qualifizierungsstrategien der steigenden Komplexität gegenüberstellt. Anschließend werden in Kapitel 2.4 drei in dieser Arbeit verfolgte Möglichkeiten aufgezeigt, um den bestehenden Zielkonflikt zu lösen.

Um die Eignung von beschleunigten Qualifizierungsuntersuchungen zur Wiedergabe des realen Ausfallverhaltens zu überprüfen, sind grundlegende Kenntnisse über die an den Kontakten auftretenden Schädigungsmechanismen notwendig. Hierzu wird die Basis in Kapitel 3 anhand einer ausführlichen Analyse gelegt. Es wird zuerst auf die Grundlagen kraftschlüssiger Kontakte in Kapitel 3.1 eingegangen. Anschließend folgt in Kapitel 3.2 eine Beschreibung der wichtigsten Schädigungsmechanismen, wobei das Hauptaugenmerk aufgrund der gravierenden Auswirkungen auf Steckverbinderkontakte vor allem auf der Reibkorrosion liegt.

Den ersten Lösungsansatz der Qualifizierungsproblematik stellt die in Kapitel 4 beschriebene Entkopplung der thermischen und mechanischen Belastungen dar. In Kapitel 4.1 wird hierzu ein Prüfstand zur Einbringung von Mikrobewegungen in die Kontaktzone aufgebaut. Anschließend werden Relativbewegungstests (RBT) durchgeführt und ausgewertet (Kapitel 4.2). Zur Bewertung der Anwendbarkeit wird in Kapitel 4.3 ein Vergleich zu konventionellen thermischen Qualifizierungstests gezogen.

Aufbauend auf den in Kapitel 4 erzielten Ergebnissen wird die Möglichkeit zur Untersuchung anwendungsnaher Lastprofile in Kapitel 5 evaluiert. Hierbei werden Lastprofile, orientiert am Pkw-Nutzungsverhalten, in Kapitel 5.1 erstellt und anschließend sowohl im Relativbewegungstest als auch auf Basis thermischer Zyklen geprüft (Kapitel 5.2). In Kapitel 5.3 folgt ebenfalls eine Gegenüberstellung der Temperaturwechsel-Lastprofiltests mit regulären thermischen Testmethoden.

Abschließend wird als dritte Methode in Kapitel 6 eine Kombination von kalibrierten beschleunigten Lebensdauertests mit geeigneten Lebensdauermodellen untersucht. Zum umfassenden Verständnis dieser kombinierten Methodik folgen in Kapitel 6.1 die Grundlagen der kalibrierten Lebensdauertests sowie der Raffungsmodelle. Als Nächstes wird die Methodik exemplarisch auf die Lebensdauerprüfung von Steckkontakten angewandt (Kapitel 6.2). Abschließend wird in Kapitel 6.3 ein Vergleich zwischen klassischer CALT-Methodik und kombinierter Methodik sowie eine Bewertung durchgeführt, bevor in Kapitel 7 die Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick gegeben wird.
2 Zeit- und kostenintensive Qualifizierungsuntersuchungen

Kapitel 2 veranschaulicht die aktuelle Situation im Bordnetz (Kapitel 2.1) und ordnet sie vor dem Hintergrund des Wandels in der Mobilität ein (Kapitel 2.2). Darüber hinaus werden die Notwendigkeit zur Durchführung von *Qualifizierungstests* behandelt sowie die Herausforderungen für diese abgeleitet (Kapitel 2.3). Abschließend zeigt Kapitel 2.4 einen Lösungsweg für die angespannte Situation während der Bordnetzentwicklung auf. Bild 2 gibt einen Überblick über den Aufbau von Kapitel 2, unterteilt in aktuelle Situation, Herausforderung sowie Lösung der Problemstellung.



Dieses Kapitel entstand mithilfe folgender studentischer Arbeiten: [S1-S5]

2.1 Vielschichtige Strukturen aktueller Bordnetze

Das Bordnetz setzt sich aus allen zur Verbindung und Versorgung der elektrischen, elektronischen und optischen Bauteilen benötigten Komponenten zusammen [18]. Von den zur Signal- und Leistungsübertragung benötigten Kabeln und Leitungen abgesehen, zählen ebenfalls nichtelektrische Bauteile zum Bordnetz. Diese Montageteile und Schutzvorrichtungen werden zur Integration der Leitungen ins Fahrzeug benötigt, siehe Bild 3. [18, 19]



Bild 3: Exemplarische Übersicht über die Komponenten eines modernen, automobilen Bordnetzes nach [18]

In modernen Mittelklasse-Pkws sind aktuell 5 km Kabel mit 1000 Leitungen (Kapitel 2.1.1) und 1500 Kontaktteilen verbaut [20, 21]. Neben einem Gesamtgewicht von circa 50 kg [4, 20, 22], stellt das Bordnetz ebenfalls das teuerste Zukaufteil im Kraftfahrzeug dar [22].

Um die Leitungsführung der Situation bei der Fahrzeugmontage anpassen zu können [18], wird das Bordnetz in mehrere *Teilkabelbäume* unterteilt [22]. Bis auf wenige Ausnahmen erfolgt die Anbindung der *Teilkabelbäume* sowie die Verbindung der elektronischen und elektrischen Komponenten durch lösbare Steckverbinder [9]. Aufgrund dieser großen Bedeutung für das Bordnetz werden diese in Kapitel 3.1 ausführlich beschrieben.

2.1.1 Kabel und Leitungen

Kabel und Leitungen stellen wesentliche Komponenten elektronischer Systeme dar. Dabei dienen Kabel und Leitungen als passive Bauelemente sowohl der Übertragung von elektrischer Energie als auch der Übermittelung von analogen sowie digitalen Signalen [23]. Je nach Anwendungszweck unterscheiden sich Kabel und Leitungen in ihrem Aufbau. Bild 4 gibt einen Überblick über die Bestandteile des im Automobil häufig eingesetzten *Sternvierer-Aufbaus*. Die aufgrund der guten Leitfähigkeit aus Kupfer gefertigten Leiter sind zur Erhöhung der Vibrationsfestigkeit als Litze ausgeführt [18]. [24]



Bild 4: Exemplarischer Aufbau eines *Sternvierer-Kabels*, welches häufig im Kraftfahrzeugbereich eingesetzt wird nach [24, 25]

Elektrische Anforderungen

Die Übertragung von Energie muss bei Kabeln mit geringstmöglichen Verlusten erfolgen. Hinsichtlich der *Signalübertragung* muss diese möglichst störungsfrei und mit geringer Reduzierung des *Signalpegels* stattfinden. Außerdem dürfen in beiden Fällen keine Störungen durch die bei der Übertragung entstehenden Felder auftreten. Die wichtigsten Kenngrößen stellen die *elektrische Leitfähigkeit* κ sowie die zu übertragende *Datenrate C* dar. Benötigt die Anwendung der Leitung eine Schirmung, müssen ebenfalls die magnetischen Eigenschaften der Leitermaterialien wie die *relative Permeabilität* μ_r beachtet werden.[24]

Thermische Anforderungen

Kabel und Leitungen müssen die durch den Stromfluss entstehende *Verlustwärme* bestmöglich abführen. Durch die Erwärmung dürfen keine langfristigen Schäden entstehen. Darüber hinaus muss das Kabel im kompletten angegebenen Temperaturbereich sicher funktionieren und der auftretenden Versprödung bei Kälte und Erweichung bei Wärme [23] standhalten. [24]

Mechanische Anforderungen

Bezüglich der mechanischen Flexibilität von Kabeln wird in ortsfeste und ortsveränderliche Kabel unterschieden. Ortsfeste Kabel müssen per Hand oder maschinell verlegbar sein, während ortsveränderliche Kabel eine hohe Flexibilität aufweisen müssen. Das ausschlaggebende Maß für die Flexibilität ist dabei der *minimale Biegeradius*. [24]

Chemische Anforderungen

Kabel und Leitungen müssen in der Anwendung sowohl Kühl- als auch Schmiermitteln standhalten. Konventionelle Mantelmaterialien weisen hierbei eine größere Resistenz gegen gewöhnliche mineralische Stoffe als gegen moderne biologische Medien auf. Standard PVC-Fahrzeugleitungen weisen beispielsweise eine geringe Widerstandsfähigkeit gegenüber Säuren, Laugen sowie Bioölen auf. [23]

2.1.2 Kontakte und Steckverbinder

Ein Steckverbinder stellt ein elektromechanisches Bauteil dar, welches die Trennung zwischen Komponenten eines elektronischen Systems ermöglicht, ohne einen inakzeptablen Einfluss auf die Leistung des Gesamtsystems zu haben [26, 27]. Dabei bestehen Steckverbinder aus mindestens einem *Kontaktstift* sowie einer *Kontaktbuchse* mit einem oder mehreren Federelementen [28]. Bild 5 gibt einen Überblick über die einzelnen Komponenten bestehend aus Basismaterial, Oberfläche, Kontaktkörper [28], Anschlusstechnik, Gehäuse, Verriegelung sowie einer eventuellen Schirmung [29]. Der *Kontaktstift* wird zwischen die Federelemente der *Kontaktbuchse* gesteckt. Dabei gleitet die Feder über die Spitze des *Kontaktstifts*, wobei sie elastisch verformt wird. Die hierdurch entstehende *Kontaktkraft F_k* ist für das Zustandekommen und das Aufrechterhalten des elektrischen Kontakts essenziell. [28]



Bild 5: Bestandteile eines Steckverbinders, mit Unterscheidung in Kontaktstift und Kontaktbuchse nach [28, 29]

Für möglichst störungsfreie elektrische Eigenschaften des Gesamtsystems muss ein geringer *Kontaktwiderstand* erzeugt [30] und über die geforderte Lebensdauer und die notwendigen *Steckzyklen* aufrechterhalten werden. Daraus ergeben sich die Größe und Stabilität des *Kontaktwiderstands* als die wichtigsten Kennwerte zur Beurteilung der Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit eines Steckverbinders [31]. Diese Eigenschaften sind direkt von den eingesetzten Kontakt- und Beschichtungsmaterialien abhängig [32], daher werden diese im Folgenden detailliert betrachtet. [31]

Kontaktmaterialien

In Kfz-Anwendungen werden als *Kontaktträgerwerkstoffe* für Steckverbinder häufig Kupferlegierungen eingesetzt [30]. Reinkupfer besitzt zwar bessere elektrische und thermische Eigenschaften, jedoch sind die mechanischen Kennwerte in vielen Anwendungsfällen inadäquat [28, 29]. Aufgrund der Verringerung der Leitfähigkeit durch Legierungselemente im Vergleich zu Reinkupfer muss immer ein Kompromiss zwischen mechanischen Eigenschaften und elektrischer Leitfähigkeit gefunden werden [28].

Kupfer-Zink-Legierungen auch als Messing bezeichnet, werden aufgrund ihrer ausreichenden Leitfähigkeit, ihrer gegenüber Reinkupfer erhöhten Festigkeit, ihrer relativ guten Verarbeitbarkeit und des niedrigen Preises häufig als *Kontaktträgerwerkstoff* eingesetzt, siehe Bild 6. Nachteilig wirken sich bei Messing die Neigung zur *Spannungsrisskorrosion* und das im Vergleich zu anderen Legierungen schlechte *Spannungsrelaxationsverhalten* aus, siehe Kapitel 3.2.3. [33]



Bild 6: Schichtaufbau lösbarer Steckverbinderkontakte nach [34]

Kupfer-Zinn-Legierungen, auch Zinnbronze genannt, besitzen günstige Federeigenschaften und eine gute Verarbeitbarkeit. Darüber hinaus weisen Zinnbronzen bis 100 °C ein günstiges *Spannungsrelaxationsverhalten* auf. [33]

Beschichtungsmaterialien

Die wichtigste Eigenschaft von Kontaktbeschichtungen besteht darin, die Kontaktzone vor *Korrosion* zu schützen. Darüber hinaus sollen ebenfalls die Eigenschaften der Kontaktstelle optimiert werden. [31]

Als gängigstes, unedles Metall für Kontaktoberflächen findet Zinn aufgrund der geringen Kosten in Verbindung mit weiteren vorteilhaften Eigenschaften Anwendung bei Steckverbindern. Zinn bildet an seiner Oberfläche eine dünne, 50 nm bis 100 nm dicke *Oxidschicht* aus, die vor weiterer *Korrosion* schützt. Da es sich bei Zinn um einen relativ weichen Werkstoff handelt, kann die *Oxidschicht* durch plastische Verformung leicht zerstört werden, wodurch ein stabiler Kontakt entsteht. Aufgrund der Bildung vergleichsweise großer Kontaktflächen ergeben sich geringe *Kontaktwiderstände*, jedoch resultiert aus der großen plastischen Verformung auch eine große Verschleißneigung [32]. Darüber hinaus ist die *Steckhäufigkeit* limitiert und eine hohe Neigung zur *Reibkorrosion* gegeben [32], siehe Kapitel 3.2.4. [29]

Die Beschränkung der Schichtdicke ist von Bedeutung, da der *Reibwert* proportional zur Schichtdicke zunimmt [32]. Durchschnittliche Schichtdicken von Zinnbeschichtungen liegen im Bereich von $0,8 \mu m$ bis $3 \mu m$ [24].

Aufgrund des Einsatzes von beschichteten Kupfermaterialien sind Kenntnisse über die inneren Spannungen von Bedeutung. Es muss sichergestellt werden, dass die Spannungen vor allem bei dünnen und harten Schichten nicht zum Abscheren der *Oberflächenbeschichtung* führen. [29]

Edle Kontaktbeschichtungen kommen dann zum Einsatz, wenn Korrosion unbedingt vermieden werden muss oder weitere hohe Anforderungen an die Kontaktfläche gestellt werden. Edle Kontaktbeschichtungen gewinnen im automobilen Bordnetz vor allem vor dem Hintergrund der fortschreitenden Miniaturisierung der Steckverbinder an Bedeutung. Als Resultat des reduzierten Bauraums können nur noch kleinere Kontaktkräfte realisiert werden. [28]

Diffusionssperre

Um die Wanderung von Atomen unedler Metalle aus dem *Kontaktträgerwerkstoff* in die Beschichtung zu verhindern, müssen Sperrschichten eingesetzt werden. Hierzu wird meist Nickel in dünnen Plattierungen angewandt [33]. [29]

Kontaktfettung

Da der Übergangswiderstand stark vom Gleitverschleiß der Kontakte beeinflusst werden kann [35], wird Kontaktfett zur Verschleißminimierung eingesetzt [36]. Hierbei wird der Materialübertrag zwischen den Kontaktpartnern stark verringert [37]. Jedoch ist die Wirksamkeit abhängig von der Adhäsion zwischen Schmierstoff und Kontaktoberfläche, der Bedeckung der Kontaktzone sowie der Dicke der Kontaktfettungsschicht [38]. Zusätzlich besteht die Gefahr, dass durch das Einbringen einer Flüssigkeit in die Kontaktzone eine anodische Reaktion abläuft [39].

Gehäuse- und Isolationsmaterialien

Steckverbindergehäuse unterscheiden sich stark nach ihrer Komplexität und Anzahl an *Kontaktkavitäten*. Dennoch muss das Gehäuse den notwendigen Anforderungen hinsichtlich elektrischer Isolation, mechanischer Stabilität, Führung und Fixierung der Kontaktelemente sowie Schutz vor Umwelteinflüssen entsprechen. [31]

Die wichtigsten Auswahlkriterien für Materialien, die die Position der Kontakte sicherstellen, sind die elektrischen Eigenschaften und die mechanische Stabilität. Aktuell werden aufgrund der kurzen Prozesszeiten und Erfüllung der wesentlichen Anforderungen bis auf wenige Ausnahmen thermoplastische Polymerwerkstoffe eingesetzt. [29]

2.2 Aktuelle Herausforderungen für das Bordnetz

Da 90 % aller Innovationen im Pkw-Bereich durch elektronische Systeme realisiert werden [18], wirken sich Neuerungen im Fahrzeug direkt auf das Bordnetz aus [P1]. Im folgenden Kapitel werden die mannigfaltigen Einflüsse analysiert und die Bedeutung der Veränderungen für das Bordnetz detailliert dargestellt.

Nach dem von der Daimler AG 2017 vorgestellten CASE-Konzept [40], lassen sich die zukünftigen Herausforderungen für das Automobil und somit auch für das Bordnetz in vier Kategorien, vernetzt (engl. connected), autonom (engl. autonomous), Mobilitätsdienstleistungen (engl. shared services) und elektrifiziert (engl. electrified) einteilen. In dieser Arbeit wird zusätzlich eine Unterteilung in technologiegetriebenen Wandel (Kapitel 2.2.1) und Veränderungen durch das Nutzungsverhalten (Kapitel 2.2.2) getroffen.

2.2.1 Komplexitätszunahme durch technologischen Wandel

Die Bordnetzindustrie ist gewohnt, mit einer hohen Produktkomplexität in der Entwicklung umzugehen. Durch die oben genannten Trends der Vernetzung des autonomen Fahrens sowie der Elektrifizierung erreicht diese Komplexität jedoch einen Punkt, an dem die Unternehmen auf die Veränderungen reagieren müssen, um effizient und profitabel zu bleiben. Hierbei bestehen die allgemeinen Herausforderungen im Bereich Bordnetz Gewichtsreduzierung. einer Preisund den in Die durch kundenspezifischen Kabelbaum bedingte hohe Variantenzahl, kurze Entwicklungszyklen und hohe Qualitätsanforderungen stehen diesen Zielen jedoch entgegen. [P1]

Vernetzte Kommunikation

Die voranschreitende Vernetzung führt zum Einsatz von Consumer Electronics im harschen Anwendungsbereich des Fahrzeuges. Dennoch wird eine Lebensdauer von zehn oder mehr Jahren gefordert. [41] Zusätzlich erfordert die Hochgeschwindigkeitsdatenübertragung eine hohe Signalqualität. Hierzu werden neue oder veränderte Komponenten benötigt, die ebenfalls qualifiziert werden müssen. Darüber hinaus ist zur sicheren Datenübertragung ein möglichst verschleißfreier Kontakt notwendig, da durch die Impedanzen eines abgenutzten Kontakts die Hochfrequenzeigenschaften gestört werden [42]. Daher muss das Verschleißverhalten der benötigten Kontakte bekannt sein, um bereits während der Entwicklung die Auswirkungen auf die Hochfrequenzeigenschaften abschätzen zu können. [P1]

Automatisiertes Fahren

Das automatisierte Fahren bedingt nicht nur eine hohe Geschwindigkeit der Datenübertragung, sondern macht auch eine Übertragung in Echtzeit notwendig. Daher muss aus Sicherheitsgesichtspunkten die Übertragung mit einem hohen Signal-Rausch-Verhältnis erfolgen und eine hohe Übertragungsstabilität aufweisen. Auch hier sind Kenntnisse über das Impedanz-Verhalten und die Beeinflussung durch den Kontaktverschleiß unverzichtbar [P1]. Hierzu sind geeignete und zuverlässige Kontakte an den Schnittstellen zu Sensor- sowie Übertragungseinheiten notwendig.

Elektrifizierung des Antriebsstrangs

Bezüglich der Elektrifizierung werden durch den Einsatz neuer Materialien höhere Arbeitstemperaturen der Leistungselektronik möglich. Darüber hinaus sorgt die Integration von Sensoren und elektronischen Sicherungen für einen weiteren Komplexitätsanstieg. Dennoch müssen diese Systeme in kürzerer Zeit und unter höherem Kostendruck entwickelt werden. [41] Zusätzlich bedingen die höheren Ströme eine Querschnittsvergrößerung der Leiterquerschnitte sowie der internen und externen Kontakte. Dies führt wiederum zu einer komplexeren Verlegung der Litzenleiter. Da Elektrofahrzeug in der Regel nicht ausschließlich von elektrotechnischem Fachpersonal bedient werden, muss bei einer Erhöhung der Spannung die unabsichtliche Berührung leistungsübertragenden Komponenten durch qualitativ hochwertige Isolationen verhindert werden. [43] Dies bedingt eine schnelle, aber dennoch sichere Beurteilung der Zuverlässigkeit sowie einen bereits hohen Kenntnisstand über die Lebensdauer und die Versagensmechanismen während der Entwicklung.

Komplexitätsreduzierung im Bordnetz

Allerdings müssen auch die Bestrebungen der Automobilhersteller erwähnt werden, die Komplexität des Bordnetzes zu verringern. Zum einen setzen Hersteller wie Tesla Motors auf die Verwendung zentraler, hochleistungsfähiger Rechner, um somit eine Vielzahl an Steuergeräten einzusparen. [44] Zusätzlich bieten zentrale Stromschienen die Möglichkeit, die aktuelle hierarchische Bordnetzstruktur durch beispielsweise zwei redundanten Stromschienen zu ersetzen [45] und die zentralen Recheneinheiten zu versorgen. Hierbei erfolgt die Absicherung nicht mehr durch konventionelle Schmelzsicherungen, sondern durch dezentrale Stromverteiler. [46] Abschließend bietet auch die drahtlose Kommunikation beispielsweise zwischen einem elektronischen Bauteil und einem Steuergerät die Möglichkeit zur Reduzierung des Kabelbaumumfangs. [47]

2.2.2 Auswirkungen der Änderungen im Nutzungsverhalten

Neben den rein technologischen Herausforderungen werden Automobilhersteller und damit ebenfalls ihre Zulieferer auch mit einem Wandel im Nutzungsverhalten konfrontiert. Diese Veränderung basiert stark auf den bereits beschriebenen technologischen Entwicklungen, wird nachfolgend aufgrund der dezidierten Auswirkung auf die Zuverlässigkeit jedoch gesondert betrachtet.

Mobilitätsdienstleistungen

Durch die weitere Entwicklung des autonomen Fahrens rücken Mobilitätsangebote wie Car-Sharing und Ride-Hailing (bedarfsgesteuerter Flächenbetrieb) stärker in den Fokus. Im Zuge dessen wird weiterführend die Nutzungsdauer der Fahrzeuge stark ansteigen. [41] In der ReThinkX-Studie wird sogar durch den Personentransport als Dienstleistung (engl. transport as a service, TaaS) das Ende des individuellen Pkw-Besitzes prognostiziert. Hierbei sind vor allem die Kosten der Fahrt im Vergleich zum Besitz eines Fahrzeugs sowie die Dauer bis zum Eintreffen einer Fahrgelegenheit entscheidend. In Kombination mit elektrisch betriebenen und selbstfahrenden Fahrzeugen ist das Ziel der Betreiber, möglichst viele Kilometer ohne Panne oder Serviceeinsatz zurückzulegen. Daher steigt der Bedarf nach zuverlässigen Komponenten und Systemen. [48]

Zusammenfassend haben alle genannten Veränderungen des Fahrzeugs Nutzungsverhaltens direkte Auswirkungen auf die sowie des Zuverlässigkeitsanforderungen an Bordnetzkomponenten. Auch im Falle der Steckverbinder steigt somit die Bedeutung einer schnellen und zuverlässigen Beurteilung Lebensdauer der während des Entwicklungsprozesses.

2.3 Qualifizierungsstrategien vor dem Hintergrund des Wandels in Bordnetzen

Das Testen von Produkten in der Entwurfsphase ist in fast allen Entwicklungsabläufen unerlässlich. Es dient dazu, Konstruktionsoptionen zu vergleichen, Ausfallmodi zu ermitteln, die Zuverlässigkeit abzuschätzen und einen Entwurf zu verifizieren. [49] Daher sind *Qualifizierungsuntersuchungen* zur Sicherstellung der Funktionssicherheit von Komponenten über ihre geforderte Lebensdauer notwendig. Allerdings ist es oft wirtschaftlich nicht durchführbar, ein Produkt unter normalen Betriebsbedingungen bis zum Versagen zu testen, insbesondere im gegenwärtigen wettbewerbsorientierten Geschäftsumfeld [49]. Deshalb werden mechanische, klimatische und elektrische Tests als probate Mittel ergriffen, um die Feldbelastung zu simulieren. Dabei besteht der konventionelle Ansatz bei beschleunigten Zuverlässigkeitstests in einer simplen Erhöhung des Belastungsniveaus gegenüber der Feldbelastung bei gleichzeitiger Raffung der Belastungsdauer [50]. [51]

Insgesamt können drei Gründe für beschleunigte Lebensdauertests unterschieden werden, zum einen die Beschleunigung eines bestimmten Fehlermechanismus, zum anderen der Vergleich unterschiedlicher Materialien oder Designparameter. Den wichtigsten Aspekt der beschleunigten Lebensdauertests stellt jedoch die Abschätzung der Lebensdauer unter Anwendungsbedingungen dar. [52]

Überlastung

Bild 7 zeigt unterschiedliche Arten der Beschleunigung von Lebensdauertests. Dabei stellt die Überlastung, bei der gezielt größere Belastungen als im Feld getestet werden, die häufigste Beschleunigungsmethode dar. Die Angewandten sollten hierbei den unter normalen Nutzungsbedingungen auftretenden Belastungen entsprechen. Überbelastungen können in unterschiedlichen Formen appliziert werden. Es wird zwischen konstanter Belastung, zum Beispiel dem Testen auf zwei unterschiedlichen, konstanten Belastungsniveaus, der stufenweisen Steigerung der Belastung, der progressiv zunehmenden Steigerung, der zyklischen Belastung und zufälligen Belastungen unterschieden. [49]



Bild 7: Möglichkeiten der Beschleunigung von Lebensdauertests nach [49]

Wird die Belastung während des Tests gesteigert, spricht man von stufenweiser oder progressiver Belastungssteigerung. Im Falle der stufenweisen Steigerung wird die Belastung für eine gewisse Zeit konstant gehalten. Wenn unter dieser Belastung nicht alle Proben ausfallen, wird diese erhöht. Bei der progressiven Steigerung wird die Belastung hingegen konstant erhöht, bis eine gewisse Anzahl an Proben ausgefallen ist oder ein Zeitlimit erreicht wird. Beide Arten der steigenden Belastung sind gut dafür geeignet, Schädigungsmechanismen bei hochzuverlässigen Produkten zu ermitteln, allerdings ist die Modellerstellung für diese Art von Tests schwierig. [49]

Wird die Belastung zyklisch verändert, entspricht das Belastungsniveau einem vorgegebenen zyklischen Muster, wie beispielsweise im Temperaturwechsel- oder Vibrationstest. Bei der zufälligen Belastung folgt das Belastungsniveau einer probabilistischen Verteilung. Diese Arten der Beschleunigung von Testverfahren werden in der Regel dazu verwendet, den späteren Feldeinsatz eines Produkts widerzuspiegeln. [49]

Erhöhung der Nutzungsrate

Häufig werden Produkte intermittierend verwendet. Diese Nutzungsrate wird gebräuchlich als Frequenz in Herz (*Hz*) angegeben. Zur Verkürzung der Testzeit werden Produkte mit höheren Frequenzen, mit verkürzten Pausenzeiten oder durchgängig getestet. Allerdings müssen in beiden Fällen die Auswirkungen der höheren Nutzungsgeschwindigkeiten oder der verringerten Standzeiten beachtet werden, da hierdurch andere Fehlermechanismen ausgelöst werden können. [49]

Veränderung der Kontrollfaktoren

Kontrollfaktoren stellen Parameter dar, die während des Konstruktionsprozesses definiert werden und einen direkten Einfluss auf die Lebensdauer der Produkte haben. Unter der Voraussetzung, dass die Abhängigkeit der Lebensdauer von den Parametern bekannt ist, besteht die Möglichkeit, die Testzeit durch Parametervariation zu verkürzen. Beispielsweise kann eine Welle mit reduziertem Durchmesser und damit verringerter Lebensdauer getestet werden, um die Lebensdauer einer dickeren Welle zu ermitteln. [49]

Verringerung des Ausfallkriteriums

In Lebensdauertests wird eine Kenngröße definiert, bei deren Überschreitung eine Komponente als ausgefallen gilt. Im Fall der in dieser Arbeit getesteten Steckverbinder stellt die Erhöhung des Kontaktwiderstands um einen definierten Wert das Ausfallkriterium dar [53]. Durch Verringern des Grenzwerts wird die Prüfdauer verkürzt, da der entsprechende Wert nach geringerer Zeit erreicht wird. Die Methode erfordert jedoch genaue Kenntnisse über die Beziehung zwischen Lebensdauer und Schädigungsmechanismen. [49]

2.3.1 Notwendigkeit der Qualifizierung

Das Automobil ist extremen Temperaturen, hoher Feuchtigkeit und starken Vibrationen ausgesetzt, die zu hohen klimatischen, medialen und mechanischen Belastungen führen [28]. Daher werden Qualifizierungstests durchgeführt, um zu überprüfen, ob die Funktionalität eines Steckverbinders über die gesamte Lebensdauer gewährleistet ist [30].

Im Kontext von *Qualifizierungstests* muss zwischen quantitativ und qualitativ beschleunigten Testverfahren unterschieden werden (siehe Bild 8). Qualitativ beschleunigte Tests wie der *highly accelerated life tests* (HALT) [54, 55] versuchen aus einer Kombination von erhöhten Stressparametern Fehler im Produktdesign aufzudecken. Es muss bei

Ausfällen eine sorgfältige Root-Cause-Analyse durchgeführt werden, um zu bestimmen, ob diese Art von Fehler in der späteren Feldanwendung ebenfalls auftritt. Dagegen haben quantitative Testverfahren das Ziel, Informationen über die zeitliche Verteilung von Fehlern oder die Verteilung von *Schädigungsmechanismen* zu erlangen. [56] Zur Bestimmung des Zusammenhangs zwischen Lebensdauer und spezifischer Belastung werden quantifizierbare Beschleunigungsfaktoren verwendet. Anschließend resultieren die Ausfallzeiten aus mehreren separaten Versuchen in Lebensdauerfunktionsmodellen, die für unterschiedliche Zuverlässigkeitsberechnungen verwendet werden. [55]

Die in Kapitel 6.1.1 vorgestellte Methodik der kalibrierten Lebensdauertests zählt zu den quantitativen Prüfungen und dient damit der Ermittlung und der Verifizierung der Zuverlässigkeit von Bauteilen.

Grundlagen von Lebensdauertests

Nachfolgend werden wesentliche Grundbegriffe und Zuverlässigkeitskenngrößen nicht reparierbarer Systeme, die für das weitere Verständnis notwendig sind, erläutert. Mithilfe dieser Kennwerte lässt sich das Ausfallverhalten abbilden und die entsprechenden statistischen Modelle zur Beschreibung ableiten. [54]

Ausfallwahrscheinlichkeit



Bild 8: Einteilung beschleunigter Lebensdauertests in qualitative Prüfungen und quantitative Prüfungen nach [49, 55]

Die Verteilungsfunktion F(t) gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass die Komponente bis zu einem bestimmten Zeitpunkt t ausfällt und beschreibt somit die Ausfallwahrscheinlichkeit eines Bauteils. Die Lebensdauer L_h ist eine reelle Zufallsgröße mit der Verteilungsfunktion aus Gl 2.1. Die Kurve beginnt bei F(0) = 0, siehe Bild 9, und steigt monoton an, da zu jedem Zeitpunkt ein positiver Wert die auftretende Ausfalldichte f(t) addiert wird. Der obere Grenzwert liegt bei $F(\infty) = 1$ und gibt den Ausfall aller Komponenten an. [54, 57]

$$F(t) = P(L_h \le t) = \int f(t)dt$$
 Gl 2.1 [54]

Zuverlässigkeit und Ausfallwahrscheinlichkeit



Bild 9: Zusammenhang zwischen Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t_x)$ und Zuverlässigkeit $R(t_x)$ über der Ausfallzeit t nach [54]

Zuverlässigkeit

Die Zuverlässigkeit R(t), auch Überlebenswahrscheinlichkeit genannt, stellt das Komplement der Ausfallwahrscheinlichkeit F(t) dar. R(t) ist eine monoton fallende Funktion mit der Eigenschaft R(0) = 1 und $R(\infty) = 0$ (Gl 2.2). Sie gibt nach DIN 40041 [58] die Wahrscheinlichkeit an, dass eine Komponente unter bestimmten Anwendungsbedingungen bis zum Zeitpunkt t noch nicht ausgefallen ist. [54, 57]

$$R(t) = P(L_h > t) = 1 - F(t)$$
 Gl 2.2 [54]

Ausfalldichte

Die Ausfalldichte f(t) beschreibt die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls zum Zeitpunkt t. Je größer die Ausfalldichte, desto häufiger treten Ausfälle in einem sehr kleinen Intervall um den Zeitpunkt t auf. Die Ausfallwahrscheinlichkeitsdichte ist als zeitliche Ableitung der Ausfallwahrscheinlichkeit F(t) definiert (Gl 2.3) und es gilt der Zusammenhang aus Gl 2.4. [54, 57]

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \qquad \qquad \text{Gl } 2.3 [54]$$

$$\int_{0}^{\infty} f(t)dt = 1$$
 Gl 2.4 [54]

Ausfallrate

Die Ausfallrate (engl. hazard rate) h(t) beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass eine Komponente, die bis zum Zeitpunkt t überlebt hat, im darauffolgenden Intervall dt ausfällt. (Gl 2.5) Die Ausfallrate beschreibt nicht nur Ermüdungsausfälle, sondern auch Früh- und Zufallsausfälle und gibt somit das gesamte Ausfallverhalten eines Systems wieder. Dabei resultiert immer ein ähnlicher, typischer Kurvenverlauf. [54, 57]

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)}$$
 Gl 2.5 [54]

Raffungsfaktor

Bei der Anwendung von beschleunigten Prüfungen ergeben sich höhere Schädigungen und daraus resultierende niedrigere Lebensdauern. Der *Raffungsfaktor AF* setzt die Lebensdauern unter Feldbelastung L_h mit der Lebensdauer L_{ha} während der beschleunigten Prüfung ins Verhältnis (siehe Gl 2.6). [54]

$$AF = \frac{L_h}{L_{ha}} \qquad \qquad \text{Gl } \textbf{2.6 [54]}$$

Messung des Durchgangswiderstands

Während der thermischen *Qualifizierungsprüfung* stellt der Durchgangswiderstand das entscheidende Kriterium zur Beurteilung der Zuverlässigkeit von Kontakten dar. Deshalb kommt der Messung des Widerstands eine entscheidende Bedeutung zu. Die Messung kann entweder mit vorgeschriebenen Messstrom [59] oder nach der *Millivoltmethode* [60] erfolgen. Bei Letzterer ist die *Leerlaufspannung* des Messkreises auf 20 mV und der Messstrom auf 100 mA begrenzt. Dadurch wird im Gegensatz zur Messung mit vorgeschriebenen Strom eine Beeinflussung der Widerstände des Kontaktes ausgeschlossen [28]. In dieser Arbeit findet daher die *Millivoltmethode* zur Messung der Durchgangswiderstände Verwendung. Neben der Messung nach der *Millivoltmethode* wird die *Vierleiter-Messtechnik* verwendet. Zur Messung des Spannungsabfalls über den Kontakten kommen zwei separate Leitungen mit geringer Strombelastung zum Einsatz. Hierdurch fällt der Widerstand der Messleitungen nicht ins Gewicht. [61]

Aktuelle Qualifizierungstests

Die notwendige, aber zeit- und kostenintensive Qualifizierung verzögert die Serienreife neu entwickelter Bordnetzkomponenten. Denn über die Jahre ist ein komplexer Raum an Prüfanforderungen für die Untersuchung der Maßhaltigkeit und Zuverlässigkeit elektrischer Bauteile entstanden. Bei neu entwickelten oder konstruktiven Änderungen an bestehenden Lieferantenvorschrift Kontakten besteht in der VW 75174 des Volkswagenkonzerns die Forderung nach der Durchführung von 18 Prüfgruppen zur Überprüfung der Bauteileigenschaften und des Bauteilverhaltens unter Belastungen. Darüber hinaus ist es nicht ausreichend, nur neu entwickelte Komponenten abzusichern. Jegliche Änderung am Bauteil, Verlagerung der Produktion, Duplizierung des Werkzeuges sowie Verwendung eines neuen Materials hat die erneute Durchführung eines ausführlichen Prüfprogrammes zur Folge. Neben der Maßhaltigkeit sowie der Wechselwirkung zwischen Kontakt und Gehäuse werden sämtliche relevante mechanische Kennwerte überprüft. Auch elektrische, mediale und thermische Einflüsse wie das Derating, die Küstenklimabeanspruchung Reibkorrosion und die müssen in umfangreichen Tests abgesichert werden. Abschließend werden eine Umweltsimulation und Langzeittemperaturlagerungen durchgeführt. [53]

In Fahrzeugen treten je nach Einbauort der Steckverbinder unterschiedlich hohe Temperaturen auf [62]. Daher geben Lieferantenvorschriften und Konzernnormen der OEMs spezielle Temperaturklassen mit definierter minimaler und maximal auftretender Umgebungstemperatur an, siehe Tabelle 1 [63]. Die entsprechenden Temperaturklassen orientieren sich dabei an der ISO 16750-4 [64].

Einbauort der Komponente	Temperaturklasse	Prüftemperatur (T _{min} - T _{max})
Fahrgastraum / Elektronikbox	G	- 40 - + 85 °C
Motorraum	К	- 40 - + 105 °C
Aggregatanbau (z. B. am Motor)	0	- 40 - + 125 °C
Integration im Aggregat (z. B. im Getriebe)	R	- 40 - + 155 °C

Tabelle 1: Temperaturklassen für Qualifizierungstests von Kraftfahrzeugkomponenten in Abhängigkeit des Einbauorts nach [63–65]

Bild 10 zeigt die Empfehlung der zu verwendenden Temperaturklassen nach ISO 16750-4. Im Vergleich zu den Lieferantenvorschriften ergeben sich drei dezidierte Unterschiede. Zum einen werden über alle Einbauräume hinweg geringere maximale Temperaturen empfohlen. Zum anderen erfolgt eine detailliertere Aufteilung der Einbauräume und Subeinbauräume. Darüber hinaus wird nicht zwischen dem Aggregateanbau und Aggregateeinbau unterschieden. Somit ergibt sich in beiden Fällen eine maximale Temperatur von 140 °C.



*Bei mehreren Temperaturklassen wurde der jeweils schärfere Test angegeben

Bild 10: Empfehlung der ISO 16750-4 für zu verwendende Temperaturklassen in Abhängigkeit des Einbauorts nach [64]

Aufgrund des größeren Schädigungspotenzials der höheren maximalen Temperaturen bezieht sich diese Arbeit auf die Forderungen nach den Lieferantenvorschriften. Dennoch ist die exakte Unterteilung der Einbauräume durch die Möglichkeit der genaueren Replikation der Feldbelastungen zu unterstützen.

Einzelne Qualifizierungstests werden in sogenannten Prüfgruppen in den Liefervorschriften und Konzernnormen Automobilhersteller der zusammengefasst. Dabei muss eine gewisse Anzahl an Prüflingen eine Vielzahl an einzelnen Tests durchlaufen. Die Widerstandserhöhung während des kompletten Testdurchlaufs muss unter der spezifischen Ausfallgrenze liegen. Bild 11 stellt beispielhaft die Prüfgruppe 19 "Umweltsimulation" der Volkswagen Konzernnorm VW 75174 dar, in welcher sowohl die thermischen Testverfahren als auch mediale und mechanische Oualifizierungsprüfungen enthalten sind. Neben Sichtprüfungen werden die Widerstände kontinuierlich überwacht. Dies erfolgt entweder durch Messungen vor und nach den Prüfungen oder durch eine konstante Überwachung mit vorgeschriebenem Strom. [53]



Bild 11: Ablauf der Qualifizierungsprüfungen während der Prüfgruppe 19 "Umweltsimulation" der Volkswagen Konzernnorm VW 75174 für Steckverbinder nach [53]

2.3.2 Herausforderungen für zukünftige Qualifizierungsstrategien

Neben der stetigen evolutionären Weiterentwicklung von Fahrzeugen stellen die aktuellen Trends die Automobilindustrie und ebenso die Bordnetzfertigung vor neue Herausforderungen. Bei batterieelektrisch angetriebenen Fahrzeugen entfällt der Motorkabelbaum. Allerdings wird neben dem zusätzlichen *Hochvolt-Bordnetz* für Komfort- und Infotainmentumfänge weiterhin das herkömmliche 12 V-Bordnetz benötigt [43].

Davon abgesehen verlangt das hochautomatisierte oder vollautonome Fahren, bei welchem ein Eingriff des Fahrers nicht mehr möglich ist, dass das Fahrzeug im Fehlerfall selbsttätig in einen sicheren Modus übergeht. Neben der reinen Zunahme an Kabeln und Kontakten zur Integration der Systeme [P1] stellt dies eine weitere Herausforderung für die Zuverlässigkeit sicherheitsrelevanter Systeme dar und muss somit in Qualifizierungsstrategien beachtet werden. [12]

Zusätzlich stellt auch die Änderung im Nutzungsverhalten, bei welchem anstatt des eigenen Fahrzeugs eine Mobilitätsdienstleistung (engl. transport as a service) genutzt wird, eine indirekte Herausforderung bei der Entwicklung zuverlässiger Komponenten dar. Anbieter dieser Dienstleistungen verlangen nach möglichst autonomen Fahrzeugen für eine hohe Anzahl an Kilometern ohne Serviceeinsatz. [48] Dies bedingt, dass alle kritischen Komponenten einschließlich des Bordnetzes auf eine hohe Lebensdauer ausgelegt sind.

Das Ziel zukünftiger *Qualifizierungsstrategien* muss es sein, den bestehenden Zielkonflikt zwischen kurzen Entwicklungszeiten und hoher Zuverlässigkeit aufzulösen. Hierzu sind geeignete Methoden zur Beschleunigung der bisherigen *Qualifizierungstests* notwendig. Dennoch muss ein hohes Maß an Zuverlässigkeit gewährleistet sein. Darüber hinaus dürfen keine Schädigungsmechanismen aktiviert werden, die nicht im späteren Feldeinsatz auftreten.

In der Forschung und Entwicklung besteht ebenfalls ein Zielkonflikt zwischen begrenzten zeitlichen und finanziellen Mitteln gegenüber den erwarteten Aussagen über die Lebensdauer von Kontaktierungssystemen. Beispielsweise werden auch bei der Entwicklung neuer Kontaktierungslösungen für additive, gedruckte Elektronik [P2] effiziente und dennoch zuverlässige Vorgehensweisen zur Beurteilung der Zuverlässigkeit benötigt.

2.4 Beschleunigung von Qualifizierungstests durch ein dreigliedriges Lösungssystem

Zur Absicherung der Zuverlässigkeit unter Einsatzbedingungen sind Kenntnisse über die auftretenden Schädigungsmechanismen notwendig [16]. In Verbindung mit Lebensdaueranforderungen wie der Konzernnorm VW 75174 der Volkswagen AG [53], ist es möglich, individuelle Qualifizierungsstrategien für elektrische und elektronische Bauteile zu entwickeln. Dennoch schreitet die Entwicklung neuer Bordnetzkomponenten, getrieben durch die in Kapitel 2.2 genannten Trends, rasant voran. Hierdurch entsteht ein Spannungsfeld zwischen immer kürzer werdenden Markteinführungszeiten und zeitaufwendigen Zuverlässigkeitsprüfungen. Durch die essenzielle Bedeutung einer umfassenden Qualifizierung der Bordnetzkomponenten auf die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems müssen belastbare Lösungen gefunden werden, um die Testdauer zu verkürzen. Ebenfalls sind Kenntnisse über die Zuverlässigkeit bereits während der Entwicklung neuer Kontaktierungslösungen für eine zielführende Produktentwicklung erstrebenswert. Bild 12 setzt den durch eine Expertenbefragung und tiefgreifende Literaturrecherche ermittelten Beitrag der Lösungen im Bordnetz ins Verhältnis zur durch die Trends erwartenden Komplexitätssteigerung. Dabei leisten Zuverlässigkeitsuntersuchungen und der damit einhergehenden Erkenntnisgewinn über die Lebensdauer von Bordnetzkomponenten einen entscheidenden Beitrag zur Komplexitätsreduktion im Gesamtproduktentstehungsprozess des Bordnetzes. Somit können Lebensdauermodelle einen wichtigen Beitrag Eindämmung der steigenden Komplexität während des zur Entwicklungsprozesses leisten. [P1]



Um das Potenzial zur Komplexitätsreduktion vollständig auszuschöpfen, zeigt diese Arbeit ein tertiäres Lösungssystem auf. Somit wird ein Beitrag zur Auflösung des Zielkonflikts aus kurzen Entwicklungszeiten und umfassender Oualifizierung geleistet. Die beschriebenen Lösungen können entweder getrennt voneinander oder aufeinander aufbauend ein- und umgesetzt werden. Zum einen wird durch die getrennt voneinander in den Relativbewegungstests einstellbaren mechanischen und thermischen Belastungen eine Möglichkeit zur Verringerung des Prüfaufwands bei Oualifizierungstests untersucht. Zum anderen orientieren sich die entwickelten Lastwechseltests am Nutzungsverhalten von Pkw-Fahrern, wodurch eine der Feldbelastung stärker entsprechende Beschleunigung der Qualifizierungsuntersuchungen erwartet wird. Abschließend bietet der Einsatz einer kombinierten Methodik aus kalibrierten Lebensdauertests und Raffungsmodellen unter Vorkenntnis der auftretenden Schädigungsmechanismen die Möglichkeit, die Anzahl an benötigten Testdurchläufen während der Qualifizierung von kraftschlüssigen Kontakten zu reduzieren. Darüber hinaus kann die umfassende und dennoch zeitsparende kombinierte Methodik aus Raffungsmodellen und kalibrierten Lebensdauertests bei der Entwicklung neuer Kontaktierungs-technologien, beispielsweise für gedruckte Elektronik, systematisch genutzt werden.

3 Reibkorrosion als Hauptschädigungsmechanismus kraftschlüssiger Kontakte

Kraftschlüssige Kontakte, wie die in dieser Arbeit betrachteten Steckverbindungen, sind in Bezug auf ihre Zuverlässigkeit als kritisch einzustufen. Beim Vergleich der *Ausfallraten* werden in [66] für Steckkontakte $\lambda(t) = 0,1 \, 10^{-9} \, \text{h}^{-1}$ und für Lötverbindungen $\lambda(t) =$ $0,05 \, 10^{-9} \, \text{h}^{-1}$ angegeben. Wobei kritisch bemerkt werden muss, dass für dieselben Bauteile die Ausfallraten um den Faktor 10^3 abweichen können [66]. Aufgrund dieser im Vergleich hohen Ausfallraten von Steckverbindungen kommt der Kenntnis der auftretenden *Schädigungsmechanismen* ein hohes Maß an Bedeutung zu.

Kapitel 3.1 gibt einen Überblick über die Grundlagen kraftschlüssiger Kontakte, siehe Bild 13. Dabei werden Steckverbinder sowohl im Vergleich zu anderen Verbindungstechnologien eingeordnet als auch die mechanischen und elektrischen Grundlagen der Kontaktzone erläutert. Hierbei liegt der Fokus vor allem auf der tatsächlichen Kontaktzone und dem *Kontaktwiderstand* als wichtigstes Bewertungskriterium für die Lebensdauer der Kontakte.



Bild 13: Aufbau des Kapitels 3 "Reibkorrosion als Hauptschädigungsmechanismus"

Das nachfolgende Kapitel 3.2 beschreibt die zugrunde liegenden Mechanismen, welche zu einer (meist negativen) Beeinflussung des *Kontaktwiderstandes* führen. Im Detail werden die gravierendsten *Schädigungsmechanismen* kraftschlüssiger Kontakte beschrieben. Hierbei handelt es sich um mechanischen Verschleiß, Fremdschichtbildung, physikalische Effekte und den kombinierten Schädigungsmechanismus der *Reibkorrosion*.

Dieses Kapitel entstand mithilfe folgender studentischer Arbeiten: [S₃–S₇]

3.1 Grundlagen kraftschlüssiger Kontakte

Nachdem in Kapitel 2.1.1 der prinzipielle Aufbau eines Steckverbinders erläutert wurde, findet in diesem Kapitel eine Abgrenzung zu anderen Verbindungsarten statt. Anschließend werden die physikalischen Grundlagen der Kontaktzone erläutert. Hierbei werden sowohl die Kontaktoberflächen und ihre Eigenschaften als auch die resultierenden Widerstände beschrieben.

3.1.1 Abgrenzung zu anderen Verbindungsarten

Aufgrund der Lösbarkeit der Verbindung [30], weisen Steckverbindungen im Vergleich zu anderen Verbindungsarten entscheidende Vorteile auf. Allerdings ist ihre Zuverlässigkeit bauartbedingt im Vergleich zu anderen Verbindungen als kritisch anzusehen.

Bild 14 gibt einen Überblick über verschiedene Verbindungsarten zur Herstellung eines elektrischen Kontakts. Hierbei wird zwischen ur- und umgeformten sowie stoffschlüssigen oder form- und kraftschlüssigen Verbindungen unterschieden. Nachfolgend werden einige dieser Kontaktierungsmöglichkeiten exemplarisch beschrieben.



Bild 14: Einteilung von unterschiedlichen elektrischen Verbindungsarten nach Ur-, Umformen und in stoff- beziehungsweise form- und kraftschlüssige Verbindungsarten nach [30]

Löten stellt ein thermisches Verfahren zum stoffschlüssigen Fügen metallischer Werkstoffe mittels eines geschmolzenen Zusatzmetalls dar. Unter Umständen werden Flussmittel und Schutzgase eingesetzt. Durch thermische Aktivierung setzen während des Lötvorgangs Diffusionsprozesse ein, bei welchen sowohl Elemente des Lotes in den Grundwerkstoff als auch Elemente des Grundwerkstoffs in das Lot übergehen. Die Verbindungstechnik Löten ist in DIN ISO 857-2 [67] genormt. Vorteile der Löttechnik liegen in der guten Automatisierbarkeit, zudem ist die Temperaturbelastung der Bauteile relativ gering und die Lote können größtenteils werkstoffunabhängig ausgewählt werden. [28]

Bei Massivdrähten wird häufig die Wickeltechnik zur Kontaktierung eingesetzt, sie ist in der DIN EN 60352-1 [68] genormt. Der abisolierte Draht wird mit einem entsprechenden Werkzeug unter Zugspannung um einen rechteckigen Anschlusspin gewickelt. Durch den hohen Anpressdruck bilden sich Kaltverschweißungen zwischen Pin und Draht an den Kanten aus. Wird der Draht vier Mal um den Pin gewickelt, entstehen 16 gasdichte Berührungsflächen, die denselben Querschnitt wie der Draht aufweisen. Um eine zuverlässige Verbindung sicherzustellen, werden in der Praxis sechs bis acht Wicklungen angewandt. [28]

Die Einpresstechnik wird bei der Montage von Steckverbindern auf Leiterplatten eingesetzt. Sie ist in DIN EN 60352-5 [69] genormt. Bei der Verbindungstechnik wird ein metallisiertes Loch mit einem Einpressstift kontaktiert. Durch die circa zehnmal höhere Kontaktkraft im Vergleich zu einem Steckverbinder entsteht eine entsprechend größere, gasdichte Kontaktzone mit größeren, kaltverschweißten Bereichen. Es wird zwischen massiven und flexiblen Einpresszonen unterschieden. Massive Einpresszonen weißen einen quadratischen Querschnitt auf und die *Kontaktkraft* wird durch Deformation des Loches aufgebracht. Flexible Einpresszonen sind durch Federelemente im Einpressstift so ausgelegt, dass die mechanische Belastung auf das Leiterplattenloch verringert wird. [28]

Die Schneidklemmverbindung besteht aus einem Kontaktelement, in das ein isolierter Leiter gepresst wird und ist in DIN EN 60352-3 sowie DIN EN 60352-4 genormt [70, 71]. Durch Einlaufschrägen am u- oder v-förmigen Schneidklemmelement wird der Leiter zentriert, die Isolation durchdrungen und verdrängt. Durch die hohe Federkraft im Schneidklemmschlitz erfährt der Leiter eine plastische Verformung. Hierbei wird ein gasdichter Kontakt zwischen Leiter und Kontaktelement hergestellt. Um die Gasdichtheit zu gewährleisten, muss der Kontaktdruck während der gesamten Lebensdauer über einem Minimalwert liegen. [28, 72] Die zur Verbindung von einem oder mehreren Leitern mit einer sogenannten Crimphülse geeignete *Crimpverbindung* ist in vielen Anwendungsbereichen wie der Kraftfahrzeugtechnik oder der Luftfahrt etabliert. Bei der in DIN EN 60352-2 [73] genormten Verbindungstechnik wird der elektrische Kontakt mittels eines Crimpwerkzeugs durch starke plastische Verformung hergestellt. Während des Crimpvorgangs entstehen gasdichte Verbindungen mit großen Flächen, welche die Interaktion mit korrosiven Umgebungen beschränken. Hierdurch wird ein niedriger *Kontaktwiderstand*, welcher über lange Zeit konstant bleibt, sichergestellt. [28]

Bei der auf Federklemmen basierenden Verbindung wird ein abisolierter Massivleiter, Drahtlitzenleiter oder flexible Leiter mittels eines Federklemmanschlusses verbunden. Die Verbindung ist in der DIN EN 60352-7 genormt. [74] Analog zum Steckverbinder handelt es sich bei Federklemmen meist ebenfalls um lösbare Verbindungen, allerdings treten wesentlich höhere Federkräfte auf [30]. Die Ausführung von Federklemmen in Direkt-Stecktechnik ermöglicht verkürzte Montagezeiten und ist mittlerweile häufig im Schaltschrankbau anzutreffen [75].

3.1.2 Mechanische und elektrische Grundlagen der Kontaktzone

Der Begriff elektrischer Kontakt bezeichnet eine lösbare oder unlösbare Verbindung zwischen zwei Leitern, die geeignet ist, elektrischen Strom zu führen [76]. Dabei wird die mechanische und elektrische Leistungsfähigkeit eines Steckverbinders durch den Aufbau und die Eigenschaften der Kontaktfläche bestimmt [31].

Mechanische Grundlagen

Werden die Kontaktflächen zuerst makroskopisch betrachtet, stehen sie über die *scheinbare Kontaktfläche* A_s in Kontakt. Allerdings sind Festkörperoberflächen im physikalischen Sinn stets rau, wodurch sich der gegenseitige Kontakt auf mikroskopische Berührungsflächen beschränkt [76]. Diese einzelnen Unebenheiten werden nach dem englischen Begriff als *Asperities (A-Spots)* bezeichnet. Demnach stellt die *tragende Kontaktfläche* A_t die Summe aller mikroskopischen Berührungsflächen dar, siehe Bild 15. Die *quasimetallische Kontaktfläche* ist mit zwischen 15 Å – 30 Å dicken Oxidschichten belegt durch die Elektronen tunneln können. Mit zunehmender Kraft nimmt die Anzahl und Fläche der Metall-Metall-Kontaktstellen durch das Aufbrechen von *Oxidschichten* und das Extrudieren von Metall durch die Risse zu [77]. [28, 51]

Die wirksame Kontaktfläche A_w bezeichnet den Teil innerhalb der tragenden Kontaktfläche, in dem unter Anlegen von Spannung Strom fließt [28, 51]. Die A-Spots bilden kleine Kaltverschweißungen, welche die einzigen leitenden Verbindungen für die Übertragung von elektrischem Strom darstellen [77]. Dies hat zur Folge, dass ein poröser Kontakt entsteht, in den Sauerstoff und andere korrosive Gase eindringen können, die mit blankem Metall reagieren und die metallischen Kontaktflächen weiter reduzieren [77].



Bild 15: Scheinbare, tragende, quasimetallische und wirksame Kontaktfläche sowie die unterschiedliche Auswirkung einer niedrigen beziehungsweise hohen Kontaktkraft nach [65, 26, 28]

Elektrische Grundlagen der Kontaktfläche

Durch die Einengung der Stromfäden, welche einer Modellvorstellung des Stromflusses in einer Dimension entsprechend, aufgrund der wirksamen Kontaktfläche entsteht eine Widerstandserhöhung, der sogenannte *Engewiderstand* R_E . Bild ¹⁶ zeigt die Einengung der Stromfäden exemplarisch anhand einer kreisförmigen Berührungsfläche im Vergleich zu einem homogenen Leiter. [28, 51]



Bild 16:Schema der Stromfäden im homogenen Leiter und mit Stromenge nach [51]

Abhängig ist der *Engewiderstand* von Anzahl, Größe und Verteilung der *A-Spots*. Hierbei sind alle drei Parameter ebenfalls abhängig von der *Kontaktkraft* F_k , da bei einer höheren Kraft mehr *A-Spots* in Kontakt treten. Zur Berechnung werden von Holm verschiedene Theorien aufgestellt [76]. Das Ellipsenmodell kommt hierbei der Praxis am nächsten [28]. Demnach berechnet sich der durch die Einengung der Stromfäden ergebende *Engewiderstand* für einen einzelnen *A-Spot* nach Gl 3.1. [30]

$$R_E = \frac{\rho}{2a} \qquad \qquad \text{Gl }_{3.1} [76]$$

Dabei bezeichnet ρ den spezifischen Widerstand des Ausgangsmaterials und *a* den Radius der kreisförmigen Berührungs-fläche [28]. In der Praxis findet Stromfluss über mehrere *A-Spots* statt. Unter der Annahme, dass sich die einzelnen *A-Spots* nicht gegenseitig beeinflussen, wird der *Engewiderstand* nach Gl 3.2 für einen Vielkontakt berechnet. Hierfür werden die Radien der einzelnen Mikroflächen a_i addiert.

$$R_E = \frac{\rho}{2\sum_i a_i} \qquad \qquad \text{Gl}_{3.2} [76]$$

Die Annahme, sich nicht gegenseitig beeinflussender Potenziale der Stromlinien, ist bei erhöhter Kontaktkraft nicht mehr zutreffend. Gl 3.3 zeigt daher die weiterführende Theorie nach Greenwood [78]:

$$R_E = \rho \left(\frac{1}{2 n_a \bar{a}} + \frac{1}{2 a_h} \right) \qquad \text{Gl}_{3.3} [78]$$

Hierbei ist der Engewiderstand abhängig vom spezifischen Widerstand ρ , der Anzahl der kreisförmigen *A-Spots* n_a, dem mittleren Radius der *A-Spots* \bar{a} und dem Radius des A-Spot Clusters, auch Holm Radius genannt, a_h [78]. Dabei stellt der erste Term den Widerstand eines A-Spots und der zweite Term den Widerstand des A-Spot Clusters dar.

Auf jeder technischen Oberfläche befinden sich *Fremdschichten*, die von dünnen monomolekularen Adsorptionsschichten im Bereich von 10^{-10} m bis hin zu sichtbaren *Korrosionsschichten* mit mehr als 10^{-6} m Stärke reichen [32, 30, 28]. Die *Fremdschichten* lassen sich nach [79] in rein metallische Berührungsflächen, quasimetallische Berührungsflächen, halbleitende Fremdschichten und mechanisch tragende Fremdschichten unterteilen, siehe Bild 17.



Bild 17: Arten von Berührungsflächen bei elektrischen Kontakten nach [79]

Rein metallische Berührungsflächen entstehen, wenn aufgrund der Kontaktkraft F_k die Fremdschichten durchbrochen und die Kontaktoberflächen verformt werden [30]. Quasimetallische Berührungsflächen sind mit einer Gashaut oder sehr dünnen Fremdschichten von 2 nm bis 3 nm bedeckt, durch die Elektronen verlustfrei tunneln können. Diese Flächen bilden Zonen in der Nähe der metallischen Berührungsflächen [29]. Beide genannte Arten an Berührungsstellen verursachen nur den Engewiderstand aufgrund der Einengung der Stromfäden. Halbleitende Fremdschichten und mechanisch tragende Fremdschichten verursachen iedoch einen zusätzlichen Widerstand, den sogenannten Fremdschichtwiderstand R_F. In letzterem Fall kann der Widerstand bis zur Isolation der Kontaktstücke führen. [28]

Nach Holm [76], gilt für den *Fremdschichtwiderstand* einer kreisförmigen Berührungsfläche, welche gleichmäßig mit einer dünnen Schicht überzogen ist [28]:

$$R_F = \frac{\sigma}{2 \pi \cdot a^2} \qquad \qquad \text{Gl}_{3.4} [76]$$

In Gl 3.4 bezeichnet σ den Widerstand der Schicht pro m^2 und a den Radius der kreisförmigen Berührungsfläche. Somit ergibt sich der Kontaktwiderstand zu:

$$R_{K} = R_{E} + R_{F} = \rho \left(\frac{1}{2 n_{a} \bar{a}} + \frac{1}{2 a_{h}} \right) + \frac{\sigma}{2 \pi \cdot a^{2}} \qquad \text{Gl }_{3.5} [76]$$

Dieser Zusammenhang ist allerdings nur gültig, solange $R_F \ll R_E$ [80].

3.2 Auftretende Schädigungsmechanismen

Schädigungsmechanismen beeinflussen wichtige Kontakteigenschaften der Steckverbinder. Darunter fallen die Kontaktstruktur, die mechanischen sowie die elektrischen Eigenschaften. Allgemein werden *Schädigungsmechanismen* in chemische, mechanische, physikalische oder kombiniert auftretende Mechanismen eingeteilt [27]. Daher werden nachfolgend die für kraftschlüssige Kontakte wichtigsten *Schädigungsmechanismen* dargestellt.

Die im Fall der *Reibkorrosion* kombiniert auftretenden Fehlermechanismen mechanischer Verschleiß, *Korrosion* in der Kontaktzone und physikalische Effekte werden zuerst getrennt beleuchtet. Anschließend wird auf den kombinierten Mechanismus der *Reibkorrosion* eingegangen, die wie Bild 18 zeigt das häufigste Schädigungspotenzial besitzt [34].



Bild 18: Fehler an kraftschlüssigen Kontakten unterteilt nach Einfluss, Auswirkung und zugrundeliegenden Schädigungsmechanismus nach [34]

3.2.1 Mechanische Schädigungsmechanismen

Verschleiß ist als voranschreitender Materialverlust an der Oberfläche eines festen Körpers durch Kontakt und Relativbewegung eines Gegenkörpers definiert [81]. Bei Steckkontakten kann innerhalb der mechanisch induzierten *Schädigungsmechanismen* zwischen Verschleißerscheinungen, die durch das Stecken und Trennen der Kontaktpartner entstehen und unabsichtlich auftretenden Relativbewegungen unterschieden werden. Dabei bewegen sich die Beschädigungserscheinungen beim Stecken im Bereich von Millimetern, wobei es sich bei Relativbewegungen um Mikrobewegungen handelt, die im Allgemeinen die in Kapitel 3.2.4 genauer beschriebene *Reibkorrosion* verursachen. [27] Das Verschleißverhalten von Kontaktbeschichtungen ist vor allem gekennzeichnet durch *Adhäsions- und Polierverschleiß* sowie von *abrasivem Verschleiß*.

Adhäsions- und Polierverschleiß

Auch Verschleißmechanismen des Oberflächenmaterials beeinflussen die Funktionsfähigkeit elektrischer Kontakte. Bei technischen Oberflächen mit Oberflächenrauheiten unter 1 µm [32] wird in zwei Arten unterschieden, dem *Adhäsions*- und dem *Polierverschleiß*. [31]

Bild 19 zeigt zwei sich berührende *A-Spots*, bei denen durch die *Kontakt-kraft* zuerst die beiden rechten Punkte in Berührung treten (siehe Bild 19 a). Infolgedessen verformt sich die metallische Berührungs-fläche plastisch und Materialfluss setzt ein. Oberflächenbeläge und Ablagerungen werden zerstört und es bildet sich eine Kontaktfläche,



Bild 19: Ablauf des Adhäsions- und Polierverschleiß und deren Verschleißerscheinungs-formen nach [31, 82]

welche aufgrund von Kaltverschweißung und Kaltverfestigung die *Kohäsions-festigkeit* des Grundmaterials übersteigen kann. [31]

Bei Erhöhung der *Kontaktkraft* treten auch die linken *A-Spots* in Berührung (siehe Bild 19 b) und bilden ebenfalls eine Kaltverschweißung, jedoch mit verringerter Verbindungskraft. Setzt anschließend eine Relativbewegung ein, tritt *Polierverschleiß* auf bei welchem das Material des linken *A-Spots* direkt in der Kontaktstelle aufbricht. Die entstehende Oberfläche erscheint glatt. Im Gegensatz dazu bricht die Kaltverschweißung des rechten *A-Spots* innerhalb des Grundmaterials, wodurch Verschleißpartikel entstehen (siehe Bild 19 c). Diese Verschleißmechanismen bewirken einen Oberflächenabtrag, der den Beschichtungswerkstoff entfernt und damit die Lebensdauer der Kontakte verringert. [31] Insgesamt ist *adhäsiver Verschleiß* gekennzeichnet durch Materialübertrag, Kaltverschweißungen, Schuppen, Kuppen und Löcher [82]. Infolge dieser Oberflächenbeschädigungen tritt bei weiterer Belastung *abrasiver Verschleiß* auf [32].

Abrasiver Verschleiß

Durchdringt die härtere Oberflächenstruktur eines Kontaktes die äußere Schicht eines weicheren Reibpartners unter Bildung einer neuen Oberfläche wird allgemein von *abrasivem Verschleiß* gesprochen (siehe Bild 20) [83]. Diese Verschleißart ist direkt proportional zum Reibweg, der *Kontaktkraft* sowie der Oberflächenrauheit und indirekt proportional zur Härte des weicheren Kontaktwerkstoffes. In der Regel tritt diese Verschleißart bei Oberflächenrauheiten größer 5 µm auf. [32]



Bild 20: Ablauf des abrasiven Verschleiß und dessen Verschleißerscheinungsformen nach [82]

3.2.2 Chemische Schädigungsmechanismen

Metalloberflächen können, abgesehen von einer 3 nm dicken Gasmolekülschicht, ebenfalls von dickeren Schichten bedeckt sein. Schon unter einer Dicke von 10 nm können diese Schichten isolierend wirken [76]. Daher werden sie aufgrund ihrer Beeinflussung der Kontakteigenschaften als Fremdschichten bezeichnet. Bild 21 gibt eine Übersicht über unterschiedliche, bei kraftschlüssigen Kontakten auftretende Arten von Fremdschichten. [28]



Bild 21: Unterschiedliche Arten von bei Steckkontakten auftretenden Fremdschichten nach [28]

Oberflächenverunreinigungen entstehen während des Fertigungsprozesses von Kontaktteilen bei einer unsachgemäßen Behandlung. Meist sind diese Verunreinigungen inselförmig und in die Oberfläche eingedrückt. Staubkörner oder Kunststoffpartikel hingegen stellen teilchenförmige Verunreinigungen dar, die während des Betriebs von Kontakten in die Kontaktzone gelangen. Anorganische Schichten bestehen aus hautartigen Oxid-, Sulfid- oder Chloridschichten, die während des Transports, der Lagerung oder dem Betrieb von elektrischen und elektronischen Bauteilen entstehen. Im Gegensatz dazu bilden sich Korrosionsschichten durch elektrochemische Prozesse aufgrund der Anwesenheit von Wasserhäuten. Organische Fremdschichten treten als Folge der Kondensation organischer Dämpfe auf. Stehen rein mechanisch beanspruchte Werkstoffe in Kontakt mit organischen Dämpfen, bilden sich Polymerisationsprodukte wie das "Brown-Powder" bei Palladiumoberflächen. sogenannte Bei der Fremdschichtbildung durch Reibkorrosion entstehen Oxidschichten an unedlen Kontaktoberflächen wie beispielsweise Zinn. Durch eintretende Mikrometerbereich werden Relativbewegungen im diese wieder abgerieben. [28]

Oxidation

Beim Vorgang der Oxidation erhöht sich der Sauerstoffanteil des Basismaterials, das gleichzeitig Elektronen abgibt. Bild 22 zeigt das Wachstum von Oxidschichten in Abhängigkeit der Temperatur und Zeit. Vor allem die Bildung von Kupferoxid erfolgt stark temperaturabhängig. Zinn- und Nickeloxid weisen eine geringere Wachstumsrate und ebenfalls eine geringe Temperaturabhängigkeit auf. Darüber hinaus ist das Wachstum der Nickeloxidschicht selbstbegrenzend. [77]



Bild 22: Wachstum von Oxidschichten von Kupferoxid (CuO2), Zinnoxid (SnO) und Nickeloxid (NiO) nach [77]

Korrosion

Korrosion bezeichnet eine chemische oder elektrochemische Reaktion zwischen einer metallischen Komponente und ihrer Umgebung, die nachweisbare Veränderungen hervorruft. Diese Veränderungen führen zur Verschlechterung der Materialeigenschaften und der Funktionsweise des Bauteils. Der Zersetzungsprozess beginnt mit der Bildung einer Schicht aus Korrosionsprodukten und dauert so lange an, wie das Reaktionsmittel durch die Schicht diffundieren und die Reaktion aufrechterhalten kann. Eine der relevantesten *Korrosionsarten* stellt die atmosphärische *Korrosion* dar. Sie bezeichnet den allmählichen Abbau eines Materials durch Kontakt mit Sauerstoff, Kohlendioxid, Wasserdampf, Schwefel- oder Chlorverbindungen, die in der Atmosphäre vorhanden sind. [77]

Frittung von Fremdschichten

Werden mit Fremdschichten behaftete Kontaktoberflächen in Berührung gebracht und können diese Fremdschichten nicht durch mechanische Bewegungen zerstört werden, besteht die Möglichkeit, dass die Schichten durch ein genügend großes elektrisches Feld zerstört werden. Dieser Vorgang wird als Frittung bezeichnet [76]. Es wird zwischen A-Frittung und B-Frittung unterschieden [76]. Bei der A-Frittung entstehen metallische Brücken in den Fremdschichten bei Erreichen der Frittspannung U_F [79]. Im Gegensatz dazu beginnt die B-Frittung im Allgemeinen bei einem existierenden A-Spot und beschreibt die Vergrößerung der leitenden Fläche mit zunehmender Spannung [77]. [84]

3.2.3 Physikalische Effekte

Bei der Betrachtung der physikalischen Einflüsse auf die Zuverlässigkeit kann zwischen dem *Verlust an Kontaktkraft* und *Diffusionsprozessen* unterschieden werden.

Verlust von Kontaktkraft

Die Kontaktkraft sorgt für die Aufrechterhaltung der mechanischen Stabilität kraftschlüssiger Kontakte. Infolge der Spannungsrelaxation nimmt diese jedoch ab (siehe Bild 23), wodurch die mechanischen Eigenschaften der Verbindung verschlechtert, die Stabilität des Kontaktwiderstandes verringert und der Übergangswiderstand erhöht werden. [31]



Bild 23: Exemplarische Darstellung der Spannungsrelaxation an Steckkontakten, Darstellung der Kontaktkraft in % bei T_{max} von 85 °C, 105 °C und 125 °C im Vergleich zu 22 °C

Durch die Bewegung von Gitterfehlern und Legierungsatomen werden elastische Dehnungen im Federelement des Kontakts auf Dauer in plastische Verformungen umgewandelt, wodurch die Federkraft verringert wird [28]. Zusätzlich ist die Verringerung der Federkraft stark temperaturabhängig [85].

Diffusion

Durch Diffusionsprozesse können unedle Legierungsbestandteile wie Kupfer oder Zinn an die Kontaktoberfläche gelangen und dort störende Oxide in der Kontaktzone bilden [30]. Jedoch besteht ebenfalls die Möglichkeit, dass Silberatome durch Isolationsmaterialien diffundieren, wenn ein elektrisches Feld besteht und somit Kurzschlüsse verursachen [77]. Aus diesen Gründen ist der Einsatz einer zwischengelagerten Diffusionsbarriere, beispielsweise aus Nickel, sinnvoll (siehe Kapitel 2.1.1) [86].

3.2.4 Reibkorrosion als kombinierter Schädigungsmechanismus

Der Schädigungsmechanismus der Reibkorrosion ist definiert als beschleunigte Oberflächenbeschädigung an der Grenzfläche von Kontaktmaterialien, die geringen oszillierenden Bewegungen ausgesetzt sind [77]. Der Begriff Reibkorrosion wurde dabei 1927 von Tomlinson eingeführt und mit molekularem Abrieb erklärt [87]. In der Zwischenzeit wurden jedoch zahlreiche Studien veröffentlicht, die andere Phänomene verantwortlich machen. Deshalb wird der Reibkorrosionsprozess wie folgt beschrieben: Zuerst setzt eine Unterbrechung des Oxidfilms auf der Oberfläche durch mechanische Einwirkungen sauberes Metall frei, das mit der Atmosphäre reagiert und schnell oxidiert. Anschließend wird Material von den Oberflächen durch Adhäsionsverschleiß, Delamination oder durch das Abscheren von Mikroverschweißungen, die sich zwischen den A-Spots der Kontaktflächen gebildet haben, entfernt. Daraufhin werden die Oberflächen durch Oxidation der Verschleißpartikel und die Entstehung von harten Schleifpartikeln weiter geschädigt. Schließlich bildet sich eine dicke isolierende Schicht aus Oxiden und Abriebpartikel zwischen den Kontaktflächen. [77]
Ablauf des Reibkorrosionsprozesses

In [89] wird ein ausführliches Modell der *Reibkorrosion* für verzinnte Kontakte beschrieben. Während des Kontaktierungsvorganges werden die natürlichen *Oxidschichten* der Kontaktpartner zerstört und Zinn in die entstandenen Risse gedrückt. Somit entstehen mikroskopische, metallische Verbindungen zwischen den Kontaktwerkstoffen. Die plastischen Mikroverschweißungen widerstehen der *Kontaktkraft* und sorgen so für eine elektrische Verbindung, siehe Bild 24 a. [89, 90]



Bild 24: Schematischer Ablauf des Reibkorrosionsprozesses zwischen zwei Kontaktpartnern nach [77, 88]

Fließt anschließend Strom, erhöht sich die Temperatur innerhalb des Kontaktes und damit die Belastung auf die Mikroverschweißungen. Zu Temperaturerhöhung für sinkenden Beginn sorgt die einen Kontaktwiderstand. Wird die Relativbewegung initiiert, führt die Verschiebung der Kontaktoberfläche zum Abscheren der Metallbindungen. Infolgedessen wird zum einen blankes Grundmaterial freigelegt, welches sehr schnell oxidiert und zum anderen zeitgleich erste Verschleißprodukte freisetzt. Ein Teil dieser Partikel oxidiert, während der Großteil als Metallpartikel erhalten bleibt. Weitere Relativbewegungen erleichtern das Entfernen der Verschleißprodukte aus der Kontaktzone, wodurch die Bildung einer größeren Anzahl an metallischen Kontaktflächen unterstützt wird und ein guter metallischer Kontakt sowie ein stabiler Kontaktwiderstand entstehen. [89, 90]

Weiter anhaltende Reibbewegungen innerhalb der Kontaktzone sorgen jedoch dafür, dass weiteres Material durch *Abrasion* und *Delamination* abgetragen wird. Diese Ablagerungen häufen sich in den Spalten zwischen den Mikroverschweißungen an (Bild 24 b). [89]

Darüber hinaus erweichen die metallischen Schichten in der Kontaktzone und ziehen sich zunehmend zurück, um Regionen mit stark isolierenden Oxid- und Abriebpartikeln zu bilden. Parallel dazu wird die Anzahl an metallischen Kontaktflächen und leitenden Bahnen verringert, siehe Bild 24 c). Dies wiederum erhöht die Stromdichte und Temperatur der Kontaktfläche, wodurch sowohl die Oxidationsrate der verbleibenden *A-Spots* als auch die Rate des Materialabtrages erhöht werden.

Im Extremfall kann der lokale Temperaturanstieg aufgrund der hohen Stromdichte zu einem Aufschmelzen der Kontaktfläche führen. Dies intensiviert nochmals die Zerstörung der metallischen Kontaktflächen. [89]

Charakteristika des Auftretens von Reibkorrosion

Das Auftreten *Reibkorrosion* geht mit charakteristischen von Veränderungen der Kontaktzone einher. Bei der exemplarischen Stahl-Stahl-Tribokontakten Untersuchung von werden folgende Verschleißerscheinungsformen unterschieden: Es entstehen sehr glatte, blanke Bereiche in der Kontaktzone, siehe Bild 25 a. Durch die harten Verschleißpartikel tritt Abrasion auf (Bild 25 b), es kann aber ebenfalls gleichzeitig zu Materialübertrag vom Kontaktpartner durch Adhäsion kommen, siehe Bild 25 c. Darüber hinaus entstehen durch das Herauslösen durch Adhäsion Ermüdungsschuppen (Bild 25 d) sowie Ermüdungszungen durch Walzvorgänge während des Reibkorrosionsprozesses (siehe Bild 25 e). Zusätzlich können sowohl oxidierte Risse in der plastisch verformten Schicht (Bild 25 f) als auch Ermüdungsrisse, die sich im Grundmaterial weiter ausbreiten (Bild 25 g) auftreten. Bei einer großen Anzahl von Partikel kann es zur Sinterung dieser und damit zur Neubildung einer tragenden Fläche kommen (Bild 25 h). [91]



Bild 25: Charakteristische Schäden beim Auftreten von Reibkorrosion nach [91, 92]

Einflüsse auf die Reibkorrosion

Bild 26 zeigt die Haupteinflussfaktoren auf die *Reibkorrosion* Material, Kontakteigenschaft, Umwelt sowie Kontaktbedingungen. Nachfolgend werden die einzelnen Einflussfaktoren betrachtet und ihre Auswirkung auf die Reibkorrosionsneigung von Kontakten beurteilt. [93]



Bild 26: Einflüsse auf die Reibkorrosion unterteilt nach den Haupteinflussfaktoren Material, Kontakteigenschaften, Umwelt und Kontaktbedingungen

Material

Bezüglich des Materials wird eine weitere Unterteilung der Einflüsse in Materialpaarung, Schichtdicke sowie Härte beziehungsweise Festigkeit getroffen. Bei der Paarung von Kontaktmaterialien erfolgt eine weitere Gliederung in gleiche und unterschiedliche Materialpaarungen [93]. Im Allgemeinen weist Silber (Ag) den stabilsten Widerstandsverlauf bezüglich der Reibkorrosion auf [94]. Die geringe Verschleißneigung, die Oxidfreiheit sowie die nicht vorhandene Polymerisation [95] wird nur durch die geringe Anlaufbeständigkeit begrenzt. [93] Auch reine Goldflächen (Au) besitzen gute Kontakteigenschaften [96].

Bei den palladiumbasierten Kontaktwerkstoffen muss zwischen den einzelnen Legierungen unterschieden werden. Während reines Palladium und Palladium-Nickel-Legierungen [97] aufgrund der Bildung von Polymerisationsprodukten schlechtere Widerstandsverläufe aufweisen, stellen Palladium-Silber sowie Palladium-Gold-Silber-Legierungen eine gute Alternative zu Gold dar. [98]

Unedle Metalle bilden Korrosionsprodukte, die nach wenigen Zyklen einen erheblichen Einfluss auf den Kontaktwiderstandsverlauf ausüben [93]. Dies gilt sowohl für mit Lot (SnPb) beschichtete Oberflächen [99], als auch für die Paarung von Nickel mit Nickel [94] und Kupfer mit Kupfer [96, 100]. Bei der Paarung von Aluminium- mit Aluminiumoberflächen tritt ebenfalls nach kurzer Zeit eine deutliche Widerstandserhöhung auf [100].

Bei ungleichen Materialpaarungen sind die Korrosionseigenschaften des weicheren Materials entscheidend, da ein Materialübertrag vom Weicheren zum härteren Material stattfindet [93, 96]. Palladium gepaart mit Gold oder weichen Gold-Legierungen, führt im Allgemeinen zu guten Widerstandsverläufen [98]. Ebenso verhält sich Gold, wenn es mit härterem Nickel gepaart wird [96]. Wird Gold allerdings mit gleichhartem Kupfer oder mit weicherem Zinn gepaart, ergeben sich mittlere bis schlechte Widerstandsverläufe, da das System durch Materialübertrag zu einem reinen Kupfer-Kupfer oder Zinn-Zinn-System übergeht [96].

Die Schichtdicke hat ebenfalls Einfluss auf die *Reibkorrosion*. Bei goldbeschichteten Kontakten besteht ein Zusammenhang zwischen größeren Schichtdicken und einem konstanten Widerstandsverlauf [96]. Bei Zinnbeschichtungen ist eine Wechselwirkung mit der Kontaktkraft zu beachten. Bei hohen Kontaktkräften erweisen sich dünnere Schichten als stabiler und bei niedrigen Kontaktkräften dickere Schichten [101].

Durch unterschiedliche Härten der Kontaktträger- und Beschichtungswerkstoffe wird ebenfalls die Tendenz zur *Reibkorrosion* unterschiedlich stark beeinflusst. Im Allgemeinen besitzen harte Materialien eine geringere Verschleißneigung, da sie durch ihre höhere Festigkeit den lokal auftretenden hohen Spannungsermüdungen besser widerstehen. Darüber hinaus neigen sie zu weniger Materialabtrag durch abrasive Oxidationsprodukte. [88]

Bildet der Kontaktwerkstoff beziehungsweise die Kontaktbeschichtung eine *Oxidschicht*, ist die Kombination aus Härte der Schicht sowie der Härte des darunterliegenden Materials ausschlaggebend. Harte Werkstoffe, die eine weiche *Oxidschicht* erzeugen, weißen eine gute Widerstandsfähigkeit gegenüber *Reibkorrosion* auf. Dagegen besitzen weiche Materialien mit einer harten *Oxidschicht* eine geringe Widerstandsfähigkeit. [37, 102]

Kontakteigenschaften

Auch die Oberflächenrauheit spielt beim Auftreten von *Reibkorrosion* eine Rolle. Durch ihren höheren *Plastizitätsindex* und der Entstehung von *Kaltverschweißungen*, die ein komplettes Abflachen der Oberfläche verhindern, sind raue Oberflächen unempfindlicher gegenüber *Reibkorrosion*. [88]

Neben den oben genannten Faktoren besitzt auch die Kontaktgeometrie einen Einfluss auf die *Reibkorrosion*. Keilförmige Kontaktelemente sind einem konstanten Widerstandsverlauf zuträglicher als gewölbte Elemente [103]. Allerdings weisen gewölbte Kontaktelemente bessere Eigenschaften als flache Kontaktgeometrien auf [84]. [104]

Umwelt

Feuchtigkeit kann in der Kontaktzone gegenteilige, mitunter auch parallel ablaufende Einflüsse haben. Zum einen dient sie als Schmiermittel, indem die beiden metallischen Oberflächen voneinander getrennt werden und die *Adhäsion* verringert wird. Zum anderen besteht die Gefahr, dass durch Feuchtigkeit Korrosionsprodukte in den Verschleißspuren eingeschlossen werden und somit eine anodische Korrosionsreaktion ausgelöst wird. [88] Die Abnahme der Schäden erfolgt dabei linear mit der Zunahme der Feuchtigkeit [105]. In [106] wird eine *relative Feuchte* von 85 % φ als Grenzwert für eine positive Auswirkung auf die Reibkorrosion angegeben. Bei Werten unter 85 % φ tritt vermehrt Verschleiß auf, wohingegen darüber eine schmiermittelähnliche Wirkung festzustellen ist. Im Gegensatz dazu weisen mit Edelmetallen beschichtete Kontakte dieses Verhalten nur sehr gering ausgeprägt auf [107].

besitzt einen maßgeblichen Einfluss Die Temperatur auf das Reibkorrosionsverhalten, da sie sowohl die Oxidationsrate als auch die Materialeigenschaften verändert [77]. Besonders bei verzinnten Kontakten besteht aufgrund der zu beobachtenden Erweichungstemperatur, im Bereich zwischen 60 °C [108] und 100 °C [106], eine Abhängigkeit von der Temperatur. Innerhalb dieses Temperaturbereichs erweicht Zinn und die Korrosionsrate verringert sich. Bei noch höheren Temperaturen werden jedoch verstärkt intermetallische Phasen zwischen Kupfer und Zinn gebildet, die den Kontaktwiderstand erhöhen und den Effekt der Reibkorrosion verstärken. Aus diesem Grund besitzen verzinnte Kontakte Temperaturen über 125 °C ein deutlich schlechteres bei Reibkorrosionsverhalten. [106, 109]

Bezüglich der elektrischen Eigenschaften existiert für jeden Stromwert ein entsprechender kritischer *Engewiderstandswert*, der den Stromfluss nicht behindert, sodass es zu keinen Veränderungen im Kontaktbereich kommt. Ist der *Engewiderstand* in der Kontaktzone jedoch größer als der kritische Wert, ist die erzeugte Wärme ausreichend, um die Kontaktzone zu vergrößern. Dieser kritische *Engewiderstand* ist indirekt proportional zur Größenordnung des fließenden Stroms. [102]

Kontaktbedingungen

Unabhängig von der Bewegungsamplitude nimmt der Verschleiß von zinnbeschichteten Kontakten mit zunehmender Frequenz ebenfalls zu [110]. Jedoch kann auch bei sehr kleinen Frequenzen (0,04 Hz) sowohl bei unedlen als auch bei edlen Metalloberflächen *Reibkorrosion* auftreten und somit zu einem frühen Ausfall führen [96].

In [11] werden drei Gruppen an Bewegungsamplituden angegeben, in denen *Reibkorrosion* in unterschiedlicher Ausprägung auftritt: Das *stick-regime* mit sehr geringen Bewegungsamplituden, in dem bis auf das Abscheren einzelner *A-Spots* keine sichtbare Schädigung der Oberfläche entsteht, das *stick-slip-regime* mit größeren Amplituden, einer im Zentrum bis auf einzelne Abscherungen unberührten Fläche und deutlichen Schädigungen im Randbereich der Kontaktzone sowie das *gross-sliding-regime* in welchem die komplette Verschleißfläche plastische Verformungen und deutliche Reibspuren aufweist. [111, 112]

[113] zeigt hingegen, dass in der Realität nur das *stick-slip-regime* sowie das *gross-sliding-regime* auftreten. Zusätzlich wird ein *mixed-fretting-regime* zwischen *stick-slip* und *gross-sliding* definiert [112]. In diesem Bereich muss zwischen duktilen und spröden Materialien unterschieden werden. Bei duktilen Materialien wirken das Entstehen einer tribologisch veränderten Struktur, die Partikelbildung sowie die *Risskeimbildung* gegenläufig zueinander. Im Gegensatz dazu bilden spröde Materialien schnell Abriebprodukte, die der Bildung einer *Fremdschicht* gleichkommen. Auf diese Weise wird der Bewegungsbereich hin zum *gross-sliding-regime* verschoben. [113]

Weitere Reibkorrosionsuntersuchungen zeigen, dass bei kleinen Bewegungsamplituden im Bereich von 5 μ m zwar wenig frisches Material für die *Reibkorrosion* zur Verfügung steht und das Ausmaß der Oxidation begrenzt ist, allerdings können sich viele Korrosionsprodukte in den Verschleißspuren ansammeln. Im Gegenzug steht bei großen Amplituden im Bereich von 25 μ m viel neues Material zur Verfügung und Oxidation findet im großen Ausmaß statt, dagegen sammeln sich weniger Abriebpartikel an. [110]

Die Erhöhung der Kontaktkraft führt allgemein zu einer Erhöhung der Zykluszahl bis zum Ausfall [99]. Dies beruht darauf, dass Reibkorrosionsoder Polymerisationsprodukte mithilfe einer größeren Kontaktkraft leichter durchdrungen werden können [104, 114]. Darüber hinaus wirken hohe Kontaktkräfte in Steckkontakten den Mikrobewegungen entgegen und verringern somit die Auswirkungen der Reibkorrosion [114]. So kann beispielsweise eine Kontaktkraft von 10 N das Auftreten von Reibkorrosion verzögern [115].

4 Entkopplung der thermischen, chemischen und mechanischen Einflüsse

Wie in Kapitel 3.2.4 dargestellt, haben die durch thermische Belastungen entstehenden Relativbewegung einen großen Einfluss auf die Lebensdauer von Steckverbindungen. Daher werden im nachfolgenden Kapitel die Einflüsse der Belastungsparameter wie Temperatur und Relativbewegungsweg auf den Schädigungsgrad separiert betrachtet.



Hierzu wird in 4.1 die zugrunde liegende Methodik beschrieben, bei der in Kapitel 4.1.1 ein Versuchsaufbau konzipiert und umgesetzt wird, der es ermöglicht, Relativbewegungen in die Kontaktzone von Steckverbinderkontakten einzubringen. In Kapitel 4.2 folgt die Beschreibung der Durchführung der sogenannten Relativbewegungstests (RBT). Hierbei geht das Unterkapitel 4.2.1 detailliert auf die Auswertung der Widerstandsverläufe ein, da die Methodik im gesamten weiteren Verlauf der Arbeit Anwendung findet. Analog wird im Kapitel 4.2.2 auf die Auswertung der Mikroskopieaufnahmen und damit der Oberflächenrauheiten eingegangen. Auch dieses Vorgehen wird in der restlichen Arbeit beibehalten. Abschließend werden die durchgeführten Relativ-bewegungstests zur Bewertung der Wirksamkeit einem klassischen Temperaturwechseltest (TW) gegenübergestellt (Kapitel 4.3), bevor eine Zusammenfassung der Ergebnisse in Kapitel 4.4 erfolgt. Dieses Kapitel entstand mithilfe folgender studentischer Arbeiten: [S5, S6]

4.1 Methodik zur Entkopplung der Einflüsse

Zur Entkopplung von thermischen Einflüssen infolge erhöhter Umgebungstemperaturen und den mechanischen Belastungen durch resultierende Relativbewegung wird ein Versuchsaufbau entwickelt. Versuchsaufbaus Mithilfe werden Relativbewegungen des im Mikrometerbereich innerhalb der Kontaktzone von Steckverbindungen induziert. Um die vermehrte Bildung von Oxidschichten aufgrund der erhöhten Aktivierungsenergie während des Versuchs abzubilden, werden die Versuche zusätzlich in einem Trockenschrank mit konstanter durchgeführt. Temperatur Trbt Somit soll ermöglicht werden. Rückschlüsse auf die Anfälligkeit für mechanisch und thermisch induzierte Schädigungen sowie die Zuverlässigkeit der Kontakte zu ziehen.

4.1.1 Versuchsaufbau zur Entkopplung der Einflüsse

In der Literatur existiert eine Vielzahl an Reibkorrosionsprüfständen, bei denen meist eine abstrahierte Geometrie einer Vielzahl an Zyklen ausgesetzt wird [104, 109, 116-118]. Neben der einfacheren Geometrie der Kontaktpartner wird bis auf wenig Ausnahmen [119], meist bei Raumtemperatur getestet. Eine Ausnahme stellt der Versuchsaufbau in [120] dar, bei welchem ein luftgekühlter Schrittmotor mittels direkt angebundener Werkzeuge zum Testen von Einpress- und Schneid-Klemm-Verbindungen genutzt wird. Häufig wird anstatt eines Schrittmotors ein Schwingungserreger zur Einbringung von Mikrobewegungen in die Kontaktzonen genutzt [117]. Im Gegensatz zu den bisherigen Versuchsaufbauten wird in dieser Arbeit der Ansatz verfolgt, eine reale Kontaktgeometrie unter mechanischer und thermischer Last zu prüfen. Dabei soll die Erwärmung durch die Umgebungsluft erfolgen, um die Belastung mit einer späteren Einbausituation im Fahrzeug vergleichen zu können. Insgesamt steht neben der möglichst großen Bandbreite an Bewegungsamplituden (100 μ m – 1000 μ m) und der Genauigkeit (±1 μ m) des Versuchsaufbaus im Fokus eine maximale Anzahl an Kontakten gleichzeitig innerhalb eines minimalen Kostenrahmens zu testen.

Zur Einbringung von Mikrobewegungen in die Kontaktzone wird ein hochgenauer Linearmotor genutzt. Der Aktor der Firma Physik Instrumente ermöglicht Bewegungen von 1 μ m bis in den Millimeterbereich (siehe Bild 28 h). Aufgrund der erhöhten Temperatur muss der Linearmotor jedoch außerhalb des Trockenschranks montiert

Die Motor-Tisch-Verbindung werden (Bild 28 f). inklusive der Motoraufhängung stellt daher die Kraftübertragung vom Linearmotor zum Tischaufbau sicher (siehe Bild 28 g). Die zehn zu testenden Kontaktpaare werden von einem zweiteiligen Führungsschlitten aufgenommen (siehe Bild 28 d). Dabei besteht der Schlitten aus zwei teflonbeschichteten Basisplatten (siehe Bild 28 e), bei welchen die Aufnahme der Stiftkontakte beweglich gelagert und das Gegenstück für die Buchsenkontakte mit vier Bremselementen (siehe Bild 28 c) auf der passiven Linearführung (siehe Bild 28 b) fixiert ist. Die Kontakte werden durch verschraubte Teflonleisten auf den jeweiligen Hälften des Führungsschlittens fixiert. Der gesamte Tischaufbau wird anschließend über Befestigungsstege im Trockenschrank montiert.



Bild 28: Schematische Darstellung des entwickelten Versuchsaufbaus zur Einbringung von Relativbewegungen in die Kontaktzone von Steckverbindungen inklusive der benötigten Komponenten

Bild 29 zeigt die Lagerung der Steckverbinderkontakte im Versuchsaufbau. Die Kontaktkraft wird hierbei von der Geometrie der Steckverbinder vorgegeben. Der Versuch wird in einem Trockenschrank der Firma Hereaus durchgeführt. Die anfängliche Luftfeuchtigkeit entspricht der normalen Luftfeuchtigkeit der Raumluft. Theoretisch ermöglicht der Linearmotor eine Frequenz von 26 Hz, bei einem Relativbewegungsweg von 100 µm, Da die zu untersuchenden thermischen Ausdehnungsvorgänge jedoch wesentlich langsamer ablaufen werden die Versuche in einem Frequenzbereich von $5 \cdot 10^{-4}$ Hz bis $3 \cdot 10^{-3}$ Hz durchgeführt. Dabei beruht die niedrige Frequenz auf der maximal möglichen Temperaturänderungsgeschwindigkeit des zum Vergleich herangezogenen Temperaturwechselschrankes der Firma Vötsch.



Bild 29: Detailansicht des Versuchsaufbaus mit Lagerung der Kontakte und beispielhafter Relativbewegung

4.2 Durchführung von Relativbewegungstests

In einem ersten Schritt werden klassische Temperaturwechseltests durch Relativbewegungstests reproduziert. Hierbei werden, wie auch in den nachfolgenden Untersuchungen Standard-Timer-Kontakte der Firma TE Connectivity genutzt. Das männliche Kontaktelement ist ein aus CuSn4 gefertigtes Stanzbiegeteil mit einer Stiftbreite von 6,3 mm. Die weiblichen Kontaktelemente bestehen aus CuZn30 mit drei eigenständigen Kontaktelemente werden aus vorverzinnten Blechen gefertigt. Wie aus den in Bild 30 dargestellten metallographischen Schliffbildern ersichtlich, besitzt die Zinnschicht auf dem männlichen Kontaktelement eine Dicke von durchschnittlich 5 μ m und auf dem weiblichen Kontaktelement von 11 μ m. [121, 122]



Bild 30: Verwendete Standard-Timer-Kontakte mit entsprechenden Abmessungen, inklusive metallographische Schliffbilder zur Bestimmung der Zinnschichtdicke a) männliches Kontaktelement aus CuSn4, b) weibliches Kontaktelement aus CuZn30 [121, 122]

Bei der Durchführung der Relativbewegungstests werden jeweils zehn im Ultraschallbad gereinigte Kontaktpaare in Reihe verschaltet. Bild 31 zeigt den Anlieferungszustand eines männlichen Kontaktelements unter dem Digitalmikroskop. Es werden Rauheitsmaxima von bis zu 3,8 µm beobachtet. Der Übergangswiderstand zwischen den Kontaktpaaren mit einer Kontaktüberdeckung von 1,4 mm [121, 123] wird mittels der in Kapitel 2.3.1 beschriebenen und anhand einer Messmittelanalyse Typ 1 als fähig bewerteten Vierleiter-Messtechnik ermittelt.



Bild 31: Anlieferungszustand der Standard-Timer-Kontakte a) Digital-Mikroskopieaufnahme, b) Laser-Scanning Mikroskopieaufnahme mit farblich markierter Oberflächenunregelmäßigkeit sowie Flächenplot der Oberflächenrauheit des Bereichs

Erste Voruntersuchungen zeigen, dass die Größenordnung der in den thermischen Qualifizierungstests auftretenden Oberflächenbeschädigungen durch den beschriebenen Relativbewegungstest wiedergegeben werden können. Bild 32 zeigt den Vergleich zweier Mikroskopieaufnahmen nach den jeweiligen Qualifizierungstests, Bild 32 a) entspricht hierbei einem klassischen Temperaturschocktest, wohingegen Bild 32 b)die Oberfläche nach einem Relativbewegungstest darstellt. Nach [92] können Verschleißbeträge in eindimensionale Geometrieveränderungen senkrecht zur gemeinsamen Kontaktfläche die *Verschleiß-Längen W*_l sowie zweidimensionale Querschnittbereichs-veränderungen die *Verschleiß-Fläche W*_q, unterteilt werden. Tabelle 2 zeigt eine Übersicht der ermittelten Verschleißparameter, dabei unterscheiden sich die Verschleiß-Längen um 20 µm und die Verschleiß-Flächen um 22 %. [P3]

Verschleißparameter	Abkürzung	Wert
Verschleiß-Länge thermisch	W _{lt}	4,0 \cdot 10 ³ µm
Verschleiß-Länge mechanisch	W _{lm}	$4,2\cdot 10^3 \ \mu m$
Verschleiß-Fläche thermisch	W _{qt}	$1.8 \cdot 10^5 \ \mu m^2$
Verschleiß-Fläche mechanisch	W _{qm}	$1.4 \cdot 10^5 \ \mu m^2$

 Tabelle 2: Quantifizierung der Schädigung nach [92] zwischen thermischen Test (Temperaturschock) sowie mechanischen Test (Relativbewegung)



Bild 32: Vergleich der auftretenden Relativbewegungen zwischen a) thermischen Test (Temperaturschock) und b) mechanischem Test (Relativbewegungstests), bei $T_{max} = 105 \text{ °C}$ und $t_h = 15 \text{ min}$, mit dargestellten Verschleiß-Längen W_l und Verschleiß-Flächen W_q nach [P₃]

Analog wird eine Berechnung der bei den rein thermischen Tests auftretenden Relativbewegungen durchgeführt. Nach [124] ist die Verschiebung des Schwerpunkts u_s bei Erwärmung unter Berücksichtigung von Wärmeausdehnung und Reibung wie folgt definiert:

$$u_{s} = \varepsilon_{th} \cdot \Delta l = \frac{F \cdot l_{0}}{2 \cdot \mu \cdot m \cdot g} \cdot \alpha \cdot \Delta T \qquad \qquad \text{Gl }_{4.1} \text{ }_{[124]}$$

Dabei stellt F eine Kraft in Längsrichtung, l_0 die Ausgangslänge, α den *Wärmeausdehnungskoeffizienten* ($\alpha_{CuZn30} = 18,8 \cdot 10^{-6}$), ΔT die Temperaturänderung (85 K), μ den *Reibungskoeffizienten* ($\mu_{Zn} \approx 0,5$), m die Masse ($m_f = 5,2 \cdot 10^{-4}$ kg) und g ($g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$) die Fallbeschleunigung auf der Erde dar. [33] Dabei ergibt sich für eine Temperaturänderung von Raumtemperatur auf 105 °C eine Verschiebung von 279 μ m. Dies entspricht der Größenordnung der im thermischen Qualifizierungstest ermittelten Relativbewegung.

Auf dieser Basis werden im Folgenden Relativbewegungstests durchgeführt und anhand von aufgezeichneten Widerstandsverläufen sowie erstellten Rauheitsprofilen analysiert. Die Versuchsdurchführung erfolgt auf Basis eines vollfaktoriellen Versuchsplanes mit den Faktoren *Temperatur* und *Bewegungsamplitude* (siehe Tabelle 3). Ein besonderes Augenmerk wird auf die angewandte Methodik gelegt, da sie als Basis für die Auswertung in den nachfolgenden Kapiteln dient.

Versuch	A / Temperatur	B / Bewegungsamplitude	Anzahl Kontakte
4.1	+ / 125 °C	+ / 500 μm	10
4.2	- / 105 °C	- / 250 μm	10
4.3	+ / 125 °C	- / 250 µm	10
4.4	- / 105 °C	+ / 500 μm	10

Tabelle 3: Randomisierter vollfaktorieller Versuchsplan mit den Faktoren A – Temperatur und B – Bewegungsamplitude, jeweils 10 Kontaktpaare

4.2.1 Auswertung der Widerstandsverläufe

Zur Auswertung der Widerstandsverläufe wird die Berechnungssoftware MATLAB genutzt. Sie bietet durch freie Programmierung eine Vielzahl an Auswertemöglichkeiten. Die in Bild 33 aufgezeigte Auswertemethodik stellte eine evolutionäre Entwicklung der zugrunde liegenden Vorarbeiten [125, 126, P3-P5] dar. Nach dem Import der aufgezeichneten Widerstandsdaten in die Berechnungssoftware werden die Werte über einen Gaußfilter geglättet und anschließend grafisch dargestellt. Um die spätere Ermittlung der Lebensdauer zu ermöglichen, werden die Ausfallgrenzen individuell für jeden Kontakt berechnet. Für die zugrunde liegende Kontaktgeometrie, von 1 mm² Leitungsquerschnitt und Kontaktbreite von 4.8 mm wird von der Volkswagen einer Lieferantenvorschrift VW 75174 ein Ausfallkriterium ΔR_{krit} von 8 m Ω vorgegeben [53]. Aufgrund der hohen Zuverlässigkeit der zu testenden Standard-Timer-Kontakte wird jedoch analog zu [117] ein niedriges Ausfallkriterium von 2,5 m Ω definiert (siehe Gl 4.2). Auch diese niedrigen Widerstandserhöhungswerte weisen auf deutlichen Schädigungen der Kontaktzone hin wodurch die Kontaktstabilität gefährdet ist. Zur zusätzlichen Unterstützung der Auswertemethodik wird der Trend der Widerstandsverläufe als polynomiale Kurvenanpassung dritten Grades berechnet und in den Graphen abgebildet.





Bild 33: Ablauf der Methodik zur Auswertung der Durchgangswiderstände der Steckverbinderkontakte mithilfe der Berechnungssoftware MATLAB

Anschließend werden analog zu der in [P5] beschriebenen Vorgehensweise die Widerstandsverläufe in drei Kategorien eingeteilt. Klasse 1 steht für einen "konstanten Verlauf" der Durchgangswiderstände ohne Ausfall, Klasse 2 für einen "kontinuierlichen Anstieg" der Widerstände mit oder ohne Ausfall und Klasse 3 für "irreguläre Verläufe", die häufig mit einem Ausfall des entsprechenden Kontakts einhergehen (siehe Bild 34).



Bild 34: Übersicht über die Widerstandsverlaufskategorien a) Klasse 1 "konstanter Verlauf", b) Klasse 2 "kontinuierlicher Anstieg", c) Klasse 3 "irregulärer Verlauf"

Darüber hinaus werden die Lebensdauern der ausgefallenen Kontakte berechnet. Abschließend erfolgt eine statistische Auswertung der Mittelwerte der maximalen Widerstandsverläufe mittels Varianzanalyse (engl. analysis of variance, ANOVA). Da es sich bei der Auswertung der Widerstandsverlaufskategorien sowohl bei den Faktoren als auch bei den Ergebnissen um attributive Daten handelt, wird zur statistischen Auswertung ein Chi-Quadrat-Test herangezogen. Bei beiden statistischen Auswertemethoden liegt die Grenze für signifikante Aussagen bei einem Signifikanzwert (p-Wert) von 0,05 bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$. Somit kann mit 95 % Sicherheit ein signifikantes Ergebnis als solches erkannt werden.

Einfluss der Temperatur

Bei der Untersuchung des Einflusses der Temperatur werden vier Versuche bei zwei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt. Bild 35 stellt die Widerstandsverläufe der Relativbewegungstest mit maximalen Temperaturen von 105 °C und 125 °C dar. In der Analyse der Verläufe lassen sich keine sichtbaren Unterschiede erkennen. Die Widerstände steigen zwar bei einer Temperatur von 125 °C ab einer Versuchsdauer von circa 75 h minimal, im Mittel um 0,15 m Ω ($\sigma = 0,6$ m Ω), an (siehe Bild 35 b), dieser Anstieg ist aber, da er bei allen Kontakten in Versuch 4.2 in gleicher Höhe auftritt. durch externe Faktoren wie eine Schwankung der Stromversorgung zu erklären. Bei den in Versuch 4.3 getesteten Kontakten, welche ebenfalls einer Temperatur von 125 °C ausgesetzt wurden, tritt diese Erhöhung nicht auf. Bei beiden Temperaturen übersteigt kein Widerstand die Ausfallgrenze, die durch eine Widerstandserhöhung um $2.5 \text{ m}\Omega$ gekennzeichnet ist.



Bild 35: Vergleichende Betrachtung der Widerstandsverläufe für a) $T_{RBT} = 105$ °C und b) $T_{RBT} = 125$ °C; je 10 Kontaktpaare; 100 h thermische Auslagerung; bei $T_{tA} = 125$ °C; Relativbewegungen: $r_1 = 500 \,\mu\text{m}$; Haltezeit: $t_1 = 0,25$ h; $v = 8,4 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$

Beim Vergleich der Widerstandsverlaufskategorien nach [P5] treten nur Klasse 1 "konstanter Verlauf" und Klasse 2 "kontinuierlicher Anstieg" auf. siehe Bild 36. Die statistische Auswertung Verläufe der Widerstandskategorien erfolgt mittels Chi-Quadrat-Test. Dabei ergibt der Test mit einem p-Wert von 0,08 keinen signifikanten Unterschied in der Grundgesamtheit der Temperaturen. Es kann zwar eine leichte Tendenz zu Klasse 2 Verläufen bei einer Temperatur von 125 °C festgestellt werden, allerdings haben die unterschiedlichen Temperaturen keinen statistisch signifikanten Einfluss auf die in den Relativbewegungstests auftretenden Widerstandsverläufe. Somit können durch die Kombination aus erhöhter, konstanter Temperatur und eingebrachter Relativbewegung keine kritischen. der Reibkorrosion entsprechenden Widerstandsverläufe provoziert werden.



Bild 36: Nach [P5] kategorisierte Widerstandsverläufe bei Relativbewegungstests (Relativbewegungen: $r_1 = 500 \,\mu$ m), a) Versuch 4.1 $T_{RBT} = 105 \,^{\circ}$ C, b) Versuch 4.2 $T_{RBT} = 125 \,^{\circ}$ C, es treten nur Verläufe der Klasse 1 "konstanter Verlauf" und der Klasse 2 "kontinuierlicher Anstieg" auf

Wie in Bild 37 abgebildet, unterscheiden sich die Boxplots der maximalen Widerstände der Relativbewegungstest-Temperaturen mit 105 °C und 125 °C nur geringfügig. Dies spiegelt sich sowohl im geringen Unterschied der Mittelwerte, des Medians als auch der Streuung (Standardabweichung $\sigma = 0.2 \text{ m}\Omega$) wieder. In der Varianzanalyse ergibt sich deshalb mit einem p-Wert von 0,33 ein nicht signifikanter Unterschied in den maximalen Daraus wird gefolgert, Widerstandswerten. dass in den Relativbewegungstests die Temperatur ebenfalls keinen Einfluss auf die Widerstandserhöhung hat.



Bild 37: Boxplots der maximalen Widerstände der Relativbewegungstests bei T_{RBT} = 105 °C und T_{RBT} = 125 °C, mit Angabe des Ausfallkriteriums und des Medians x_{med}

Einfluss der Bewegungsamplitude

Zur Überprüfung des Einflusses der Bewegungsamplitude auf die Widerstände der Kontakte während der Relativbewegungstests werden analog zum Versuchsplan Versuche auf zwei Faktorstufen durchgeführt. Dabei orientieren sich die Distanzen von 250 µm und 500 µm am in Kapitel 4.2 durchgeführten Vergleich der Schädigungen während thermischer Tests und mechanischer Tests sowie der Berechnung der Schwerpunktverschiebung. Bild 38 verdeutlicht, dass in beiden Versuchen keine Widerstandserhöhung auftritt, die das Ausfallkriterium von 2,5 m Ω übersteigt. Bei einer Bewegungsamplitude von $r_1 = 500$ µm tritt eine minimale Erhöhung der Widerstandswerte auf.



Bild 38: Vergleichende Betrachtung der Widerstandsverläufe der Relativbewegungstests für a) $r_1 = 500 \,\mu\text{m}$ und b) $r_1 = 250 \,\mu\text{m}$; je 10 Kontaktpaare; 100 h thermische Auslagerung; bei $T_{tA} = 125 \,^{\circ}\text{C}$; Temperatur: $T_{RBT} = 125 \,^{\circ}\text{C}$; Haltezeit: $t_1 = 0.25 \,\text{h}$; $v = 8.4 \cdot 10^{-7} \,\text{m s}^{-1}$

Wie Bild darstellt. bei der Variation der 30 treten auch Relativbewegungsamplituden nur Klasse 1 "konstanter Verlauf" und der Klasse 2 "kontinuierlicher Anstieg" Verläufe auf. Der Unterschied in der Grundgesamtheit der Widerstandsverlaufsklassen der Versuche mit einer Relativbewegung von $r_1 = 500 \,\mu\text{m}$ und $r_1 = 250 \,\mu\text{m}$ ist im Chi-Ouadrattest nicht signifikant (p-Wert = 0.38).

Daraus folgt, dass auch die unterschiedlichen Bewegungsamplituden der Relativbewegungstests keinen signifikanten Einfluss auf die auftretenden Widerstandsverlaufsklassen besitzen.



Bild 39: Nach [P5] kategorisierte Widerstandsverläufe bei Relativbewegungstests (Temperatur: $T_{RBT} = 125$ °C), a) $r_1 = 500 \,\mu\text{m}$, b) $r_1 = 250 \,\mu\text{m}$, es treten nur Verläufe der Klasse 1 "konstanter Verlauf" und der Klasse 2 "kontinuierlicher Anstieg" auf

Die Boxplot-Diagramme der maximalen Widerstandsverläufe in Bild 40 veranschaulichen, dass beim Vergleich der Bewegungsamplituden keine signifikanten Unterschiede in den Mittelwerten auftreten (p-Wert = 0,46). Auch der Median x_{med} unterscheidet sich nur um 0,1 m Ω . Zusätzlich ergibt sich bei beiden Bewegungsamplituden die gleiche Standardabweichung von 0,2 m Ω . Die Variation der Relativbewegungsamplituden hat somit ebenfalls keinen Einfluss auf die Unterschiede in den maximalen Widerständen der Relativbewegungstests.



Bild 40: Boxplots der maximalen Widerstände der Relativbewegungstests mit $r_1 = 500 \,\mu\text{m}$ und $r_1 = 250 \,\mu\text{m}$, mit Angabe des Ausfallkiteriums und des Medians x_{med}

4.2.2 Auswertung der Rauheitsprofile

Bei der Auswertung der Rauheitsprofile (siehe Bild 41) wird nach Beendigung der Versuchsdurchführung zuerst eine makroskopische Übersichtsaufnahme mittels eines Leica DVM6 Digitalmikroskops zur Darstellung des akkumulierten Schadens sowie zur Eingrenzung der Kontaktzone angefertigt. Anschließend werden für drei Kontakte je Versuchsdurchlauf Laser-Scanning-Mikroskopieaufnahmen (Keyence VK-9700) erstellt. Nach dem Importieren in die Berechnungssoftware MATLAB, erfolgt eine Neigungskorrektur. Anschließend wird die *Verschleiß-Fläche W*_q anhand der Laserintensität selektiert, berechnet und im *Höhenprofil* dargestellt. Abschließend werden nach DIN EN ISO 25178-2 die Flächenrauheitskennwerte *mittlere arithmetische Höhe der Oberfläche* $S_a(Gl 4.3)$ und *maximale Höhe der Oberfläche* S_z (Gl 4.4) berechnet [127].

In Gl 4.3 entspricht die *Verschleiß-Fläche* W_q dem Definitionsbereich. Z(x,y) ist der Wert der Ordinate und somit die Höhe der Oberfläche an der Position x, y. [127]

$$S_z = S_p + S_v = \max z (x, y) + \min z (x, y)$$
 Gl 4.4

Die maximale Höhe der Oberfläche S_z setzt sich zusammen aus der Summe der maximalen Spitzenhöhe der Oberfläche S_p und der maximalen Senkenhöhe der Oberfläche S_v . [127]

Zusätzlich wird die Betrachtung des Verhältnisses V_S (Gl 4.5) von S_z - zu S_a -Werten mit dem Ziel eingeführt, die Ansammlung von Rauheitsspitzen und somit Partikeln in der Kontaktzone messbar zu machen.

$$V_S = \frac{S_z}{S_a} \qquad \qquad \text{Gl } 4.6$$



MATLAB

Bild 42 zeigt die vergleichende Betrachtung der Leica-Digitalmikroskopieaufnahmen. Dabei können sowohl die durch das Stecken der Kontakte verursachten mechanischen Beschädigungen als auch die geschädigten Bereiche in der Kontaktzone erkannt werden. Jedoch deutet die leichte graue Verfärbung in Kombination mit den lediglich geringfügigen Anstiegen der Widerstandsverläufe auf ein frühes Stadium der Verschleißerscheinungen hin. Zwischen den drei abgebildeten Versuchsdurchführungen können keine Unterschiede in den Digitalmikroskopaufnahmen festgestellt werden.



Bild 42: Vergleich der Digitalmikroskopieaufnahmen im Relativbewegungstest a) Versuch 4.1, $T_{RBT} = 105$ °C, $r_1 = 500 \mu$ m, b) Versuch 4.2, $T_{RBT} = 125$ °C, $r_1 = 500 \mu$ m, c) Versuch 4.3, $T_{RBT} = 125$ °C, $r_1 = 250 \mu$ m

Exemplarisch für die Versuchsdurchführung im Relativbewegungstest zeigt Bild 43 die Ergebnisse der Laser-Scanning-Mikroskopie. Es werden jeweils drei Kontakte pro Versuch untersucht und die Ergebnisse mittlere arithmetische Höhe der Oberfläche Sa und maximale Höhe der Oberfläche S_z sowie die Verschleiß-Fläche W_a berechnet und anschließend anhand statistischer Tests ausgewertet. Sowohl in den Mikroskopieaufnahmen als auch in der räumlichen Darstellung der geschädigten Fläche sammeln sich hohe Rauheitswerte an einem beziehungsweise an beiden Enden der Kontaktzone an. Zusätzlich sind in der lasermikroskopischen Darstellung Rauheitsspitzen, die in Bild 43 als gelbe Flächen dargestellt sind, zu beobachten. Darüber hinaus lassen sich bei detaillierter Betrachtung der und Mikroskopieaufnahmen erste Ermüdungszungen beginnender Materialübertrag erkennen (siehe Kapitel 3.2.4). Diese Beobachtungen stellen Hinweise auf den Beginn der Ansammlung von Partikeln und damit auf beginnende Schädigungsmechanismen dar. Allerdings befinden sie sich noch in der Frühphase. Erst durch das Einsetzen weiterer Oxidationsvorgänge schreitet die Degradierung der Kontakte voran. Sowohl die Reduzierung der Maximaltemperatur von 125 °C auf 105 °C als auch die Verringerung der Relativbewegung von 500 µm auf 250 µm gehen mit einer geringfügigen Reduzierung der mechanischen Beschädigung der Oberfläche einher. Außerhalb der Kontaktzone (Bild 43 g - i) treten keine Beschädigungen der Oberfläche und somit keine Unterschiede in den Rauheitswerten zwischen den Versuchen auf.



Bild 43: Vergleich der Mikroskopieaufnahmen a), b) und c) sowie der Oberflächenrauheiten der Relativbewegungsversuche 4.1, 4.2 und 4.3, d), e) und f) innerhalb der Kontaktzone sowie g), h) und i) außerhalb der Kontaktzone

Bild 44 stellt die ermittelten Rauheitswerte S_a und S_z sowie die Verschleiß-Fläche W_q der mechanisch induzierten Schädigung in der Kontaktzone für die Relativbewegungstests mit $T_{RBT} = 105$ °C und $T_{RBT} = 125$ °C in Boxplot-Diagrammen dar. Dabei wird sowohl für die *mittlere arithmetische* Höhe S_a (p-Wert = 0,80) als auch die *maximale* Höhe S_z (p-Wert = 0,10) kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Temperaturen ermittelt. Dies gilt ebenfalls für die Verschleiß-Fläche W_q in der Kontaktzone (p-Wert = 0,71). Nur für das Verhältnis V_s von S_z - zu S_a -Werten (p-Wert = 0,03) wird ein signifikanter Unterschied ermittelt. Dies gibt einen Hinweis darauf, dass bei einer Temperatur von $T_{RBT} = 125$ °C mehr Rauheitsspitzen in der Kontaktzone verteilt sind.



Bild 44: Boxplots der maximalen Höhe S_z und der mittleren arithmetischen Höhe S_a der Oberflächen sowie der *Verschleiß-Fläche* W_q , gemittelt anhand von je sechs Kontaktproben der Relativbewegungstests mit $T_{RBT} = 105$ °C und $T_{RBT} = 125$ °C, unter Angabe des Medians x_{med}

Die Rauheitswerte S_a und S_z sowie die *Verschleiß-Fläche* in der Kontaktzone werden in Boxplot-Diagrammen in Bild 45 für die Relativbewegungstests mit einer Relativbewegung von $r_1 = 250 \,\mu\text{m}$ und $r_1 =$ 500 μm abgebildet. Dabei wird ebenfalls für die *mittlere arithmetische Höhe* S_a (p-Wert = 0,58) und *die maximale Höhe* S_z (p-Wert = 0,57) kein signifikanter Unterschied zwischen den Relativbewegungsamplituden festgestellt. Auch für die *Verschleiß-Fläche* W_q (p-Wert = 0,82) sowie für das *Verhältnis V_s* von S_z - zu S_a -Werten (p-Wert = 0,76) unterscheiden sich die Werte nicht signifikant.



Bild 45: Boxplots der *maximalen Höhe* S_z und der *mittleren arithmetischen Höhe* S_a der Oberflächen sowie der Verschleiß-Fläche W_q , gemittelt anhand von je sechs Kontaktproben der Relativbewegungstests mit Relativbewegung $r_1 = 250 \,\mu\text{m}$ und $r_1 = 500 \,\mu\text{m}$, unter Angabe des Medians x_{med}

4.3 Vergleich mit klassischen thermischen Tests

Die Relativbewegungstests haben zum Ziel, konventionelle thermische Tests vereinfacht abzubilden, daher werden im folgenden Kapitel Relativbewegungstests mit regulären Temperaturwechseltests nach DIN EN 60068-2-14 [128] verglichen. Dabei erfolgt die Versuchsdurchführung bei normaler Luftfeuchtigkeit von 45 % ϕ bei einer Raumtemperatur von 21°C und die Gegenüberstellung anhand der statistischen Auswertung der gemessenen Widerstände, der Widerstandsverlaufskategorien sowie der Mikroskopieaufnahmen.

Beim Vergleich der Widerstandsverläufe zwischen Relativbewegungstest und Temperaturwechseltest zeigt sich ein deutlicher Unterschied. Während in den Relativbewegungstest keine Widerstandserhöhungen auftreten (siehe Bild 46 a) steigen die Widerstände während des Temperaturwechseltests stetig an (Bild 46 b). Darüber hinaus tritt ab einer Versuchsdauer von 104 h der erste Ausfall eines Kontakts auf. Insgesamt überschreiten im Temperaturwechseltest sieben von zehn Kontakten das Ausfallkriterium von 2,5 m Ω .



Bild 46: Vergleich der Widerstandsverläufe zwischen a) Relativbewegungstest und b) konventionellen Temperaturwechseltest; je 10 Kontaktpaare; 100 h thermische Auslagerung; bei $T_{tA} = 125$ °C, $T_{RBT} / T_B = 125$ °C

In den Relativbewegungstest mit einer Temperatur von 125 °C treten, wie Bild 47 veranschaulicht, Verläufe der ersten und zweiten Kategorie "konstanter Widerstandsverlauf" und "kontinuierlicher Anstieg" auf. Während der Temperaturwechseltests mit gleicher Temperatur T_B kommt es hingegen auch zu instabilen Widerstandsverläufen der Klasse 3 sowie einer größeren Anzahl an Klasse 2 Verläufen. Daher ergibt sich im Chi-Quadrattest auf Assoziation mit einem p-Wert von 0,04 ein signifikanter Unterschied in der Grundgesamtheit der Widerstandsverlaufsklassen. Dies belegt einen deutlich größeren Einfluss der Temperaturwechseltests auf die auftretenden Widerstandsverlaufsklassen. In den Relativbewegungstests mit mechanisch-induzierter Bewegung der

Kontakte können somit keine vergleichbaren Einflüsse auf das Zeitverhalten der Widerstände bewirkt werden.



Bild 47: Vergleich der Widerstandsverlaufskategorien nach [P5] a) Relativbewegungstest mit $r_1 = 250 \,\mu\text{m}$ b) Temperaturwechselversuch mit $t_h = 2 \,\text{h}$ und $t_u = 2 \,\text{h}$, Temperatur $T_{RBT} / T_B = 125 \,^{\circ}\text{C}$

Auch die statistische Auswertung der maximalen Widerstände der beiden Versuchsarten spiegelt diesen Umstand wieder. Es wird ein signifikanter Unterschied in den Mittelwerten (p-Wert = 0,01) zwischen Relativbewegungs- und Temperaturwechseltest ermittelt. Dies bestätigt, dass die zyklische Temperaturbelastung im Temperaturwechsel wesentlich größere Auswirkungen auf die Widerstände der Steckverbinderkontakte als im Relativbewegungstest hat (siehe Bild 48).



Bild 48: Boxplots der maximalen gemessenen Widerstände R_{max} , gemittelt anhand von je zehn Kontaktproben des Relativbewegungstests mit $T_{max} = 125$ °C und zehn Kontaktproben des Temperaturwechseltests mit $T_{RBT} / T_B = 125$ °C, unter Angabe des Medians x_{med}

Beim Vergleich der Digitalmikroskopieaufnahmen in Bild 49 wird der Unterschied zwischen den Relativbewegungstests und den Temperaturwechseltests ebenfalls deutlich. Auch wenn die geschädigten Zonen in der flächigen Ausdehnung ähnliche Ausprägungen aufweisen, besteht dennoch ein deutlicher Unterschied in Farbe und Beschaffenheit der Oberflächenbeschädigungen. Während die in Relativbewegungstests geprüften Kontakte helle, fast blanke, längliche Beschädigungen aufweisen, zeigen die mit Temperaturwechseln beaufschlagten Kontakte deutlich dunklere Verfärbungen der Kontaktzonen, die rund bis oval geformt sind und von blanken mechanischen Schleifspuren umgeben sind (siehe Bild 49 b). Die stärkere Ausprägung der Beschädigungen der Kontaktzone in den Temperaturwechseltests deutet auf eine fortgeschrittene Oxidation der Kontaktzone hin, die sich auch in den Widerstandsverläufen der Temperaturwechseltests widerspiegelt.



Bild 49: Vergleich der Digitalmikroskopieaufnahmen a) Versuch 4.2, Relativbewegungstest, $T_{RBT} = 125$ °C, $r_1 = 500 \mu m$, b) Versuch 6.1, Temperaturwechseltest, $T_B = 125$ °C, $t_h = 2$ h, $t_u = 2$ h

Bild 50 dargestellten Oberflächenrauheiten der Relativ-Die in bewegungsversuche und Temperaturwechseltests unterscheiden sich deutlich in den Rauheitswerten der maximalen Höhe Sz. Hier liegt der Mittelwert der Relativbewegungsversuche bei 12,7 μ m (σ = 4,5 μ m) und in den Temperaturwechseltests bei 20,8 μ m ($\sigma = 7,7 \mu$ m). Allerdings kann kein deutlicher Unterschied in den Verschleiß-Flächen W_a der Kontaktzonen ermittelt werden. Optisch während der sind Temperaturwechseltests größere Bereiche zu erkennen, in denen es zu Materialübertrag vom Kontaktpartner und zur Auswalzung von Ermüdungszungen und Bildung harter Partikel kommt. Wie Bild 50 d) zeigt, sammeln sich Rauheitsspitzen vor allem am unteren Bereich der Kontaktzone an. Diese Aussage wird auch durch das höhere Verhältnis $V_{\rm s}$ von S_z - zu S_a -Werten (Relativbewegungstest 18,4, $\sigma = 4,8$, Temperaturwechseltest 27,8, $\sigma = 15,1$) unterstützt.



Bild 50: Vergleich der Mikroskopieaufnahmen a) und b) sowie der Oberflächenrauheiten des Relativbewegungstests mit $T_{RBT} = 125$ °C und des Temperaturwechsels mit $T_B = 125$ °C, c) und d) innerhalb der Kontaktzone, e) und f) außerhalb der Kontaktzone

In der statistischen Auswertung der Oberflächenrauheiten schwanken die Werte der *mittleren arithmetischen Höhe* S_a zwar in den Temperaturwechselversuchen stärker, siehe Bild 51, jedoch wird kein signifikanter Unterschied zu den Relativbewegungstests ermittelt. Der in einer einfachen Varianzanalyse (ANOVA) bestimmte p-Wert ergibt sich zu 0,41. Darüber hinaus wird die Annahme aus der optischen Analyse der Mikroskopieaufnahmen bestätigt, dass die *Verschleiß-Flächen* sich nicht signifikant nach Art des Versuches unterscheiden. Jedoch besteht mit einem p-Wert von 0,05, ein signifikanter Unterschied in der *maximalen Höhe* S_z . Auch das Verhältnis V_s von S_z zu S_a ist mit einem p-Wert von 0,07 nur knapp nicht signifikant. Die deutlich höheren S_z -Werte weißen auf eine große Anzahl an Rauheitsspitzen hin. In Kombination mit den unverändert niedrigen S_a -Werten, lässt dies den Schluss zu, dass sich während der Temperaturwechseltests oxidierte Partikel in der Kontaktzone ansammeln. Im Gegensatz dazu fällt die Ansammlung von Partikeln während der Relativbewegungstests geringer aus. Bei dieser Art der Versuche fehlt im Vergleich zu den Temperaturwechseltests das Durchlaufen des Taupunktes, worauf im weiteren Verlauf der Arbeit detaillierter Bezug genommen wird.



Bild 51: Boxplots der maximalen Höhe S_z und der mittleren arithmetischen Höhe S_a der Oberflächen sowie die Verschleiß-Fläche in der Kontaktzone W_q , gemittelt anhand von je sechs Kontaktproben der Relativbewegungstests mit $T_{RBT} = 125$ °C und sechs Kontaktproben der Temperaturwechseltests mit $T_B = 125$ °C, unter Angabe des Medians x_{med}

4.4 Zusammenfassung

Im vorhergehenden Kapitel wurden mittels eines eigens entwickelten Versuchsaufbaus Relativbewegungen Kontaktzone in die von Steckverbinderkontakten eingebracht. Dabei wurde die Bewegung durch einen hochgenauen Linearmotor induziert und die Kontakte einer konstant hohen Temperatur ausgesetzt. Beim Vergleich der Bewegungsamplituden zwischen Relativbewegungstest und Temperaturschocktest konnten vergleichbare Werte in der lateralen Ausprägung erzielt werden. Jedoch konnte weder durch die experimentelle und statistisch abgesicherte Untersuchung des Einflusses der Temperatur noch der Bewegungsamplitude eine signifikante Widerstandserhöhung der Kontakte ausgelöst werden. Der Vergleich mit Temperaturwechseltests, die bei gleicher Maximaltemperatur durchgeführt wurden, belegt zusätzlich, dass Relativbewegungstests nur zu geringfügigen Widerstandserhöhungen führen. Die Temperaturwechseltests weisen bei der Betrachtung der Oberflächenrauheiten ein signifikant höheres Schädigungspotenzial auf. Dies spiegelt sich in signifikant höheren S_z-Werten und einem größeren Verhältnis von Sz- zu Sa-Werten wider, was auf eine verstärkte Ansammlung von Partikeln in der Kontaktzone hinweist.

- Relativbewegungstests zeigen kein Ausfallverhalten.
- Durch mechanisch-induzierte Bewegungen und konstant erhöhte Temperaturen können nicht die gleichen Schädigungsmechanismen wie in regulären thermischen Tests reproduziert werden.
- Als Ursache wird das fehlende Durchschreiten des Taupunkts angesehen.

Zusammenfassend kann im Relativbewegungstest weder ein signifikanter Einfluss der maximalen Temperatur noch ein signifikanter Einfluss der Bewegungsamplitude ermittelt werden. Daher wird im nachfolgenden Kapitel ein weiterer Ansatz verfolgt, bei dem nach einer Analyse des Nutzungsverhaltens realitätsnahe Lastprofile mittels Relativbewegungstest sowie mittels Temperaturwechseltest geprüft werden.

5 Prüfung anwendungsnaher Lastprofile

Damit für die im Feld auftretenden Schädigungsmechanismen relevante Lastkollektive entstehen, müssen die ermittelten quantitativen Umweltbedingungen mit den variierenden Betriebszuständen und dem zugrunde liegenden Nutzungsverhalten kombiniert werden [16]. Hierzu werden im nachfolgenden Kapitel das Pkw-Nutzungsverhalten sowie die über das Jahr veränderlichen thermischen Belastungen auf E/E-Komponenten sowie der Einfluss der Feuchtigkeit analysiert und anschließend in zu testende Lastprofile überführt.

Nach der Beschreibung der grundlegenden Vorgehensweise in Kapitel 5.1 erfolgt eine Analyse des Nutzungsverhaltens europäischer Pkw-FahrerInnen sowie des Einflusses der Luftfeuchtigkeit (Kapitel 5.1.1) sowie die Erstellung der Lastprofile zum Testen in Relativbewegungs- und Temperaturwechseltests (Kapitel 5.1.2). Die Durchführung der Lastwechseltests erfolgt in Kapitel 5.2, woran sich die Auswertung der Widerstandsverläufe im Unterkapitel 5.2.1 anschließt, bevor die Oberflächenrauheiten der Versuche in Kapitel 5.2.2 ausgewertet werden. In Kapitel 5.3 erfolgt ein Vergleich mit regulären Temperaturwechseltests, bevor in 5.4 eine Zusammenfassung der Ergebnisse erfolgt (siehe Bild 52).



Methodik / Zusammenfassung Durchführung Auswertung

Bild 52: Aufbau Kapitel 5 "Prüfung anwendungsnaher Lastprofile" mit Unterteilung in Methodik beziehungsweise Zusammenfassung, Durchführung sowie Auswertung Dieses Kapitel entstand mithilfe folgender studentischer Arbeiten: [S5, S7-S9]

5.1 Methodik zur Erstellung von Lastprofilen

Unternehmensintern definierte Anforderungen, Kundenanforderungen, Erfahrungswerte aus Simulationen und bereits vorhandenen Applikationen im Feld fungieren als Grundlage zur Erstellung von spezifischen Lastprofilen [129]. Dennoch werden bisher hauptsächlich regelmäßige zyklische Temperaturprofile getestet. Um die Möglichkeiten, die an das Nutzungsverhalten angepasste Lastprofile bieten, zu überprüfen, wird im Folgenden das Nutzungsverhalten europäischer Pkw-FahrerInnen auf Basis von Studien analysiert und in Kombination mit Umgebungseinflüssen Lastprofile generiert.

5.1.1 Analyse der Feldbelastung

Um anwendungsnahe Lastprofile (LP) für thermische Qualifizierungstests zu entwickeln, sind sowohl Kenntnisse über die tatsächlich im Kraftfahrzeug auftretenden Temperaturdifferenzen als auch über das Fahrzeugnutzungsverhalten notwendig. Nachfolgend werden daher beide Aspekte analysiert. [P6]

Temperaturdifferenzen im Fahrzeug

In Fahrzeugen treten die größten Temperaturänderungen beim Wechsel vom Ruhe- in den Betriebszustand und umgekehrt auf. Während des Fahrbetriebs und den Standzeiten kommt es zusätzlich zu Temperaturschwankungen durch wechselnde Witterungsbedingungen, Fahrzeugbetriebszustände sowie Fahrstile [130]. [50]

Aufgrund von Erfahrungswerten und Felduntersuchungen lassen sich durchschnittliche Temperaturdifferenzen je Temperaturklasse bestimmen. Diese sind in Tabelle 4 für die in dieser Arbeit relevanten Temperaturklassen aufgetragen. [131]
Einbauort der Komponente	Temperaturklasse	ø Temperaturdifferenz
Fahrgastraum / Elektronikbox	G	34 °C
Motorraum	K	40 °C
Aggregatanbau (z.B. am Motor)	Ο	46 °C
Integration im Aggregat (z.B. im Getriebe)	R	55 °C

Tabelle 4: Klassifizierung der durchschnittlichen Temperaturdifferenzen anhand der Temperaturklassen nach [131]

Jedoch geben die durchschnittlichen Temperaturdifferenzen nicht die real auftretenden Temperaturschwankungen wieder. Der Temperaturverlauf eines Fahrzyklus lässt sich in drei Bereiche einteilen (Bild 53). Nach dem Kaltstart erfolgt im ersten Bereich das Aufheizen von der Umgebungstemperatur auf die Betriebstemperatur. Der anschließende, quasi stationäre Bereich II ist von den bereits genannten Temperaturschwankungen geprägt. Abschließend stellt die Abkühlphase den dritten Bereich dar, welche mit Abstellen des Motors beginnt. [50]



Bild 53: Schematische Darstellung der Temperaturverteilung im Motorraum während eines Fahrzyklus, inklusive der Einteilung in die Bereiche I – III nach [50]

In [50] werden die dargestellten Phasen durch Messungen an unterschiedlichen Positionen im Motorraum verifiziert. Die größten Temperaturdifferenzen von 70 °C bis maximal 120 °C treten am Motorblock und dem Getriebe auf. Die im quasi-stationärem Bereich ermittelten Temperaturschwankungen von circa 30 °C resultieren aus unterschiedlichen Motordrehzahlen und Luftströmen bei verschiedenen Geschwindigkeiten sowie wechselnde Umgebungsbedingungen. [50]

Die Aufheizrate von Minimal- auf Maximaltemperatur ist deutlich größer als bei der Abkühlung auf Minimaltemperatur [130]. Für Einbaupositionen im Motorraum oder im Aggregateanbau ist der quasi-stationäre Bereich nach 10 min – 15 min erreicht. Die Temperaturänderungsgeschwindigkeit liegt während der Fahrt zwischen 3 °C/min und 9 °C/min. Dagegen dauert das Abkühlen des Motors nach Fahrzeugstillstand aufgrund der relativ hohen thermischen Masse des Getriebes und des Motors [130], zwischen 4 h und 6 h. [50]

Einfluss der Feuchtigkeit

Obwohl in dieser Arbeit der Fokus auf thermischen Qualifizierungstests liegt, ist zum Nachvollziehen der auftretenden Schädigungsmechanismen ein grundlegendes Verständnis der Feuchtigkeit sowie der Betauung notwendig. Der Wasseranteil in Luft wird allgemein als Luftfeuchtigkeit bezeichnet. Dabei wird das Verhältnis von *aktuellem Wasserdampfdruck p* zu *Sättigungsdampfdruck p*_d als *relative Luftfeuchtigkeit \varphi* bezeichnet (siehe Gl 5.1). [132]

$$\varphi = \frac{p}{p_d} \qquad \qquad \text{Gl }_{5.1} \text{[132]}$$

Die absolute Luftfeuchtigkeit ρ_W bezeichnet hingegen die *Masse an Wasserdampf* m_D innerhalb eines bestimmten *Gesamtvolumens* V_{Fl} . [132] Daraus ergibt sich die tatsächliche Konzentration an Wasserdampf (siehe Gl 5.2) [16].

$$\rho_W = \frac{m_D}{V_{Fl}} \qquad \qquad \text{Gl } 5.2 \text{ [132]}$$

Der *Wasserdampfpartialdruck* p_W steigt linear mit der zugeführten Wasserdampfmasse bei konstantem Volumen V und konstanter Temperatur T (Gl 5.3). R_W bezeichnet hierbei die Gaskonstante. Die maximal aufnehmbare Wasserdampfmasse m_W ist abhängig vom Sättigungspartialdruck p_{WS} . Wird dieser Höchstwert des Wasserdampfpartialdruckes überschritten, tritt Kondensatbildung auf. [133]

$$p_W = \frac{m_W \cdot R_W \cdot T}{V} \qquad \qquad \text{Gl}_{5.3} \text{ [133]}$$

Wird bei konstanter Temperatur T einem Volumen V Wasserdampf zugeführt (siehe Bild 54 a), steigt der Partialdruck des Wasserdampfs p_W bis der Sättigungsdruck p_S erreicht ist. Hierbei beträgt die relative Luftfeuchte $\varphi = 1$, was zu beginnender Kondensatbildung führt.

Wird im Gegensatz dazu bei konstantem Druck die Temperatur ungesättigter feuchter Luft ($\varphi < 1$) verringert, endet die Zustandsänderung auf der Dampfdruckkurve im p,T-Diagramm ($\varphi = 1$) und es beginnt ebenfalls Kondensation mit der Ausscheidung von Wasser (siehe Bild 54 b). Dieser Punkt wird als Taupunkt bezeichnet. [133]



Bild 54: p.T-Diagramm von Wasser mit Triplepunkt und Taupunkt sowie Phasenbereiche nach [133]

Auf Festkörpern kondensiert Wasser aufgrund der geringeren Oberflächenspannung vorwiegend auf rauen oder verunreinigten Oberflächen. Diese Kondensationszentren bilden ebenfalls die Basis zur Bildung von Wassertröpfchen bei jeder weiteren Betauung. Diese beginnt anschließend bereits oberhalb des Taupunkts. [16, 134, 135]

Darüber hinaus kann Elektrolytbildung auch bei ungesättigter Luft, das heißt oberhalb des Taupunktes einsetzen, wenn Wasser an Metalloberflächen kondensiert, die niedrigere Temperaturen als ihre Umgebung aufweisen. Dies kann ebenfalls durch die Erhöhung des Taupunktes ausgelöst von Verunreinigungen der Luft oder der Metalloberfläche, das Auftreten von dicken Wasserabsorptionsschichten welche selbst als Elektrolyt wirken oder bei direktem Niederschlag eintreten. [136–139]

Bild 55 veranschaulicht die Belastung von Fahrzeugen durch die im jahreszeitlichen Verlauf auftretenden unterschiedlichen *Luftfeuchtig-keitsklassen*. Dabei wird eine Einteilung nach klimatischen Gegebenheiten und Ländern in Kaltland (z. B. Deutschland), Feucht- / Warmland (z. B. Philippinen) sowie Heißland (z. B. Australien) getroffen. [16] Dabei zeigt sich, dass in Kaltländern bereits normale Luftfeuchtigkeitsklassen zwischen $\varphi = 35\%$ und $\varphi = 55\%$ mit circa 25% Anteil an der Gesamthäufigkeit einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf die Belastung von Automobilen haben. Zusätzlich werden in diesem Bereich reguläre thermische Tests durchgeführt.



Warmland sowie Heißland nach [16]

Darüber hinaus werden in [16] die Auswirkungen von Feuchtigkeit auf E/E-Komponenten analysiert. Hierbei treten bei Feucht-Wärme-Tests vor allem elektrochemische Korrosion sowie Korrosionsmigration auf. Letzteres wird vor allem bei metallischen Oberflächenpassivierungen beobachtet. Des Weiteren wird der Aufwärm- und Umlagerungsvorgang eines bei niedrigen Temperaturen gelagerten Fahrzeugs als kritisch für eine mögliche Betauung identifiziert. Hierbei stellt vor allem der Temperaturgradient der Erwärmung ein entscheidendes Kriterium zur Beurteilung der Belastungshöhe dar. [16]

Pkw-Nutzungsverhalten

AutofahrerInnen in Deutschland legen durchschnittlich zwei Strecken pro Tag von insgesamt 30 km bei einer Fahrtzeit von 46 min mit dem Auto zurück (siehe Tabelle 5). Damit wird ein Pkw durchschnittlich nur 3 % eines Tages genutzt. Auch im europäischen Vergleich werden Fahrzeuge am häufigsten zwei Mal pro Tag bewegt [140]. Dabei besitzt Polen mit 53 % der Fahrten den geringsten Anteil an zwei täglichen Ausfahrten [140]. [141]

Kenngröße	Durchschnittliche Ausprägung
Anteil an Pkw-Fahrten am Stichtag	59 %
Durchschnitt tägliche Fahrten	1,9
Mittlere tägliche Fahrtstrecke	30 km
Mittlere tägliche Betriebszeit	46 min
Aktive Parkdauer	6 h
Inaktive Standzeit	16 h

Tabelle 5: Mittelwerte der Kenngrößen der Pkw-Nutzung in Deutschland nach [130, 140]

Aufgrund der relativ kurzen täglichen Betriebszeit kommt der Standzeit, die in aktives Parken und inaktive Standzeit unterteilt werden kann, eine wichtige Bedeutung im Pkw-Nutzungsverhalten zu. Aktives Parken bezeichnet dabei die Standzeit nach einer Ausfahrt als Vorbereitung für eine Aktivität wie Arbeiten, Einkaufen oder Freizeitaktivitäten. Analog dazu umfasst die inaktive Standzeit das Abstellen des Fahrzeugs nach der letzten Fahrt des Tages und der Beendigung der Aktivitäten (siehe Bild 56). Die Parkzeit zwischen den beiden Ausfahrten beträgt im europäischen Vergleich circa 6 h ohne relevante Unterschiede zwischen den Ländern. Dahingegen beträgt die inaktive Standzeit mehr als 16 h. An den Wochenendtagen fällt die inaktive Standzeit noch größer aus. Dies ist auf eine verringerte aktive Parkzeit bei im Mittel gleichbleibender Fahrzeit zurückzuführen. An Wochenenden werden weniger Pendlerfahrten zurückgelegt, bei denen viele Stunden zwischen den beiden Ausfahrten liegen. [140]



Bild 56: Schematische Darstellung des Temperaturprofils im Motorraum auf Basis des täglichen Nutzungsverhaltens europäischer Pkw-Fahrer nach [140]

5.1.2 Erstellung von Lastprofilen

Basierend auf den je nach Einbauort vorherrschenden Temperaturdifferenzen und dem Nutzverhalten europäischer Pkw-FahrerInnen werden drei *Lastprofile* für den Relativbewegungstest (RB-Lastprofiltest), der auf mechanischem Induzieren der Bewegungen beruht, erstellt. Aufgrund der aus Kapitel 4 bekannten geringen Auswirkungen der Relativbewegungstests auf das Widerstandsverhalten wird zusätzlich ein *Lastprofil* auf Basis von Temperaturzyklen (TW-Lastprofiltest) generiert. [P6]

A.1 Jahreszeitlicher Verlauf

Das Relativbewegungs-Lastprofil A.1 "jahreszeitlicher Verlauf" bildet die maximal auftretenden Temperaturdifferenzen (70 °C – 120 °C) im Motorraum zwischen Ruhe- und Betriebszustand im jährlichen saisonbedingten Verlauf ab. Aufgrund niedrigerer Außentemperaturen im Winter treten während des Betriebs größere Temperaturdifferenzen als im Sommer auf. Die größeren Temperaturänderungen werden, analog zu den in Kapitel 4.2 berechneten und im Versuch ermittelten Relativbewegungen, in größere Bewegungen r_1 und die kleineren Differenzen in kleinere Bewegungen r_2 übertragen (siehe Bild 57). [P6]



Bild 57: Relativbewegungs-Zeit-Verlauf des Relativbewegungs-Lastprofils A.1 "jahreszeitlicher Verlauf" mit oberer und unterer Haltezeit t_1 und t_2 sowie Relativbewegung 1 r_1 und Relativbewegung 2 r_2 nach [P6]

A.2 Tägliche Nutzung

Das Relativbewegungs-Lastprofil A.2 "tägliche Nutzung" kombiniert die Kenntnisse über die durchschnittliche tägliche Pkw-Nutzung mit den maximal auftretenden Temperaturdifferenzen zwischen Ruhe- und Betriebszustand im Motorraum, siehe Bild 58. Der Relativbewegungs-Zeit-Verlauf ist durch zwei große Bewegungen r_3 gekennzeichnet, welche die zwei Ausfahrten des Tages widerspiegeln. Die Abkühlung während des aktiven Parkens wird durch die rückwärtsgerichtete Bewegung r_4 dargestellt. Nach der zweiten Ausfahrt des Tages schließt sich die Zeit des inaktiven Parkens t_4 an, bei dem das Fahrzeug wieder vollständig auf Umgebungstemperatur abkühlt.



Bild 58: Relativbewegungs-Zeit-Verlauf des Relativbewegungs-Lastprofils A.2 "täglicher Verlauf" mit oberer und unterer Haltezeit t_3 und t_4 sowie Relativbewegung 3 r_3 und Relativbewegung 4 r_4

A.3 Kombinierter Verlauf

Das Relativbewegungs-Lastprofil A.3 "kombinierter Verlauf", in Bild 59 dargestellt, besteht aus einer Kombination der Lastprofile A.1 "jahreszeitlicher Verlauf" und A.2 "tägliche Nutzung". Die erste Bewegung r_5 entspricht dem Temperaturzyklus von Fahrzeugstart bis zum Erreichen der Betriebstemperatur und umfasst die erste Fahrt des Tages inklusive der sich anschließenden Haltezeit. Anschließend wird die Abkühlung des Motors nach Abstellen des Fahrzeugs durch einen Reibweg in entgegengesetzter Richtung r_6 widergespiegelt. Diese Bewegung wird mit halbierter Amplitude durchgeführt, da der Motor aufgrund der langen Abkühldauer nicht das Umgebungstemperaturniveau erreicht. Anschließend folgt die zweite Fahrt des Tages ebenfalls mit halbem Reibweg und die vollständige Abkühlung des Fahrzeugs auf Umgebungsniveau. Wodurch die Kontakte durch eine Relativbewegung von $-r_5$ wieder in ihre Ausgangsposition gebracht werden. Zusätzlich berücksichtigt Lastprofil A.3 ebenfalls die jahreszeitliche Änderung der Bewegungsamplituden. Daher werden nach sechs Zyklen die Amplituden halbiert und die Bewegungen mit r_7 , respektive r_8 , durchgeführt. [P6]



Bild 59: Relativbewegungs-Zeit-Verlauf des Relativbewegungs-Lastprofils A.3 "kombinierter Verlauf" mit oberer und unterer Haltezeit t_5 und t_6 sowie Relativbewegungen r_5 , r_6 , r_7 , r_8 nach [P6]

B.1 Kombinierter Verlauf Tw

Da in Kapitel 4 die Durchführung der Relativbewegungstests in keiner signifikanten Widerstandserhöhung resultiert, wird neben den Relativbewegungs-Lastprofilen A.1 bis A.3, ebenfalls ein auf thermischen Zyklen beruhendes Lastprofil erstellt. Hierbei werden die Relativbewegungen aus RB-Lastprofil A.3 zurück in Temperatur-änderungen transferiert. Dies resultiert in dem in Bild 60 dargestellten Temperatur-Zeit-Verlauf. Nach einer Abkühlung auf die *Minimaltemperatur* T_A beginnt die erste Ausfahrt des Tages und damit eine Erwärmung auf T_{B1} . Der Beginn der aktiven Parkzeit und die damit verbundene Abkühlung entspricht der Temperaturänderung auf die *mittlere Temperatur* T_{B2} . Analog zum Relativbewegungs-Lastprofil A.3 werden die Temperaturzyklen nach sechs Wiederholungen halbiert, wodurch die neue *Maximaltemperatur* T_{C1} und die neue *mittlere Temperatur* T_{C2} erreicht werden (Bild 60). [P6]



Bild 60: Temperatur-Zeit-Verlauf des Lastprofils B.1 "kombinierter Verlauf Tw" mit oberer und unterer Haltezeit t_7 und t_8 sowie Temperaturen T_{B1} , T_{B2} , T_{C1} , T_{C2} mit Temperaturänderungsgeschwindigkeit v_t nach [P6]

Jeder Aufheizvorgang von der *Minimaltemperatur* T_A erfolgt dabei mit der *Temperaturänderungsgeschwindigkeit* v_t und entspricht einer in [139] entwickelten Temperaturrampe. Hierbei ist vor allem die *Temperaturänderungsgeschwindigkeit* von Bedeutung für das Auftreten von Betauung auf den Bauteilen [139].

5.2 Durchführung von Lastprofiltests

Für die Durchführung der anwendungsorientierten Relativbewegungs-Lastprofiltests A.1 bis A.3 wird der in Kapitel 4.1 entwickelte Prüfstand genutzt. Drüber hinaus wird das auf thermischen Zyklen beruhende Lastprofil B.1 in einem Klimaschrank getestet. Anschließend erfolgt die Auswertung der Widerstandsverläufe sowie der Oberflächenrauheiten analog zu den in den Kapiteln 4.2.1 und 4.2.2 vorgestellten methodischen Vorgehensweisen.

5.2.1 Auswertung der Widerstandsverläufe

Bild 61 stellt die Widerstandsverläufe der Versuchsdurchführungen 5.1 sowie 5.2 gegenüber. Der durchschnittliche Anfangswiderstandswert in Versuch 5.1 liegt bei 2,4 m Ω ($\sigma = 0,1$ m Ω). Die Kontakte des Versuchs 5.2 mit RB-Lastprofil A.2 "täglicher Verlauf" besitzen von Beginn an mit einem Mittelwert von 3,0 m Ω höhere Widerstandswerte ($\sigma = 0,3$ m Ω). Dies ist auf die Streuung der Anfangswiderstände der einzelnen Kontakte sowie die Qualität der Lötstellen an den Messpunkten zurückzuführen. Davon abgesehen, verhalten sich die Durchgangswiderstände in beiden Versuchen über die gesamte Versuchsdauer konstant, wodurch es zu keiner Überschreitung des Ausfallkriteriums in Form einer Widerstandserhöhung von 2,5 $m\Omega$ kommt (siehe Bild 61).



Bild 61: Vergleichende Betrachtung der Widerstandsverläufe für a) RB-Lastprofil A.1 "jahreszeitlicher Verlauf" und b) A.2 "tägliche Nutzung"; je 10 Kontaktpaare; 100 h thermische Auslagerung; bei $T_{tA} = 125$ °C; $T_{RBT} = 125$ °C; Relativbewegungen: $r_1 = 500 \ \mu\text{m}; r_2 = 250 \ \mu\text{m}; r_3 = 500 \ \mu\text{m}; r_4 = 250 \ \mu\text{m};$ Haltezeit: $t_{1/2} = 0.5 \ \text{h}, t_3 = 0.25 \ \text{h}; t_4 = 0.5 \ \text{h}; v = 0.840 \ \mu\text{m/s}$

Der Anfangswiderstand der mit RB-Lastprofil A.3 "kombinierter Verlauf" getesteten Kontakte beträgt 2,4 m Ω (σ = 0,2 m Ω). Der Mittelwert der maximalen Widerstände liegt mit 2,7 m Ω (σ = 0,2 m Ω) auf einem ähnlichen Niveau wie die Anfangswiderstände. Während der Versuchsdurchführung zeigen die Kontakte ebenfalls konstante Verläufe sowie keine relevanten Widerstandserhöhungen und somit keinen Ausfall (siehe Bild 62).



Bild 62: Widerstandsverläufe für RB-Lastprofil A.3 "kombinierter Verlauf", 100 h thermische Auslagerung 100 h thermische Auslagerung; bei $T_{tA} = 125$ °C; $T_{RBT} = 125$ °C; Relativbewegungen: $r_5 = 500 \ \mu\text{m}$; $r_6 = 250 \ \mu\text{m}$; $r_7 = 250 \ \mu\text{m}$; $r_8 = 125 \ \mu\text{m}$; Haltezeit: $t_5 = 0.5 \ \text{h}$, $t_6 = 0.25 \ \text{h}$; $v = 0.840 \ \mu\text{m/s}$ nach [P6]

Beim Vergleich der Widerstandsverlaufskategorien nach [P5] treten nur Verläufe der Klassen 1 "konstanter Verlauf" und 2 "kontinuierlicher Anstieg" auf (siehe Bild 63). Im Chi-Quadrat-Test wird ein p-Wert von 0,53 ermittelt. Somit besteht kein signifikanter Unterschied in der Grundgesamtheit der Versuche mit den verschiedenen Relativbewegungs-Lastprofilen. Hieraus resultiert, dass die in Relativbewegungstests geprüften Lastprofile keinen Einfluss auf die ermittelten Widerstandsverlaufsklassen besitzen.





Aufgrund der statistischen Signifikanz der Unterschiede in den Anfangsdie widerstandswerten wird mittlere Differenz zwischen den Anfangswiderständen und maximalen Widerständen der Lastprofile verglichen (siehe Bild 64). Die statistische Analyse der drei Lastprofiltests resultiert mit einem p-Wert von 0,10 in keinem signifikanten Unterschied in den Mittelwerten. Dennoch ist anzumerken, dass die Widerstandswerte in Versuch 1.2 mit einer Standardabweichung σ von 0,35 eine erhöhte Streuung aufweisen. Die unterschiedlichen Lastprofile im Relativbewegungstest "jahreszeitlicher Verlauf", "tägliche Nutzung" sowie "kombinierter Verlauf" haben insgesamt jedoch keinen Einfluss auf das Widerstands- sowie Ausfallverhalten der Steckverbinderkontakte.



Bild 64: Boxplots der maximalen Widerstandsänderung ΔR der Lastprofil-Versuche mit den RB-Lastprofilen A.1 "jahreszeitlicher Verlauf", A.2 "tägliche Nutzung" und A.3 "kombinierter Verlauf", bei $T_{RBT} = 125$ °C, mit Angabe des Medians x_{med}

Lastprofiltests auf Basis von Temperaturwechseln

Analog zu den Ergebnissen aus Kapitel 4, zeigt sich beim Testen der Lastprofile im Relativbewegungstest ebenfalls kein signifikanter Einfluss auf die Stabilität der Steckverbinderkontakte. Um dennoch die vielversprechende Methodik der Lastprofiltests weiterzuverfolgen, wird das in Kapitel 5.1.2 erstellte, kombinierte Profil auf Basis von thermischen Zyklen durchgeführt und ausgewertet. Um die prinzipielle Wirksamkeit des Profils B.1 zu testen, werden ein Relativbewegungstest und ein Temperaturwechseltest mit jeweils zwei Zyklen und einer Dauer von 80 h getestet (Bild 65). Die Anfangswiderstandswerte betragen im Mittel 2,5 m Ω $(\sigma = 0.1 \text{ m}\Omega)$ für Versuch 5.4 und 2.1 m Ω ($\sigma = 0.2 \text{ m}\Omega$) für Versuch 5.6. Über die gesamte Versuchsdauer ist im TW-Lastprofiltest ein deutlicher Anstieg der Widerstandswerte zu beobachten, siehe Bild 65 b). Es wird ebenfalls die mittlere Differenz zwischen den maximalen Widerständen und den Anfangswerten verglichen, da ein signifikanter Unterschied in den Anfangswiderstandswerten besteht. Dies resultiert mit einem p-Wert von 0.00 in einem signifikanten Unterschied zwischen den Versuchsdurchführungsarten. [P6]



Bild 65: Vergleichende Betrachtung der Widerstandsverläufe für a) RB-Lastprofil A.3 "kombinierter Verlauf" und b) TW-Lastprofil B.1 " kombinierter Verlauf TW"; je 10 Kontaktpaare; 100 h thermische Auslagerung; bei $T_{tA} = 125$ °C, $N_V = 2$, $t_V = 80$ h mit $T_{RBT} / T_{B1} = 125$ °C nach [P6]

Aufgrund des deutlich gesteigerten Effekts des Lastprofils B.1 bei der Induktion von Widerstandserhöhungen wird eine weitere Versuchsreihe mit einer erhöhten Versuchsdauer von 400 h durchgeführt. Die Versuchsreihe mit verlängerter Dauer zeigt ebenfalls die Wirksamkeit des Lastprofils auf Basis von thermischen Zyklen, siehe Bild 66 b). Alle getesteten Kontakte des Versuchs 5.7 überschreiten die Ausfallgrenze von 2,5 m Ω . Dabei tritt der erste Ausfall bereits nach 47 h auf. Der Mittelwert der Lebensdauer λ_h liegt bei dem Versuch mit Temperaturwechsel-Lastprofil bei 151 h.



Bild 66: Vergleichende Betrachtung der Widerstandsverläufe für a) RB-Lastprofil A.3 "kombinierter Verlauf" und b) TW-Lastprofil B.1 " kombinierter Verlauf Tw"; je 10 Kontaktpaare; 100 h thermische Auslagerung; bei $T_{tA} = 125$ °C, $N_V = 10$, $t_V = 400$ h mit $T_{RBT} / T_{B1} = 125$ °C

Auch bei der Analyse der Widerstandsverlaufskategorien lässt sich ein deutlicher Unterschied zu den Relativbewegungstests mit kombiniertem Lastprofil erkennen, siehe Bild 67. Bereits bei einer Versuchsdauer von 80 h treten vermehrt Kategorie 2 "kontinuierlicher Anstieg" Verläufe auf (Chi-Quadrat-Test mit p-Wert = 0,03). Analog ergibt sich für die mit einer Kontakte Versuchsdauer von 400 h getesteten ein signifikanter Unterschied (p-Wert = 0.00)in den ermittelten Widerstandsverlaufskategorien. Es findet ein Wechsel hin zu irregulären und instabilen Kategorie 3 Verläufen statt. Dies geht im Allgemeinen mit einer Veränderung im dominierenden Schädigungsmechanismus einher [P5].





Bei der statistischen Auswertung der Widerstandsdifferenzen zwischen Maximalwert und Anfangswert der Lastprofilversuche mit kombiniertem Profil kann ebenfalls ein signifikanter Unterschied zwischen der Versuchsdurchführung im Relativbewegungstest und den auf thermischen Zyklen basierenden Versuchen ermittelt werden. Wie Bild 68 veranschaulicht. treten mit Temperaturwechsel-Lastprofilen mit einem Mittelwert von 18,0 mΩ deutlich größere Widerstandsdifferenzen und eine wesentlich höhere Streuung auf $(\sigma = 4.8 \text{ m}\Omega).$ Die einfache Varianzanalyse bestätigt dies mit einem p-Wert von 0,00.



Bild 68: Boxplots der maximalen Widerstandsänderung ΔR der Lastprofil-Versuche mit den Lastprofilen A.3 "kombinierter Verlauf" und Lastprofilen B.1 "kombiniert Temperaturwechsel", bei $T_{RBT} / T_{B1} = 125$ °C, mit Angabe des Medians x_{med}

Einfluss des Taupunktes

Wie in Kapitel 4 beschrieben, wird für die ausbleibende Schädigungswirkung der Relativbewegungstests die konstant hohe Temperatur und damit das Ausbleiben des Niederschlags von Feuchtigkeit in der Kontaktzone verantwortlich gemacht. Im Gegensatz wird bei auf thermischen Zyklen beruhenden Tests durch das Durchschreiten des Taupunkts Feuchtigkeit in die Kontakte eingebracht. Zur Verifikation dieser These wurden einzelne Kontakte mit Thermoelementen ausgestattet, um das Aufheiz- und Abkühlverhalten der Steckverbinderkontakte während der Temperaturwechsel-Lastprofiltests B.1 nachvollziehen zu können. Zusätzlich wurde die relative Luftfeuchte bei der Versuchsdurchführung gemessen. Da bei der Durchführung rein thermischer Tests laut DIN EN 60068-2-14 [128] nur ein Grenzwert für die maximale Wassermenge angegeben wird, werden die Tests mit derselben anfänglichen relativen Luftfeuchtigkeit durchgeführt wie die umgebende Raumluft. Nach [139] sind je nach *Temperaturänderungsgeschwindigkeit* bereits Luftfeuchtigkeitswerte von $\varphi \ge 55\%$ als kritisch zu bewerten. Darüber hinaus ist bei Temperaturen unter 10 °C eine Regelung der Luftfeuchtigkeit nicht möglich [16].

Analog zu dem in Kapitel 5.1.1 aufgeführtem Einfluss der *Luftfeuchtigkeit*, besteht die Grundvoraussetzung für die Bildung von Feuchtigkeit in einer niedrigeren Temperatur der metallischen Kontaktoberflächen im Vergleich zu ihrer Umgebung [139, 136]. Darüber hinaus sind die Kontaktoberflächen nicht vollständig blank wie die Voruntersuchungen aus Kapitel o zeigen. Somit können mikroskopische Verunreinigungen als Kondensationszentren dienen an denen sich erste Wassertropfen bilden [16, 135].

In Bild 69 werden die Temperaturverläufe der Klimakammer und eines Einzelkontakts gegenüber gestellt. Dabei existieren sowohl in der Aufheizals auch in der Abkühlphase Temperaturunterschiede. Entscheidend für die Abscheidung von Feuchtigkeit in der Kontaktzone ist dabei die Aufheizphase, da hier der Kontakt eine geringere Temperatur als die Umgebungsluft besitzt. Bei längerer Versuchsdauer zeigt sich, dass vor allem in den Bereichen des Taupunktes Widerstandsschwankungen auftreten, was mit der Theorie der Kondensationszentren übereinstimmt. Dies dient als Beleg dafür, dass das höhere Schädigungspotenzial der Temperaturwechselversuche auf das Durchschreiten des Taupunktes und der damit einhergehenden Kondensation von Feuchtigkeit in der Kontaktzone zurückzuführen ist. Als zusätzlicher Beleg werden Videoaufnahmen während der Versuchsdurchführung angefertigt. Darauf ist eine eindeutige Reif- und anschließende Tropfenbildung auf und um die Kontakte zu erkennen.



Bild 69: Vergleich der Temperaturverläufe von Klimakammer und einem einzelnen Steckkontakt, zusätzlich ist der Taupunkt eingezeichnet

5.2.2 Auswertung der Rauheitsprofile

Die Auswertung der Oberflächen-Rauheitsprofile der Lastprofiltests wird analog zu der in Kapitel 4.2.2 beschriebenen Systematik durchgeführt. Neben dem Vergleich der Digitalmikroskopieaufnahmen liegt der Fokus vor allem auf der Analyse der mittels Laserscanning-Mikroskopie ermittelten Rauheitswerte. Bild 70 gibt eine Übersicht über die in Relativbewegungstests mittels Lastprofilen getesteten Kontakte. Auf allen Aufnahmen werden geringfügige Beschädigungen in den Kontaktzonen festgestellt, allerdings sind diese flächig gering ausgeprägt. Darüber hinaus werden keine dunklen Verfärbungen der Kontaktzonen, die auf Oxidationsvorgänge hinweisen, ermittelt.



Bild 70: Vergleich der Digitalmikroskopieaufnahmen a) Versuch 5.1, RB-LP A.1 "jahreszeitlicher Verlauf", b) Versuch 5.2, RB-LP A.2 "tägliche Nutzung", c) Versuch 5.3, RB-LP A.3 "kombinierter Verlauf", bei jeweils $T_{RBT} = 125$ °C

Die in Bild 71 a bis c dargestellten Mikroskopieaufnahmen weisen keine Unterschiede bezüglich der Ausprägung und Größe der beschädigten Flächen auf. Auch die berechneten Oberflächenplots zeigen nur geringe Unterschiede in ihrer Form (Bild 71 e – g). Jedoch sammeln sich in allen drei Versuchen Rauheitsspitzen am oberen und unteren Rand der Kontaktzone an. Die Oberflächen außerhalb der Kontaktzone der drei betrachteten Kontakte unterscheiden sich nur marginal, siehe Bild 71 i bis k. Zusätzlich verändert sich das Verhältnis von S_z - zu S_a -Werten bei den im Relativbewegungstest durchgeführten Lastprofilen nur geringfügig.



Bild 71: Vergleich der Mikroskopieaufnahmen a) bis c) sowie Oberflächenrauheiten der Lastprofiltests 5.1, 5.2 und 5.3, mit RB-Lastprofilen A.1 "jahreszeitlich", A.2 "täglich" sowie A.3 "kombiniert", e) – g) Innerhalb der Kontaktzone, i) – k) außerhalb der Kontaktzone

Bei der statistischen Analyse ergibt sich in der einfachen Varianzanalyse (ANOVA) mit einem p-Wert von 0,81 kein Unterschied in den S_a -Werten. Die größte Streuung tritt bei den Kontakten, die mittels Lastprofil A.1 "jahreszeitlicher Verlauf" getestet werden, auf. Die Analyse der S_z -Werte resultiert zwar in einer größeren Streuung und damit auch in einem größeren Maximalwert für das kombinierte Lastprofil A.3, allerdings besteht ebenfalls kein signifikanter Unterschied in den Mittelwerten zu den anderen Lastprofiltests (p-Wert 0,93), siehe Bild 72.



Bild 72: Boxplots der maximalen Höhe S_z und der mittleren arithmetischen Höhe S_a der Oberflächen, gemittelt anhand von drei Kontaktproben der Relativbewegungstests mit den RB-Lastprofilen A.1 "jahreszeitlich", A.2 "täglich" sowie A.3 "kombiniert", unter Angabe des Medians x_{med}

Im Gegensatz zu den Mikroskopieaufnahmen der Lastprofile im Relativbewegungstest werden bei den auf thermischen Zyklen basierenden Lastprofiltests große Unterschiede deutlich. Die mittels Temperaturwechseln getesteten Kontakte ergeben stark ausgeprägte, längliche, dunkel verfärbte Kontaktzonen (siehe Bild 73 b).



Bild 73: Vergleich der Digitalmikroskopieaufnahmen a) Versuch 5.5, RB-LP A.3 "kombinierter Verlauf", b) Versuch 5.7, TW-LP A.3 "kombiniert TW", bei $T_{\rm RBT} / T_{\rm B1} = 125$ °C

Bei der Analyse der Laser-Scanning-Mikroskopieaufnahmen werden Rauheitsspitzen vor allem am unteren Ende sowie verteilt innerhalb der Kontaktzone ermittelt (Bild 74 c und d sowie Bild 75 c und d). Zusätzlich ist in der Kontaktzone ein durch die zahlreichen Temperaturwechsel verursachter welliger Materialabtrag mit deutlichen Auswalzungen zu erkennen. Die unbeschädigten Bereiche außerhalb der Kontaktzone weißen erneut vergleichbar niedrige Rauheitswerte auf (Bild 74 e und f sowie Bild 75 e und f). Die deutlich erhöhte Versuchsdauer von 400 h resultiert für beide Arten der Versuchsdurchführung in keiner erkennbaren Erhöhung der Rauheitswerte. Davon abgesehen erhöht sich das Verhältnis V_S von S_z - zu S_a -Werten, was auf eine größere Anzahl an in der Kontaktzone dispergierten Partikeln hinweist.



Bild 74: Vergleich der Mikroskopieaufnahmen a) und b) sowie Oberflächenrauheiten der Lastprofiltests 5.4 und 5.6 mit RB-Lastprofil A.3 "kombiniert", sowie TW-Lastprofil B.1 "kombiniert Tw" c) und d) Innerhalb der Kontaktzone, e) und f) außerhalb der Kontaktzone, mit $t_e = 80 h$



Bild 75: Vergleich der Mikroskopieaufnahmen a) und b) sowie Oberflächenrauheiten der Lastprofiltests 5.5 und 5.7 mit RB-Lastprofil A.3 "kombiniert", sowie TW-Lastprofil B.1 "kombiniert Tw" c) und d) Innerhalb der Kontaktzone, e) und f) außerhalb der Kontaktzone, mit $t_e = 400 h$

Durch die Änderung der Testart und damit der Belastung von Relativbewegungen auf Temperaturwechsel erfolgt eine signifikante Erhöhung der S_z -Werte (p-Wert 0,04). Am dennoch relativ geringen S_a -Wert des Versuchs mit einer Dauer von 400 h kann das Abtragen von Rauheitsspitzen während der langen Versuchsdauer beobachtet werden (siehe Bild 76 a). Zusätzlich bestätigt der mit einem p-Wert von 0,00 signifikante Unterschied in den gemittelten Größen der durch die Versuche beschädigten Flächen (Bild 76 b) die in Bild 74 und Bild 75 ermittelten Unterschiede in der flächigen Ausdehnung der Beschädigungen. Insgesamt sind anhand der Oberflächenprofile die unterschiedlichen Phasen während des in Kapitel 3.2.4 beschriebenen Reibkorrosionsvorgangs zu erkennen. Bei den mittels Relativbewegungstest geprüften Kontakten bilden sich jeweils am oberen und unteren Ende der Kontaktzone Rauheitsspitzen aus. Dies entspricht einem frühen Stadium der *Reibkorrosion* und korreliert mit den niedrigen Widerstandswerten während der Versuchsdurchführung. Bei Kontakten, die thermischen Zyklen während der Lastprofilprüfung ausgesetzt sind, treten Materialanhäufung am unteren Ende der geschädigten Zone auf. In der Kontaktzone ist jedoch eine Vielzahl von Partikeln dispergiert. Dies lässt auf ein weit fortgeschrittenes Stadium der *Reibkorrosion* schließen, in welchem eine starke Widerstandserhöhung aufgrund von zwischen den Kontaktpartnern angesammelten oxidierten Partikeln auftritt.



Bild 76: Boxplots der maximalen Höhe S_z und der mittleren arithmetischen Höhe S_a der Oberflächen sowie der Verschleiß-Fläche W_q , gemittelt anhand von drei Kontaktproben der RB-Lastprofiltests 5.4 und 5.5 (Lastprofil A.3 "kombiniert") sowie der Lastprofiltests im Temperaturwechsel 5.6 und 5.7 (Lastprofil B.1 "kombiniert TW")

5.3 Vergleich zwischen Lastprofiltests und Temperaturwechseltests

Zur Beurteilung der Wirksamkeit des auf thermischen Zyklen beruhenden Lastprofils, werden sowohl die Widerstandswerte als auch die Oberflächenrauheiten mit konventionellen Temperaturwechseltests verglichen. Dabei wird das systematische Vorgehen aus Kapitel 4 angewandt.

Vergleich der Widerstandswerte

In Bild 77 wird ein konventioneller Temperaturwechseltest mit einer Zyklusdauer von 8 h bei einer maximalen Temperatur T_B von 125 °C mit dem auf Temperaturwechseln beruhenden Lastprofil B.1 gegenüber gestellt. Im Lastprofiltest treten kritische Widerstandserhöhungen mit einer Lebensdauer von circa 47 h wesentlich früher auf als im klassischen Temperaturwechseltest. Hier fallen die ersten Kontakte nach 104 h aus, siehe Bild 77 a). Darüber hinaus treten ebenfalls größere und irregulärere Widerstandserhöhungen auf.



Bild 77: Vergleich der Widerstandsverläufe zwischen a) konventionellem TW-Test und b) TW-Test mit Lastprofil B.1 "kombinierter Verlauf Tw"; je 10 Kontaktpaare; 100 h thermische Auslagerung; bei $T_{tA} = 125$ °C, $t_{tA} = 100$ h

Dies wird auch durch die Analyse der Widerstandsverlaufsklassen bestätigt. Bei dem auf thermischen Zyklen beruhenden Lastprofiltest tritt eine höhere Anzahl an instabilen Widerstandsverläufen der Klasse 3 auf (Bild 78). Im Chi-Quadrat-Test ergibt sich mit einem p-Wert von 0,02 ein signifikanter Unterschied in der Grundgesamtheit zwischen den Temperaturwechsel- und den Lastprofiltests und damit ein deutlicher Einfluss des stärker variierenden thermischen Lastprofils auf die Stabilität der Widerstandsverläufe.



Bild 78: Vergleich der Widerstandsverlaufskategorien nach [P5] a) Versuch 6.1 konventioneller Temperaturwechsel, b) Versuch 5.7 mit Lastprofil B.1 "kombinierter Verlauf Tw"

Bei der statistischen Analyse der beiden Versuchsarten, können die maximalen Widerstandswerte miteinander verglichen werden, da keine signifikanten Unterschiede in den Anfangswiderstandswerten bestehen. Nach der Versuchsdurchführung tritt jedoch mit einem p-Wert von 0,10 kein signifikanter Unterschied bei der einfachen Varianzanalyse in den Mittelwerten zwischen den reinen Temperaturwechseltests $(\overline{x} = 6.3 \text{ m}\Omega, \sigma = 2.3 \text{ m}\Omega)$ und den auf thermischen Zyklen basierenden Lastprofiltests ($\overline{x} = 10.7 \text{ m}\Omega, \sigma = 6.6 \text{ m}\Omega$) auf, siehe Bild 79. Jedoch besteht ein signifikanter Unterschied in der Grundgesamtheit der ausgefallenen Kontakte (Chi-Quadrat-Test, p-Wert = 0,02). Hieraus wird gefolgert, dass das häufige Durchschreiten des Taupunktes zwar eine große Auswirkung auf die Stabilität der Widerstandsverläufe und damit die Anzahl der ausgefallenen Kontakte hat, jedoch zur Beurteilung der Wirksamkeit des auf thermischen Zyklen beruhenden Lastprofils weitere Analysen und eine größere Anzahl an Ausfalldaten notwendig sind.



Bild 79: Boxplots der maximalen, gemessenen Widerstände R_{max} , gemittelt anhand von je zehn Kontaktproben des Temperaturwechseltests mit $T_B = 125$ °C und zehn Kontaktproben des TW-Lastprofiltests mit $T_B = 125$ °C unter Angabe des Medians x_{med}

Vergleich der Oberflächenrauheiten

Bei der Analyse der Oberflächenrauheiten werden zuerst die Digitalmikroskopieaufnahmen der beiden Versuchsdurchführungen verglichen, siehe Bild 80. Es ergeben sich sowohl gleichartige flächenmäßige Ausprägung der Beschädigungen als auch ähnliche Verfärbungen der Kontaktzonen. Dies deutet bereits darauf hin, dass beide Versuche analoge Oberflächenbeschädigungen hervorrufen.



Bild 80: Vergleich der Digitalmikroskopieaufnahmen a) Versuch 6.1, Temperaturwechsel mit $T_A = -40$ °C, $T_B = 125$ °C, b) Versuch 5.7, TW-LP B.1 "kombiniert Tw", bei $T_B = 125$ °C

Bestätigt wird dies ebenfalls anhand des Vergleichs der mittels Laserscanning-Mikroskop ermittelten Rauheitswerte. Beide Versuche resultieren in länglich ausgeformten Kontaktzonen (siehe Bild 81). Die Rauheitsspitzen sammeln sich dabei an den Enden der beschädigten Flächen an. Einige Rauheitsspitzen, die auf Partikel hinweisen, sind dennoch in der Kontaktzone dispergiert. Dies tritt vor allem beim auf Temperaturwechseln beruhenden Lastprofiltest auf.



Bild 81: Vergleich der Mikroskopieaufnahmen a) und b) sowie der Oberflächenrauheiten des Temperaturwechsels mit $T_B = 125$ °C und des Temperaturwechseltests mit TW-Lastprofil B.1 und $T_{B1} = 125$ °C, c) und d) innerhalb der Kontaktzone, e) und f) außerhalb der Kontaktzone

Die statistische Auswertung der Rauheitswerte ergibt keinen signifikanten Unterschied zwischen dem Temperaturwechseltest und dem auf thermischen Zyklen basierenden Lastprofiltest (Bild 82). Weder für die S_a -(p-Wert 0,32) noch für die S_z -Werte (p-Wert 0,69) liegt der p-Wert unter der Signifikanzgrenze von 0,05. Auch die geschädigte Fläche der Kontakte unterscheidet sich nicht signifikant (p-Wert 0,53). Somit ist der Test mit Lastprofil in der Lage, ähnliche Beschädigungen der Oberfläche hervorzurufen wie ein klassischer Temperaturwechseltest. Das häufige Durchlaufen des Taupunktes hat keine signifikanten Auswirkungen auf die Ergebnisse der Oberflächenanalyse.



Bild 82: Boxplots der maximalen Höhe S_z und der mittleren arithmetischen Höhe S_a der Oberflächen sowie der Verschleiß-Fläche W_q , gemittelt anhand von drei Kontaktproben, der Versuche 6.1 Temperaturwechsel sowie des Lastprofiltests im Temperaturwechsel Versuch 5.7 (TW-Lastprofil B.1 "kombiniert Tw")

Vergleich der polynomialen Kurvenanpassung

Der Vergleich der polynomialen Kurvenanpassung zwischen Relativbewegungstests mit Lastprofil, einem auf thermischen Zyklen beruhenden Lastprofiltests sowie einem klassischen Temperatur-wechseltest resultiert im Falle des Temperaturwechselversuchs mit TW-Lastprofil B.1 in der größten Steigung (Bild 83). Dies stimmt mit den kürzeren mittleren Lebensdauern des Versuchs überein. Statistisch unterscheiden sich die Mittelwerte der polynomialen Kurvenanpassung zwischen klassischem Temperaturwechsel und den auf thermischen Zyklen basierenden Lastprofiltests nicht signifikant. Jedoch deutet die höhere Anzahl an instabilen Widerstandsverläufen in Kombination mit den nicht mehr auftretenden Klasse 1 Verläufen auf die Aktivierung zusätzlicher Schädigungsmechanismen hin. Aus diesem Grund bieten die auf Temperaturwechseln basierenden Lastprofiltests einen vielversprechenden Ansatz zur schnelleren Beurteilung der Zuverlässigkeit, der aber noch weiter auf den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden muss. Zusätzlich muss ebenfalls ein Vergleich mit tatsächlich im Feld auftretenden Schädigungsmechanismen erfolgen.



Bild 83: Vergleichende Betrachtung der Polynominalen Fits der Versuche 5.5 Relativbewegungs-Lastprofil A.3, 5.7 Temperaturwechsel-Lastprofil B.1 und 6.1 klassischer Temperaturwechsel mit $T_B = 125$ °C unter Angabe der polynominalen Gleichungen sowie dem verwendeten Temperatur-Zeit- bzw. Relativbewegungsweg-Zeit-Profil

5.4 Zusammenfassung

Im abgeschlossenen Kapitel wurde das Pkw-Nutzungsverhalten in Deutschland sowie der Einfluss der Feuchtigkeit analysiert und davon ausgehend unterschiedliche Lastprofile erstellt. Diese wurden zuerst in Relativbewegungstests mit mechanisch induzierten Mikrobewegungen getestet. Hierbei konnte analog zu Kapitel 4 weder eine signifikante Widerstandserhöhung noch eine Schädigung der Kontaktzone festgestellt werden. Daher wurde ein auf thermischen Zyklen basierendes Lastprofil mit dem Ziel des häufigen Durchschreitens des Taupunktes entwickelt. Hierbei zeigten sich im Temperaturwechsel-Lastprofiltest bereits nach einer Versuchsdauer von 47 h erste Ausfälle. Im Vergleich traten bei den Überschreitungen Relativbewegungs-Lastprofiltests keine des Ausfallkriteriums auf. Die frühen Ausfälle korrelierten ebenfalls mit einer deutlicheren Schädigung und damit höheren Rauheitswerten in der Kontaktzone. Durch die Temperaturwechsel-Lastprofile konnte im Vergleich zu klassischen Temperaturwechseltest eine beschleunigte Induktion von Widerstandserhöhungen und Schädigungen in der Kontaktzone erzielt werden. Im Vergleich der Versuche wird die Zeit bis zum ersten Ausfall beim Lastprofiltest mit Temperaturwechseln um 55 % verkürzt.

- Keine signifikante Widerstandserhöhung oder Schädigung der Kontaktzone bei Relativbewegungs-Lastprofiltests.
- Beschleunigung der Schädigungsmechanismen durch die Durchführung von Temperaturwechsel-Lastprofiltests.
- Durchschreiten des Taupunkts essenziell für die Schädigung der Kontakte.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Anwendung von realitätsnäheren Lastprofiltests eine vielversprechende Möglichkeit zur Beschleunigung von Qualifizierungstests darstellt. Allerdings müssen die Lastprofile auf thermischen Zyklen als Hauptbelastung basieren. Im Vergleich zu Temperaturwechseltests klassischen treten durch das häufige Zeit Durchschreiten des Taupunkts in kürzerer deutliche Widerstandserhöhungen auf. Allerdings ist es für die Aussagekraft über Ausfälle im Feld unabdingbar, darauf zu achten, durch die Beschleunigung der Temperaturwechseltests keine anderen Schädigungsmechanismen zu aktivieren. Hierzu sind weitere Untersuchungen der thermischen Lastwechseltests notwendig.

6 Kombinierte Anwendung von CALT und Raffungsmodellen

Um vor allem für die Entwicklung neuer Kontaktierungslösungen ein geeignetes Vorgehensmodell zu besitzen, ist es notwendig, die analytischen Modelle zur Berechnung der Lebensdauer von E/E-Komponenten mit einer probaten Methodik zu verbinden. Daher wird im Nachfolgenden die Methodik der kalibrierten Lebensdauertests mit analytischen Modellen, den Raffungsmodellen kombiniert. Darüber hinaus muss dennoch eine Evaluierung der Anwendbarkeit der unterschiedlichen Modelle auf die jeweiligen Kontakte erfolgen.

Zum Verständnis der Vorgehensweise ist eine ausführliche Betrachtung der Grundlagen notwendig. Dies erfolgt im Kapitel 6.1, unterteilt in die Grundlagen zur kalibrierten Lebensdauertestmethodik (Kapitel 6.1.1) und den Grundlagen zu den Raffungsmodellen (Kapitel 6.1.2), siehe Bild 84. Anschließend wird sowohl die konventionelle CALT-Methodik als auch die Erweiterung um Raffungsmodelle in Kapitel 6.2 durchgeführt. Anschließend erfolgt in Kapitel 6.3 ein Vergleich der Vorhersagequalitäten der einfachen CALT-Methodik und der um Raffungsmodelle erweiterten. Abschließend werden die erarbeiteten Ergebnisse zusammenfassend dargestellt (Kapitel 6.4).



Bild 84: Aufbau des Kapitels 6, "Kombinierte Anwendung von CALT und Raffungsmodellen"

Dieses Kapitel entstand mithilfe folgender studentischer Arbeiten: [S4, S10–S12]

6.1 Methodik zur kombinierten Anwendung auf Relativbewegungstests

In den nachfolgenden Kapiteln werden zuerst die Grundlagen der kalibrierten Lebensdauertests beschrieben, bevor die Basis der Raffungsmodelle erläutert wird. Hier wird in einem ersten Schritt eine Vielzahl von Modellen betrachtet, die anschließend auf ihre Eignung für Steckkontakte überprüft werden. Für die relevantesten analytischen Modelle werden anschließend die Herkunft und der genaue Aufbau beschrieben.

6.1.1 Grundlagen der CALT-Methodik

Kalibrierte beschleunigte Lebensdauertests (CALT, engl. calibrated accelerated lifetime tests) werden bereits erfolgreich zur Abbildung einer Vielzahl an Beanspruchungen wie mechanischer Last, Vibration, *Spannung*, Temperatur, Korrosion und *abrasivem Verschleiß* angewandt [142]. Da diese Belastungen mit den bei kraftschlüssigen Kontakten vorrangigen *Schädigungsmechanismen* deckungsgleich sind, bietet sich die Möglichkeit, die CALT-Methodik ebenfalls auf Steckverbinder anzuwenden. Durch Extrapolation der Messdaten wird eine starke Zeitraffung der Versuchsdauer ermöglicht, wodurch ein schneller Wissensgewinn bewirkt wird [142]. Das während der CALT anzuwendende Vorgehen wird nachfolgend anhand der in [55] dargestellten Schritte erläutert.

Bestimmung der Belastungsgrenze

In einem ersten Schritt ist die Belastungsgrenze der Bauteile zu bestimmen, bei der die Steckverbinder nicht sofort oder nach sehr kurzer Zeit ausfallen. Dabei liegt das zu ermittelnde Belastungsniveau höher als regulär zu prüfende Belastungsniveaus und außerhalb der Spezifikation der Bauteile. [55, 142]

Durchführung der Lebensdauertests

Im nächsten Schritt wird ein Belastungsniveau SL_1 von circa 90 % der Belastungsgrenze FL gewählt. Hierbei müssen mindestens zwei Bauteile unter Aufzeichnung der Lebensdauer getestet werden. Anschließend muss untersucht werden, ob alle Proben mit demselben *Schädigungsmechanismus* ausgefallen sind. Ist dies nicht der Fall, müssen die entsprechenden Daten als zensierte Daten behandelt werden. [55]

Anschließend wird das Belastungsniveau nochmals um circa 10 %-Punkte gesenkt (SL_2 in Bild 85). Auch nach diesem Lebensdauertest müssen die zugrunde liegenden *Schädigungsmechanismen* analysiert und die Bedeutung der Mechanismen für die Feldbelastung sichergestellt werden. [142]

Die bei den jeweiligen Belastungsniveaus ermittelten Ausfälle werden in ein Weibull-Diagramm eingetragen, um die charakteristische Lebensdauer der Bauteile zu ermitteln. Sollten mehrere relevante Schädigungsmechanismen auftreten, muss die Prüfung für die jeweilige Ausfallart getrennt durchgeführt werden. [55]

Validierung und Extrapolation

Für die Extrapolation wird mithilfe der Ausfalldaten ein Weibull-Diagramm in loglinearer Darstellung zur Verwendung des Arrhenius-Modells (siehe 6.1.2) oder in doppelt logarithmischer Darstellung zur Verwendung des Invers-Power-Models erstellt. Durch die eingetragenen Werte wird eine Gerade gelegt, die eine Extrapolation in Richtung des Belastungsniveaus im Feld ermöglicht. Dabei muss das dritte Belastungsniveau SL_3 zum einen so nahe wie möglich an der maximal im Feld erwarteten Belastung und zum anderen so hoch wie möglich liegen, um die Testdauer kurz zu halten. [55, 142]

Um die vorhergesagte Lebensdauer und damit die Extrapolation zu überprüfen, wird ein dritter Lebensdauertest auf dem zuvor festgelegten Belastungsniveau durchgeführt. Die ermittelten Zeiten bis zum Ausfall werden anschließend ebenfalls in das Weibull-Diagramm eingetragen, siehe Bild 85. Auch bei diesem Lebensdauertest muss die Art des dominierenden *Schädigungsmechanismus* überprüft werden. [142]



Bild 85: Beispielhaftes Vorgehen nach der CALT-Methodik, mit eingetragener Belastungsgrenze *FL*, Lebensdauern bei SL_1 , SL_2 sowie SL_3 , mittlerer Lebensdauer und eingetragener 1 %- sowie 99 %-Vertrauensgrenzen nach [142]

Anschließend wird eine lineare Regressionsgerade den eingetragenen Ausfallzeiten überlagert. Die Gerade ist bis zum zu erwartenden Belastungsniveau im Feld zu extrapolieren. Die charakteristische Lebensdauer (*EL* in Bild 8₅) kann aus dem Diagramm abgelesen werden. Mithilfe der ermittelten Regressionsgeraden können die empirischen Faktoren des Beschleunigungsmodells geschätzt werden. Nachfolgend werden die Zeiträume bis zum Ausfall mittels der relevanten Gleichungen des Beschleunigungsmodells bestimmt. Für jeden Punkt der drei Lebensdauerversuche ergibt sich ein anderer Beschleunigungsfaktor. [55]
Mithilfe der berechneten Beschleunigungsfaktoren lassen sich alle Datenpunkte so berechnen, als ob sie bei den im Einsatz erwarteten Belastungsniveau geprüft worden wären. Die auf diese Art transformierten Datenpunkte werden in ein weiteres Weibull-Diagramm eingetragen. Anschließend wird eine Regressionsgerade gefittet, um die Zuverlässigkeit auf Feldniveau ablesen zu können. [55] Der Weibull-Analyse wird zusätzlich ein Vertrauensbereich hinzugefügt.

6.1.2 Grundlagen von Raffungsmodellen

Analytische Modelle, sogenannte Raffungsmodelle, bilden eine Möglichkeit, die Prüfdauer von Qualifizierungstests zu verringern. Um die Lebensdauer der zu prüfenden Bauteile abzubilden, ist jedoch eine genaue Kenntnis über die auftretenden Schädigungsmechanismen und die Einschränkungen bei den jeweiligen Modellen notwendig [143]. Sind die zugrunde liegenden Schädigungsmechanismen bekannt und werden diese separiert betrachtet, können Grundlagen geschaffen werden, die Zuverlässigkeit von elektronischen Produkten zu erhöhen und die Testdauer zu verkürzen [144]. Die Einsatzmöglichkeit von Raffungsmodellen bleibt jedoch auf Komponenten beschränkt, da sich Schädigungsmechanismen überlagern und somit eine Übertragbarkeit auf das Gesamtsystem nicht gegeben ist [145]. In [126, P4] wurde die prinzipielle Anwendbarkeit von Raffungsmodellen auf kraftschlüssige Kontakte nachgewiesen. Tabelle 6 gibt einen Überblick über etablierte Raffungsmodelle, die in die Gleichungen eingehenden Parameter und die damit abbildbaren Einflüsse.

Tabelle 6: Übersicht der auf ihre Eignung für Steckkontakte überprüften Raffungsmodelle inklusive der in die Gleichungen eingehenden Parameter und den damit abzubildenden Spannungen

Belastungsart		ъл 1 • 1	$c_1 \cdot 1$	N <i>I</i> 1 1	347 **
Modell	Inermisch	Mechanisch	Chemisch	Medial	vv eitere
Arrhenius [146]	T_{max}		E _a		
Black [147]	T_{max}		E_a		J
Bayerer [148]	T_{max} , ΔT		E_a		I,t
Coffin- Manson [149–151]	ΔT^*	$\Delta \varepsilon_{er}^{*}$			
Engelmaier [152]	T_{max}	$\Delta \varepsilon_{er}, f$			
Eyring [153]	T_{max}	Zwe	ite Spannung	frei wählba	ar
Halleck [154]				V_p	
Kemény [155]	T_{max}		E_a		v_{cb}
Lawson [156]	T_{max}		E_a	rF	
Norris- Landzberg [157]	$T_{max}, \Delta T$	f	Ea		
Mod. Norris- Landzberg [158, 159]	T_{max} , ΔT		E _a		t
Peck [160]	T_{max}		E_a	rF	
Reich-Hakim [161]	T_{max}			rF	
Scheuermann [162]	T_{max} , ΔT		E _a		t, ar
Zorn [163]	T_{max} , ΔT		E_a	rF	V

*Nur einer der beiden Faktoren kann berücksichtigt werden

Nachfolgend werden einige für die Vorhersage der Lebensdauer von Steckkontakten unter thermischer Belastung relevante Raffungsmodelle detailliert erläutert. Dabei wird zusätzlich die Möglichkeit in Betracht gezogen, Modelle für die Anwendung auf Steckverbinderkontakte zu modifizieren.

Arrhenius-Ansatz

Das 1889 von Svante Arrhenius entwickelte Modell beschreibt die Abhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit von der Temperatur [146]. Wenn die Geometrie der zu untersuchenden Bauteile eine untergeordnete Rolle spielt, kann der Arrhenius-Ansatz Ausfälle aufgrund von Diffusionsvorgängen [164], beziehungsweise auf chemischen Reaktionen basierende Ausfälle beschreiben [145]. Um die Lebensdauer von Bauteilen zu berechnen, findet im Allgemeinen unten stehende Formel Verwendung:

$$N_f = C_1 \cdot e^{\frac{E_a}{k_b \cdot T_{max}}} \qquad \text{Gl 6.1}$$

Hierbei beschreibt N_f die Zyklen bis zum Ausfall, E_a die Aktivierungsenergie, k_b die Boltzmann-Konstante 8,6173324 · 10⁻⁵ eV K⁻¹, T_{max} die Maximaltemperatur und C_1 eine Konstante der Bauteilgeometrie, der Herstellungsbedingungen und weiterer Parameter [164].

Bayerer-Modell

Das 2008 von Reinhold Bayerer entwickelte empirische Modell dient zur Bestimmung der Lebensdauer von IGBT-Modulen (engl. insulated-gate bipolar transistor). Für gleichbleibende Spannungen und Drahtdurchmesser kann die in Gl 6.2 genannte vereinfachte Formel angewandt werden: [148]

$$N_f = C_2 \cdot \Delta T^{\beta_1} \cdot e^{\frac{\beta_2}{T_{max} + 273}} \cdot t_{on}^{\beta_3} \cdot I^{\beta_4}$$
 Gl 6.2

 ΔT stellt den Temperaturhub, t_{on} die Lastimpulsdauer und *I* den Strom dar. Bei C_2 sowie β_1 bis β_4 handelt es sich um Konstanten des Bayerer-Modells die über die Minimierung des Unterschiedes zwischen berechneter Daten und Testdaten optimiert werden müssen.

Coffin-Manson-Modell

Da ihre Modelle übereinstimmen, werden das 1953 von Manson [149] mit dem 1954 von Coffin veröffentlichten Modell [150, 151] zusammengefasst. Das Modell ist nach JEDEC JEP 122 genormt [165] und kann vor allem auf Materialermüdung basierende Ausfälle abbilden [145]:

$$N_f = C_3 \cdot \Delta T^{-q} \qquad \text{Gl 6.3}$$

In Gl 6.3 beschreibt ΔT die Temperaturdifferenz zwischen minimaler und maximaler Temperatur, C_3 sowie q entsprechen den Konstanten des Modells. In [164] werden für Metalle ein Wert von circa zwei für q vorgeschlagen und für Kunststoffummantelungen von Mikroelektronik ein Wert von um die fünf.

Eyring-Modell

Das Eyring-Modell [153] stellt eine Alternative zum Arrhenius-Ansatz dar und basiert auf der Quantenmechanik. Es ist in der Lage, chemische *Schädigungsmechanismen* abzubilden: [164]

$$L_h = \frac{C_4}{T_{max}} \cdot e^{\frac{C_5}{K_b \cdot T_{max}}} \qquad \text{Gl 6.4}$$

Die Lebensdauer L_h wird anhand der maximalen Temperatur T_{max} , der Boltzmannkonstante k_b und den Konstanten des Eyring-Modells C_4 und C_5 berechnet. Darüber hinaus existiert eine allgemeine Eyring-Beziehung [153], bei der die zweite Spannung frei gewählt werden kann [166, 164]:

$$L_{h} = \frac{C_{4}}{T_{max}} \cdot e^{\frac{C_{5}}{k_{b} \cdot T_{max}}} \cdot e^{C_{6}V + C_{7} \cdot \frac{V}{k_{b} \cdot T_{max}}}$$
Gl 6.5

Hierbei wird Gl 6.4 um eine Exponentialfunktion, welche die zweite Spannung *V* enthält, erweitert und diese ins Verhältnis zur Temperatur gesetzt. Darüber hinaus enthält die Gleichung die Boltzmannkonstante k_b sowie zwei weitere Konstanten C_6 und C_7 .

Norris-Landzberg-Modell

Das Modell von Norris und Landzberg [157] kombiniert den Arrhenius-Ansatz (Gl 6.1) mit dem Coffin-Manson-Modell (Gl 6.3). Durch die Verbindung besteht die Möglichkeit zur Abbildung von sowohl chemischen *Schädigungsmechanismen* als auch von Materialermüdung [145]:

$$N_f = C_8 \cdot f^{-C_9} \cdot \Delta T^{-q} \cdot e^{\frac{E_a}{k_b \cdot T_{max}}}$$
Gl 6.6

Neben der maximalen Temperatur T_{max} und dem Temperaturhub ΔT , geht auch die Frequenz der Lastwechsel f in die Norris-Landzberg-Gleichung ein. E_a ist die aus dem Arrhenius-Ansatz bekannte Aktivierungsenergie, k_b die Boltzmannkonstante und C_8 , C_9 und q Konstanten, über die gefittet werden muss.

Modifiziertes Norris-Landzberg-Modell

Es existiert eine Vielzahl von modifizierten Norris-Landzberg-Modellen, die den Frequenz-Term durch weitere Abhängigkeiten ersetzen [158, 159, 167–169]. Dies geht immer mit zusätzlichen Konstanten einher, die berechnet werden müssen. In [159] wird der Frequenz-Term des Norris-Landzberg-Modells durch einen zeitlichen Term, der von Aufheizrate und Haltedauer abhängt, ersetzt:

$$N_f = C_{10} \cdot \Delta T^{-q} \cdot (t_a + p \cdot t_h)^{C_{11}} \cdot e^{\frac{E_a}{k_b \cdot T_{max}}} \qquad \text{Gl 6.7}$$

Damit enthält Gl 6.7 neben dem Coffin-Manson- und dem Arrhenius-Termen die Aufheizzeit t_a sowie die Haltezeit t_h . Dementsprechend werden der Gleichung neben den Konstanten C_{10} und q, in Form von p und C_{11} , noch weitere Koeffizienten hinzugefügt. Besitzt die Aufheizzeit keinen Einfluss auf die Lebensdauer, wird Gl 6.7 nach [169] folgendermaßen vereinfacht:

$$N_f = C_{10} \cdot \Delta T^{-q} \cdot (t_h)^{C_{11}} \cdot e^{\frac{E_a}{k_b \cdot T_{max}}}$$
Gl 6.8

Scheuermann-Modell

In [162] wird eine auf dem Bayerer-Modell basierende Lebensdauergleichung für die Anwendung auf IGBT-Module der Firma Semikron modifiziert:

$$N_f = C_{12} \cdot \Delta T^q \cdot ar^{\beta_1 \cdot \Delta T + \beta_0} \cdot e^{\frac{E_a}{k_b \cdot T_{jm}}} \cdot \left(\frac{C_{13} + t_{on}^{y}}{C_{13} + 1}\right) \cdot f_{Diode} \quad \text{Gl 6.9}$$

Gl 6.9 besteht aus dem Temperaturhub ΔT zusammen mit der Konstanten q des Coffin-Manson-Modells. Darüber hinaus gehen der Geometriefaktor des Drahtbonds ar, die mittlere Sperrschichttemperatur T_{jm} , die Lastimpulsdauer t_{on} und f_{Diode} , ein Korrekturfaktor für verschiedene Chipdicken in die Gleichung ein. Bei C_{12} , C_{13} , E_a sowie β_0 und β_1 handelt es sich um die Konstanten des Scheuermann-Modells, die gefittet werden müssen.

Für Klemmkontakte modifizierte Bayerer-Modelle

Da sowohl das Einbeziehen des Stroms, der Belastungsdauer sowie eines geometrischen Faktors in dieser Arbeit als vielversprechende Möglichkeiten angesehen werden, um die Lebensdauervorhersage zu verbessern, werden in dieser Arbeit die Modelle aus den Gleichungen Gl 6.2 und Gl 6.9 zu für Klemmkontakte modifizierten Modellen kombiniert. Hierbei werden sowohl die Faktoren $t_{on}^{\beta_3}$ und I^{β_4} des Bayerer-Modells als auch der Faktor $ar^{\beta_1\Delta T+\cdot\beta_0}$ mit einem Norris-Landzberg-Ansatz kombiniert. Hierdurch ergibt sich folgende Gleichung, nachfolgend als "Bayerer 1"-Modell bezeichnet:

$$N_f = C_{14} \cdot \Delta T^q \cdot ar^{\beta_1 \cdot \Delta T + \beta_0} \cdot e^{\frac{E_a}{k_b \cdot T_{max}}} \cdot t_h^{C_{15}} \cdot I^{C_{16}} \qquad \text{Gl 6.10}$$

Neben den aus dem Norris-Landzberg-Modell bekannten Termen (Gl 6.6), geht der geometrische Faktor *ar*, der für Klemmkontakte mit der Stiftbreite gleichgesetzt wird, sowie die Haltezeit t_h und die Stromstärke *I* in die Gleichung ein. Die Stromstärke wird in dieser Arbeit nicht variiert, da nach Kapitel 2.3.1 mit der *Millivoltmethode* mittels konstantem Messstroms von 100 mA gemessen wird.Die Konstanten C_{14-16} , q, β_0 , β_1 und E_a müssen berechnet werden.

Um eine bessere Anpassung des geometrischen Faktors an die tatsächliche Lebensdauerkurve zu ermöglichen, wird zusätzlich ein quadratischer Ansatz, der als "Bayerer 2"-Modell bezeichnet wird, verfolgt. Hierbei muss über einen zusätzlichen Faktor β_2 gefittet werden:

$$N_f = C_{17} \cdot \Delta T^q \cdot ar^{\beta_2 \cdot \Delta T^2 + \beta_1 \cdot \Delta T + \beta_0} \cdot e^{\frac{E_a}{k_b \cdot T_{max}}} \cdot t_h^{C_{18}} \cdot I^{C_{19}} \quad \text{Gl 6.11}$$

6.2 Durchführung der kombinierten Methodik

Die kombinierte Methodik zur Beschleunigung von *Qualifizierungstests* beruht zum einen auf dem systematischen Vorgehen bei der Durchführung von kalibrierten Lebensdauertests und zum anderen auf der Anwendung von für die Lebensdauervorhersage von Steckverbindern geeigneten Raffungsmodellen. Bei der Auswahl der Raffungsmodelle liegt der Fokus vor allem auf Modellen, die sich in Voruntersuchungen [P4] als geeignet erwiesen haben.

6.2.1 Anwendung der CALT-Methodik

Bei der Anwendung der CALT-Methodik muss zuerst die Belastungsgrenze der Untersuchungsobjekte bestimmt werden. Dies erfolgt in konventionellen Temperaturwechseltests mit einer minimalen Temperatur von $T_A = -40^{\circ}C$.

Bestimmung der Belastungsgrenze

Bei der Ermittlung der Belastungsgrenze betragen die Haltedauer $t_h = 2$ h sowie die Umlagerungsdauer $t_u = 2$ h, die maximale Temperatur T_B wird von 105 °C pro Versuch um jeweils 10 °C gesteigert. Alle Kontakte werden vor der Bestimmung der Belastungsgrenze für 100 h bei $T_{tA} = 125$ °C ausgelagert. Wie in Bild 86 dargestellt, ergibt sich für die getesteten Steckkontakte ein maximales Belastungsniveau von $T_{fl} = 135$ °C.



Bild 86: Temperatur-Zeit-Verlauf der Bestimmung der mit der Belastungsgrenze *FL* gleichzusetzenden Temperatur T_{fl} bei kraftschlüssigen Steckverbinderkontakten mit $T_A = -40$ °C, $t_h = 2$ h, $t_u = 2$ h.

Einen Beleg für das tatsächliche Erreichen der Belastungsgrenze liefert die Charakterisierung der auftretenden Widerstandsverläufe nach [P5]. Wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben, stehen dabei Klasse 1 für einen konstanten Verlauf der Durchgangswiderstände, Klasse 2 für einen kontinuierlichen Anstieg der Widerstände und Klasse 3 für unregelmäßige Verläufe, die auf das Auftreten von *Reibkorrosion* hinweisen. [P5] Bild 87 zeigt die Anzahl der während der Ermittlung der Belastungsgrenze auftretenden Widerstandsverläufe nach den Kategorien. Mit steigender Maximaltemperatur verlagern sich die Kategorien von regelmäßigen Verläufen mit konstanten Widerständen und kontinuierlichen Anstiegen hin zu irregulären Verläufen der Klasse drei. Bei einer maximalen Temperatur von 135 °C fallen anschließend alle Kontakte aus, wobei hauptsächlich Widerstandsverläufe der Kategorie 3 "irregulär" auftreten. Im Chi-Quadrat-Test ergibt sich ein signifikanter Unterschied in der Grundgesamtheit der Widerstandsverlaufskategorien zwischen den Versuchen mit einer Maximaltemperatur von 125 °C und 135 °C (p-Wert = 0,02).



Bild 87: Nach [P5] kategorisierte Widerstandsverläufe bei Temperaturwechseln zur Bestimmung der Belastungsgrenze *FL*, a) $T_B = +105$ °C, b) $T_B = +115$ °C, c) $T_B = +125$ °C, d) $T_B = +135$ °C

Zusätzlich werden die maximalen Widerstandswerte der vier Versuche, wie in Bild 88 veranschaulicht, verglichen. Hierbei liegen die Mediane der maximalen Widerstände für die drei maximalen Temperaturen 105 °C, 115 °C und 125 °C unter dem kleinsten Ausfallkriterium. Für $T_B = 135$ °C erhöhen sich die maximalen Widerstände jedoch signifikant (p-Wert = 0,00).



Bild 88: Boxplots der maximalen Widerstände R_{max} der Versuche zur Bestimmung der Belastungsgrenze FL, bei $t_h = 2$ h, $t_u = 2$ h, mit Angabe des Ausfallkriteriums sowie des Medians

Weiterführende statistische Versuche zeigen, dass eine Änderung der Maximaltemperatur um 10 °C unter 125 °C sowie eine Verlängerung der Haltezeit auf 3 h keinen signifikanten Einfluss auf die maximalen Widerstände haben. Allerdings besteht mit einem p-Wert von 0,04 ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Anzahl an Ausfällen, der Haltezeit sowie der maximalen Temperatur. Diese Ergebnisse dienen zur Erstellung eines Konturdiagramms der Ausfallwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von Haltezeit und Maximaltemperatur. Im resultierenden Diagramm in Bild 89 ist die Belastungsgrenze bei T_B = 135 °C mit einer Ausfallwahrscheinlichkeit von 80 % ebenfalls deutlich zu erkennen.



Bild 89: Konturdiagramm der Ausfallwahrscheinlichkeiten für Temperaturwechsel mit $T_A = -40$ °C, $t_u = 2$ h, $N_v = 30$, 40 Kontaktpaare

Zusammenfassend wird belegt, dass bei einer Maximaltemperatur von $T_B = 135 \,^{\circ}\text{C}$ die Belastungsgrenze *FL* der Steckkontakte erreicht ist. Durch die erhöhte Temperatur wird das Relaxationsverhalten der Materialien verstärkt, wodurch die Kontaktkraft abnimmt und es zu einem Auftreten Reibkorrosion kommt. verstärkten von Da alle Temperaturwechselversuche gleich oft den Temperaturbereich des Taupunkts durchschreiten, stellt dies nicht die Ursache für die deutlich höhere Anzahl an Ausfällen bei einer Maximaltemperatur von $T_B = 135 \,^{\circ}C$ dar. Um die Aussagekraft für den Anwendungsfall zu gewährleisten, müssen die für die CALT-Methodik notwendigen nachfolgenden Lebensdauertests bei geringeren maximalen Temperaturen erfolgen als T_{FL} .



Bild 90: Vergleichende Betrachtung der Widerstandsverläufe für a) TW-Test mit T_B = 115 °C und b) TW-Test mit T_B = 125 °C; je 10 Kontaktpaare; 100 h thermische Auslagerung; bei T_{tA} = 125 °C, N_V = 30, t_V = 240 h

Vorhersage der Lebensdauer

Die Vorhersage der Lebensdauer erfolgt anhand von zwei durchgeführten Lebensdauertests bei Maximaltemperaturen T_{R} unterhalb der Belastungsgrenze FL (siehe Bild 90). Um den in Fahrzeugen zu prüfenden Temperaturklassen zu entsprechen, werden die Temperaturwechseltests bei einem Belastungsniveau von 92,5 % ($T_B = +125$ °C) sowie auf einem Belastungsniveau von 85,2 % ($T_B = +115$ °C) durchgeführt. Anschließend werden die ermittelten Ausfallzeiten in ein Diagramm mit einfach logarithmischer Auftragung der Belastung in diesem Fall der Temperaturänderung ΔT , eingetragen (Bild 91). Durch die Mittelwerte der Ausfallzeiten wird eine Gerade gelegt, die bis über die Grenzen der Versuchsparameter hinaus verlängert wird (Bild 91-1). Anschließend wird das Belastungsniveau eingezeichnet, für welches die Lebensdauer vorhergesagt werden soll (Bild 91-2). Der Schnittpunkt mit der zuvor eingezeichneten Geraden stellt den vorhergesagten Ausfall dar (Bild 91-3) und die entsprechende Lebensdauer kann an der y-Achse abgelesen werden (Bild 91-4).

In diesem Fall wird auf einem Belastungsniveau von 77,8 % ($\Delta T = 145$ °C, $T_B = +105$ °C) eine Lebensdauer von 210,5 h prognostiziert. Anschließend wird bei einer maximalen Temperatur von $T_B = +105$ °C ein weiterer Temperaturwechseltest mit ansonsten gleichen Parametern durchgeführt.



Bild 91: Vorhersage der Lebensdauer für einen Temperaturwechselversuch auf 77,8 %-Niveau ($\Delta T = 145$ °C, $T_B = +105$ °C) der Belastungsgrenze *FL* mithilfe von zwei Belastungstests auf 92,5 % ($\Delta T = 165$ °C, $T_B = +125$ °C) sowie 85,2 % ($\Delta T = 165$ °C, $T_B = +115$ °C) der Belastungsgrenze

6.2.2 Erweiterung um Raffungsmodelle

Bevor die CALT-Methodik um die Anwendung von Raffungsmodellen erweitert werden kann, erfolgt zuerst eine Beurteilung der Anwendbarkeit der Raffungsmodelle. Dabei wird wie in Bild 92 beschrieben vorgegangen.

Vorgehensmodell zur Evaluierung der Raffungsmodelle

Für die Berechnung der Raffungsmodelle auf Basis der Ausfallzeiten wird ebenfalls ein MATLAB-Programm genutzt. Nach dem Import der Lebensdauerdaten werden die zur Berechnung der Raffungsmodelle benötigten Konstanten über die Versuchswerte gefittet. Hierbei stehen zwei unterschiedliche Verfahren zur mathematischen Optimierung zur Verfügung. Das Levenberg-Marquardt-Verfahren (LM) [170] sowie der Trust-Region-Reflective-Algorithmus (TRR) [171]. Bei den einzelnen Modellen können je nach Optimierungsverfahren bessere Ergebnisse erzielt werden, daher ist angegeben, mit welchem Verfahren die Konstanten berechnet werden. Durch eine geeignete Wahl der Startwerte für die Optimierung kann die Güte der Lebensdauermodelle teilweise verbessert werden. Anschließend kann die Lebensdauer für eine gewünschte Maximaltemperatur vorhergesagt werden. Zur Validierung der Vorhersage ist zusätzlich ein weiterer Lebensdauerversuch bei der vorhergesagten Temperatur durchzuführen, um die Eignung der Modelle zu bewerten. Abschließend wird die Vorhersagegenauigkeit der Modelle durch die Abweichung in Prozent von der tatsächlichen mittleren Lebensdauer angegeben.



Bild 92: Vorgehen bei der Anwendung von Raffungsmodellen, Auswahl des passenden Modells und Validierung durch einen weiteren Temperaturwechselversuch

Bewertung der allgemeinen Anwendbarkeit

Wie in Bild 93 dargestellt, verlaufen die Lebensdauerkurven des Arrhenius-Modells sowie des Coffin-Manson-Modells relativ flach. Der prinzipielle Verlauf ist realistisch, da eine Zunahme der Maximaltemperatur mit einer Verringerung der Lebensdauer einhergeht. Das in Bild 93 b) abgebildete Coffin-Manson-Modell sagt bei einer maximalen Temperatur von 105 °C und einer Temperaturänderung von $\Delta T = 145$ °C mit 180,4 h die geringste Lebensdauer der untersuchten Modelle voraus. Beide Modelle weisen dabei jedoch einen vergleichsweise hohen mittleren quadratischen Fehler (engl. root mean square, RMS) auf. Auch durch unterschiedlich gewählte Startwerte der Aktivierungsenergie E_a lässt sich die Genauigkeit des Arrhenius-Modells nicht weiter verbessern. Das Coffin-Manson-Modell weist eine starke Abhängigkeit vom Faktor q und damit von der Temperaturdifferenz auf. Das Variieren von q hat eine direkte Veränderung der Lage der Lebensdauerkurve zur Folge. Beide Modelle weisen eine geringe Abhängigkeit von den Konstanten C_1 beziehungsweise C_3 auf.



Bild 93: Lebensdauervorhersage für eine maximale Temperatur von 105 °C / Temperaturdifferenz von 145 °C anhand der Raffungsmodelle a) Arrhenius-Modell, b) Coffin-Manson-Modell

Das Norris-Landzberg-Modell als Kombination aus Arrhenius- und Coffin-Manson-Modell berechnet für $T_{max} = 105$ °C mit 316,0 h eine deutlich höhere Lebensdauer als die beiden vorherigen Modelle (Bild 94). Dabei zeigt der Verlauf der Lebensdauerkurve in einem Bereich über der Maximaltemperatur von 135 °C einen Anstieg und damit einen unrealistischen Verlauf. Da dieser Bereich jedoch über der Belastungsgrenze der Kontakte liegt und somit andere Schädigungs-mechanismen auftreten als im untersuchten Bereich, ist er für die Lebensdauervorhersage nicht von Bedeutung. Das Norris-Landzberg-Modell weist analog zum Coffin-Manson-Modell, eine starke Abhängigkeit von den Startwerten für q auf. Im Gegensatz zum Arrhenius-Modell besteht nur eine mittlere Anhängigkeit der Genauigkeit von den Startwerten für E_a . Die Konstanten C_9 und C_{10} haben ebenfalls nur einen geringen Einfluss auf den Kurvenverlauf. Hierdurch zeigt sich in diesem Anwendungsfall eine deutliche Temperaturabhängigkeit des Norris-Landzberg-Modells sowie eine geringe Abhängigkeit vom Frequenzterm.

Bei der vergleichenden Anwendung der modifizierten Norris-Landzberg-Modelle nach Gl 6.7 und Gl 6.8 werden bessere Ergebnisse ohne Berücksichtigung der Aufheizzeit erzielt. Daher wird im Folgenden nur noch das Modell nach Gleichung Gl 6.8 betrachtet. Es weist im Vergleich mit dem regulären Norris-Landzberg-Modell einen flacheren Kurvenverlauf der Lebensdauer auf. Daraus ergibt sich eine um 71,4 h niedrigere Lebensdauervorhersage. Auch beim modifizierten Norris-Landzberg-Modell steigt der Verlauf der Lebensdauer über 135 °C leicht an. Dies ist der leicht erhöhten mittleren Lebensdauer bei höheren Temperaturen geschuldet. Wie beim Norris-Landzberg-Modell gilt jedoch, dass dieser Temperaturbereich außerhalb des Untersuchungsfokus liegt. Prinzipiell bestehen auch beim modifizierten Norris-Landzberg-Modell dieselben Abhängigkeiten zwischen Güte und Startwerten der Konstanten wie beim regulären Modell. Allerdings besitzt auch der Startwert des Faktors C_{10} und damit die Haltezeit einen deutlichen Einfluss auf die Modellgenauigkeit.



Bild 94: Lebensdauervorhersage für eine maximale Temperatur von 105 °C / Temperaturdifferenz von 145 °C anhand der Raffungsmodelle a) Norris-Landzberg-Modell, b) Modifiziertes Norris-Landzberg-Modell

Die Konstanten beider Bayerer-Modelle werden im Gegensatz zu den vorherigen Modellen mit dem Trust-Region-Reflective-Algorithmus berechnet, da der Levenberg-Marquardt-Algorithmus bei der hohen Anzahl an zu fittenden Konstanten keine zufriedenstellenden Genauig-keiten der Modelle ermöglicht. Beide Bayerer-Modelle resultieren in einem vergleichbaren Lebensdauerverlauf, siehe Bild 95. Das Bayerer-2-Modell prognostiziert im Vergleich zum Bayerer-1-Modell eine um 3,6 h geringere Lebensdauer für $T_{max} = 105$ °C. Das Bayerer-2-Modell erweist sich als empfindlich gegenüber einer Änderung der Startwerte von q, β_{0-2} , C_{18} und C_{19} . Gegenüber der Startwertänderung der Aktivierungsenergie E_a besteht, mit einer Auswirkung von $\pm 0,05$ % auf die Gesamtgenauigkeit des Modells, eine mittlere Abhängigkeit.

Verifikation der Raffungsmodelle

Zur Verifikation der Modelle wird ein weiterer Temperaturwechselversuch bei einer Maximaltemperatur von 105 °C durchgeführt, für welchen zuvor die Lebensdauer mittels Raffungsmodellen vorhergesagt wurde. Hierbei wird eine mittlere Lebensdauer von 259,1 h ermittelt. Tabelle 7 veranschaulicht die Ergebnisse des Abgleichs zwischen berechneter und im Versuch ermittelter Lebensdauer für die verschiedenen analytischen Modelle. Hierbei korreliert eine bessere Genauigkeit der Modelle im Interpolationsbereich in Form von geringen RMS – und $\Delta \bar{x}$ -Werten nicht mit hohen Genauigkeiten im Extrapolationsbereich. Des Weiteren zeigt sich, dass die Raffungsmodelle nach Arrhenius und Coffin-Manson mit Abweichungen von –26,5 % und –30,4 % die tatsächliche Lebensdauer deutlich unterschätzen. Bei Anwendung dieser Modelle fällt die



Bild 95: Lebensdauervorhersage für eine maximale Temperatur von 105 °C / Temperaturdifferenz von 145 °C anhand der Raffungsmodelle a) Bayerer-Modell 1, b) Bayerer-Modell 2

Lebensdauerprognose zu konservativ aus, was die Gefahr des Overengineerings birgt. Auch das reguläre Noris-Landzberg-Modell weist mit einer Abweichung von +22,0% nur eine geringfügig bessere Genauigkeit auf. Hierbei kommt hinzu, dass mit diesem Modell die Lebensdauer überschätzt wird, wodurch direkt die Produktzuverlässigkeit gefährdet wird. Das modifizierte Norris-Landzberg-Modell hingegen unterschätzt die Lebensdauer nur mit einer Abweichung von -4,5 %. Damit erweist sich das Modell als geeignet um die Lebensdauer von automobilen Steckverbinderkontakten vorherzusagen. Darüber hinaus ist eine minimal konservative Abschätzung der Lebensdauer erstrebenswert, da hierdurch die Sicherheiten bei der Auslegung vergrößert werden, ohne hohe Mehrkosten zu verursachen. Die beiden Bayerer-Modelle weisen mit +13,6 % und +12,2 % eine ähnliche Abweichung von der gemessenen Lebensdauer auf. Beide Modelle überschätzen die Lebensdauer jedoch. Abhängig vom Anwendungsfall ist das Bayerer-Modell 2 trotzdem als geeignet zu bewerten.

Modell	Formel	Vorher sage	Abweich ung
Arrhenius	$L_h = 1.07 \cdot 10^5 \cdot e^{(1.68 \cdot 10^{-2} \cdot (k_b \cdot T_{max})^{-1})}$	190,0 h	-26,5%
Coffin- Manson	$L_h = 6,17 \cdot 10^9 \cdot \Delta T^{-1,84}$	180,0 h	-30,4 %
Norris- Landzberg	$L_h = 8,90 \cdot f^{20,81} \cdot \Delta T^{-38,03} \cdot e^{(3,27 \cdot 10^{-1}) \cdot (k_b \cdot T_{max})^{-1}}$	316,0 h	22,0 %
Norris- Landzberg mod.	$L_{h} = 4,88 \cdot 10^{-15} \cdot \Delta T^{19,50} \cdot t_{h}^{-7,86} \cdot e^{(1,76 \cdot 10^{-1}) \cdot (k_{b} \cdot T_{max})^{-1}}$	247, 5 h	-4,5 %
Bayerer 2	$L_{h} = 1,15 \cdot 10^{11} \cdot \Delta T^{3,54 \cdot 10^{-2}} \cdot \\ \cdot ar^{(5,88 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta T + 0,19 \cdot T_{max} + 0,50)} \cdot t_{h}^{0,88} \cdot \\ \cdot e^{(2,90 \cdot 10^{-2}) \cdot (k_{b} \cdot T_{max})^{-1}} \cdot I^{-4,89}$	290,8 h	12,2 %
Bayerer 1	$L_{h} = 1.14 \cdot 10^{11} \cdot \Delta T^{8,85 \cdot 10^{2}} \cdot ar^{(0,26 \cdot \Delta T + 0.50)} \cdot t_{h}^{-1.47 \cdot 10^{2}} \cdot e^{(6,21 \cdot 10^{-2}) \cdot (k_{b} \cdot T_{max})^{-1}} \cdot I^{0,81}$	294,4 h	13,6 %

Tabelle 7: Übeı	sicht de	r untersucht	en	Raffungsmodelle	mit	berechneten	Parametern,
Lebe	nsdauerv	orhersage in	un	nd Abweichung zu	m rea	alen Versuch i	n

Bild 96 stellt zusätzlich die unterschiedlichen Lebensdauerverläufe sowie die ermittelte mittlere Lebensdauer bei der Verifikation mittels Temperaturwechsel bei einer maximalen Temperatur von 105 °C sowie einer Temperaturänderung von $\Delta T = 145$ °C dar. Deutlich ist die Abweichung der Modelle nach Arrhenius- und Coffin-Manson zu erkennen. Darüber hinaus überschätzen die Modelle nach Norris-Landzberg sowie die beiden Bayerer-Modelle die tatsächliche Lebensdauer. Im Gegensatz dazu verläuft der durch das modifizierte Norris-Landzberg-Modell prognostizierte Verlauf durch die gemessene mittlere Lebensdauer des Versuchs bei einer Maximaltemperatur von 105 °C. Davon abgesehen erlaubt der quadratische Ansatz des Bayerer-2-Modells eine bessere Anpassung an die tatsächlich auftretende Lebensdauerkurve.



Bild 96: Verifikation der Lebensdauervorhersage für eine maximal Temperatur von $T_{max} = 105$ °C und einer Temperaturänderung von $\Delta T = 145$ °C

Kombination mit der CALT-Methodik

Bei der Kombination der Raffungsmodelle mit der Methodik der Lebensdauermodelle wird das erfolgreich kalibrierten verifizierte modifizierte Norris-Landzberg-Modell angewandt. Dabei basiert die Lebensdauervorhersage nur noch auf den bei 85,2 %- beziehungsweise 92.5 %-Niveau der Belastungsgrenze durchgeführten Temperaturwechseltests. Bild 97 stellt die Lebensdauervorhersage des modifizierten Norris-Landzberg-Modells dar. Auch Basis auf von nur zwei durchgeführten Lebensdauertests liegt die Lebensdauerkurve des Raffungsmodelles in der Nähe der gemittelten Lebensdauer für eine maximale Temperatur von 105 °C. Die berechnete Lebensdauer des Modells beträgt 246,2 h. Damit ergibt sich eine Abweichung zur tatsächlichen mittleren Lebensdauer von -5 %. Auch hier unterschätzt das Modell die Lebensdauer konservativ, was als unkritisch zu bewerten ist. Zusammenfassend zeigt sich, dass auf Basis von zwei Lebensdauertests bei der Wahl eines geeigneten Modells ebenfalls eine Lebensdauervorhersage mit ausreichender Genauigkeit möglich ist.



Bild 97: Kombination des passenden Raffungs-Modells mit der kalibrierten Lebensdauermethodik und Vorhersage der Lebensdauer für eine Maximaltemperatur von $T_{max} = 105$ °C und einer Temperaturänderung von $\Delta T = 145$ °C

6.3 Vergleich zwischen konventioneller und kombinierter CALT-Methodik

Bild 98 zeigt den Vergleich der Lebensdauerverläufe und -vorhersagen zwischen konventioneller CALT-Methodik und der kombinierten CALT-Methodik bei der die Lebensdauerberechnung mittels des modifizierten Norris-Landzberg-Modells erfolgt. Dabei weicht die durch konventionelles CALT vorhergesagte Lebensdauer von 229,8 h mit -11,3 % von der tatsächlichen mittleren Lebensdauer ab. Damit liegt die Genauigkeit der konventionellen CALT-Methodik auf dem Niveau der modifizierten Bayerer-Raffungsmodelle. Geht man allerdings von einem wie vom modifizierten Norris-Landzberg prognostizierten weiteren Verlauf bei geringeren Temperaturen aus, nimmt die Genauigkeit der konventionellen kalibrierten Lebensdauertests stark ab. Dies führt dazu, dass die Lebensdauer bei Feldbedingungen drastisch unterschätzt wird. Im Gegensatz dazu bietet die kombinierter CALT-Methodik eine geringe Abweichung von circa – 5 %. Der Nachteil der zur Beurteilung der Anwendbarkeit der Raffungsmodelle notwendigen zusätzlichen Versuche wird durch die bessere Genauigkeit sowie die höhere Zuverlässigkeit der Vorhersage kompensiert. Vor allem bei komplexen Schädigungsmechanismen wie der *Reibkorrosion* ist es zwingend notwendig, bei neuen Produkten den zusätzlichen Aufwand in ein verifiziertes und genaues Modell zu investieren, um bereits in einem frühen Stadium der Entwicklung eine belastbare Aussage über die Lebensdauer zu generieren.



Bild 98: Vergleich der Lebensdauervorhersage mittels konventioneller und kombinierter CALT-Methodik für eine Maximaltemperatur von $T_{max} = 105$ °C und einer Temperaturänderung von $\Delta T = 145$ °C

6.4 Zusammenfassung

Im voranstehenden Kapitel wurde zuerst die konventionelle CALT-Methodik Steckverbinderkontakten während thermischer bei Temperaturwechseltests eingesetzt. Anschließend wurden für Steckkontakte relevante Raffungsmodelle angewandt und mit den kalibrierten Lebensdauertests kombiniert. Dabei resultierte die konventionelle CALT-Methodik in einer Lebensdauervorhersage mit einer Mittelwertabweichung von unter -15 % zu den in den Versuchen ermittelten Allgemeinen gewährleistet Lebensdauern. Im die konservative Abschätzung, das heißt die Unterschätzung der tatsächlich auftretenden Lebensdauer, eine zusätzliche Sicherheit bei der Auslegung von Bauteilen.

Anschließend wurde die Anwendbarkeit von Raffungsmodellen zur Lebensdauervorhersage auf die untersuchten Steckverbinderkontakte einzeln analysiert. Hierbei war das modifizierte Norris-Landzberg-Modell in der Lage, die Lebensdauer mit einer Abweichung von unter [5] % zu prognostizieren. Das Modell unterschätzte die tatsächliche mittlere Lebensdauer ebenfalls konservativ und erwies sich als geeignetes Modell die Lebensdauerabschätzung der analysierten Steckverbinderfür Kontakte. Da je nach Art des Kontakts die Genauigkeit des Modells jedoch abweichen kann, sind auch die untersuchten modifizierten Baverer-Modelle nicht zu vernachlässigen. Vor allem bei Kontakten **Z**11**r** Leistungsübertragung oder für Hochvoltanwendungen sowie der Aufnahme von Derating-Kurven ist der enthaltene Stromstärke-Term von Bedeutung. Je nach Verlauf der Lebensdauerkurve können bei diesen Modellen zusätzlich die Konstanten des Geometriefaktors linear oder quadratisch die Gleichung eingehen. wodurch in weitere Anpassungsmöglichkeiten bei der Lebensdauerprognose geboten werden.

Die Kombination der kalibrierten Lebensdauertestmethodik mit den berechneten Raffungsmodellen verbessert die Vorhersagegenauigkeit im Vergleich zur konventionellen CALT-Methodik deutlich. Die Abweichung zur gemittelten Lebensdauer des Validierungsversuches konnte halbiert werden und liegt ebenfalls bei circa -5%. Allerdings ist auch bei der kombinierten Methodik die Wahl des geeigneten Modells von größter Bedeutung. Insgesamt können drei essenzielle Punkte zusammengefasst werden:

- Lebensdauervorhersage von Steckkontakten mithilfe von Raffungsmodellen ist möglich.
- Wahl eines geeigneten Modells ist von essenzieller Bedeutung.
- Kombination von Raffungsmodellen mit der CALT-Methodik resultiert in einem effizienten Vorgehensmodell.

Zusammenfassend kann angemerkt werden, dass die Kombination aus kalibrierten Lebensdauertests und analytischen Raffungsmodellen ein effektives Mittel zur Beurteilung der Bauteilzuverlässigkeit darstellt. Umfassende Qualifizierungsmaßnahmen vor dem Einsatz im Feld von elektrischen und elektronischen Komponenten kann und sollte die Methodik jedoch nicht ersetzen. Dennoch eignet sich das Vorgehensmodell explizit für den frühen Entwicklungsprozess und die Erforschung neuer Kontaktierungslösungen, da auf eine methodische, aber dennoch Weise eine Aussage über die zeitsparende Z11 erwartende Langzeitzuverlässigkeit ermöglicht wird.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde ein dreigliedriges Lösungssystem für thermische Lebensdaueruntersuchungen an automobilen Steckkontakten entwickelt und analytisch beurteilt. Das System beruhte dabei auf drei evolutionär entwickelten, aber dennoch unabhängig einsetzbaren Methoden zur Beschleunigung von thermischen Qualifizierungstests.

Die Entkopplung der Einflüsse auf Steckverbinderkontakte durch einen entwickelten, vereinfachten Versuchsaufbau, bei dem Mikrobewegungen bei konstant erhöhter Temperatur in die Kontaktzone eingebracht wurden, konnte trotz hochgenauem Linearmotor keine statistisch signifikanten Beschädigungen auslösen. Hierfür zeichnete sich das Fehlen des auch bei konventionellen thermischen Tests, welche bei Luftfeuchtigkeitsklassen von 45 % bis 65 % durchgeführt werden, auftretenden Durchschreitens des Taupunktes in Verbindung mit Kondensation von Feuchtigkeit in der Kontaktzone verantwortlich.

Im Zuge der zweiten Methode wurde das Pkw-Nutzungsverhalten in Europa analysiert und in realitätsnahe Lastprofile übertragen. Diese wurden in Relativbewegungstests bei konstant erhöhter Temperatur getestet. Hierbei konnten ebenfalls keine signifikanten Widerstandserhöhungen oder relevanten Beschädigungen in den Kontaktzonen ausgelöst werden. Deshalb wurde zusätzlich ein besonders auf das Durchschreiten des Taupunkts ausgelegtes Lastprofil entwickelt. Mithilfe dieses auf thermischen Zyklen beruhenden Lastprofils, wurde zum einen nachgewiesen, dass während der Temperaturwechselzyklen Feuchtigkeit auf den Kontakten kondensiert. Zum anderen konnte eine Beschleunigung der Ausfälle im Vergleich zu regulären Temperaturwechseltests erzielt werden.

Die dritte Methodik beruht auf der Kombination von kalibrierten Lebensdauertests (CALT), bei welchen die Anzahl an benötigten Tests drastisch reduziert wird. mit analytischen Methoden zur Lebensdauervorhersage, den Raffungsmodellen. Dabei erwies sich das modifizierte Norris-Landzberg-Modell als ein Modell von sechs getesteten für den Anwendungsfall der Steckverbinderkontakte als geeignet, die Lebensdauer vorherzusagen. Neben der Genauigkeit des Models wurde ebenfalls auf eine konservative Abschätzung der Lebensdauer geachtet. Im direkten Vergleich mit der konventionellen CALT-Methodik konnte die Vorhersagegenauigkeit deutlich verbessert werden.

Der Einsatz der mit Raffungsmodellen kombinierten CALT-Methodik stellt daher eine vielversprechende Möglichkeit dar, um während der Entwicklung neuer Kontaktierungstechniken eine Hilfestellung bei der Beurteilung der Lebensdauer zu leisten. Neuartige Anwendungsfälle stellen allem Neuund Weiterentwicklungen von elektrischen vor Kontaktierungen für additiv gedruckte Leiterbahnen dar. Somit kann in Forschungsprojekten bereits während der Entwicklungsphase methodisch eine Aussage über die Lebensdauer getroffen, Fehler in der Konstruktion oder Materialauswahl aufgedeckt und insgesamt robuste Lösungen für die Anwendungsfälle Automobil und Luftfahrt generiert werden.

Zukünftige Forschungsansätze sollten die weitere Verifikation der zugrunde liegenden Schädigungsmechanismen zum Gegenstand haben. Vor allem in Kombination mit gedruckter Elektronik ist noch kein ausreichendes Wissen über die Wechselwirkungen in den Schnittstellen zwischen Kontaktierung und gedruckter Leiterbahn vorhanden. Des Weiteren muss ebenfalls der Einfluss der Geometrie auf die analytischen Modelle tiefgreifender untersucht werden. Dies ist vor allem vor dem Hintergrund der voranschreitenden Miniaturisierung im automobilen Bordnetzbereich von Bedeutung. Abschließend ist anzumerken, dass bisher nicht ausreichend tiefe wissenschaftliche Untersuchungen über die Anwendung von Raffungsmodellen auf zyklische Feuchtewärmetests für Steckkontakte existieren.

8 Summary and outlook

This thesis developed and analytically evaluated a three-part solution system for lifetime testing of automotive connectors. The system was based on three consecutive but independent methods for accelerating thermal qualification tests.

The separation of influences on connector contacts by a developed simplified test setup, which introduces micro movements in the contact zone at constant elevated temperatures, was not able to cause statistically significant damage. This was due to the fact that even conventional thermal tests, which are carried out at humidity levels of 45 % to 65 %, reach the dew point and moisture condenses in the contact zone.

The second method analyzed the car usage behavior in Europe and transferred it to more realistic load profiles. These were carried out in relative motion tests at constant elevated temperatures. Again, no significant increase in resistance or damage in the contact zones could be determined. Therefore, an additional load profile especially designed for passing the dew point was developed. With this load profile based on thermal cycles, it was on the one hand possible to demonstrate that moisture precipitated on the contacts during temperature cycling. On the other hand, an acceleration of damage mechanisms could be achieved in comparison to regular thermal cycling tests.

The third methodology was based on combining calibrated lifetime tests (CALT), in which the number of required tests is drastically reduced, with analytical methods for lifetime prediction, the acceleration models. Out of six models, the modified Norris-Landzberg model proved suitable for predicting the lifetime of the given connector application. In addition to the accuracy of the model, it estimated the lifetime conservatively. In direct comparison with the conventional CALT-methodology, the combined method dramatically improved the prediction accuracy.

The use of the CALT methodology combined with acceleration models constitutes a promising way to assist life-time assessment during the development of new contacting technologies. Novel applications are mainly new development and further improvement of electrical contacts for electronics manufactured by additive printing processes. Thus, during development, research projects can already make a methodical lifetime prognosis, detect errors in design or material selection, and generate overall robust solutions for automotive and aerospace applications. Future research should focus on the further verification of the underlying damage mechanisms. Especially in combination with printed electronics, insufficient knowledge about the interactions at the interfaces between contact and printed circuits exists. Furthermore, the influence of the geometry on the analytical models has to be investigated more profoundly. This proofs especially important regarding the advancing miniaturization in the field of automotive wiring systems. Finally, it is worth noting that a lack in scientific research exists for the application of accelerated test models to cyclic humidity tests of contacts.

Literaturverzeichnis

[1] DEUTSCHE AUTOMOBIL TREUHAND GMBH, Hg. DAT Report 2020. Ostfildern, 2020 [2] LINß, G. Qualitätssicherung - Technische Zuverlässigkeit. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2016. ISBN 978-3-446-44052-4 [3] HEURUNG, T. Kostenfaktor Kabelbaum. automobil elektronik, 2016(14), S. 32-35 [4] RAMBO, S. Shedding Pounds In Automotive Electronics [online]. Weight is suddenly a major concern for carmakers, but slimming down has repercussions., 2019 [Zugriff am: 10. August 2020] [5] CANKUT, Y. Kabelbäume automatisiert fertigen [online]. ATZproduktion, 2011, 4(1), S. 28-31. ISSN 1865-4908. Verfügbar unter: doi:10.1365/\$35726-011-0008-1 [6] HORN, J. und M. ECKL. Steckverbinder in der automobilen Anwendung. Seminar. Düsseldorf, 2020 [7] International Organization for Standardization ISO, ISO 26262:2011: 11.2011, Road vehicles - Functional safety. Genf [8] HORNFECK, U. Paradigmenwechsel im Bordnetz [online]. ATZelektronik, 2014, 9(6), S. 70. ISSN 1862-1791 [Zugriff am: 10. August 2020]. Verfügbar unter: doi:10.1365/s35658-014-0512-7 [9] BORGEEST, K. Elektronik in der Fahrzeugtechnik. Hardware, Software, Systeme und Projektmanagement; mit 28 Tabellen. 4., aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2021. ATZ-MTZ Fachbuch. ISBN 978-3-658-23663-2 [10] DERR, J.H., C.M. STRAUB und S. AHMED. Prediction of Wiring Harness Reliability. In: SAE Technical Paper Series. Warrendale, PA, USA: SAE International, 1987, 218-226. Verfügbar unter: doi:10.4271/870055 [11] BERNHART, W., J.-P. HASENBERG, M. WINTERHOFF und L. FAZEL. A CEO agenda for the [®]evolution of the automotive ecosystem. München, 2016

- [12] GORELIK, K., A. KILIC, R. OBERMAISSER und N. MÜLLER. Modellprädiktives Energiemanagement mit Steuerung der Fahrzeugführung für automatisiertes Fahren [online]. *at -Automatisierungstechnik*, 2018, 66(9), S. 735-744. ISSN 0178-2312. Verfügbar unter: doi:10.1515/auto-2018-0025
- [13] GORELIK, K., A. KILIC und R. OBERMAISSER. Connected Energy Management System for Automated Electric Vehicles With Fail-Operational Powertrain and Powernet [online]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(10), S. 9588-9603. ISSN 0018-9545. Verfügbar unter: doi:10.1109/TVT.2019.2934777
- [14] JAHN, H. Erzeugnisqualität, die logische Folge von Arbeitsqualität. VDI-Z, 1988, 130(4), S. 12-15
- SCHMITT, R. und T. PFEIFER. Qualitätsmanagement. Strategien, Methoden, Techniken. 5., überarbeitete Auflage. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2015. ISBN 9783446440821
- [16] MATZNER, C. Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betauung in Automobil. Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2010. Bamberg: Meisenbach, 2010. Bericht aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik. 215. ISBN 9783875253092
- PECHT, M. Handbook of Electronic Package Design. Boca Raton: Chapman and Hall/CRC, 2018. Mechanical Engineering Ser. v.76. ISBN 9781351838412
- [18] PISCHINGER, S. und U. SEIFFERT. Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016. ISBN 978-3-658-09527-7
- [19] FELDMANN, K., V. SCHÖPPNER und G. SPUR. Handbuch Fügen, Handhaben und Montieren. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2013. ISBN 978-3-446-42827-0
- [20] FEY, M., J. FRITZGES, I. GALIC und D. KÄMMERER.
 Ultraschallschweißen in der Automobilproduktion [online]. ATZ extra, 1. November 2018, 2018(Sonderheft 11/2018)
- [21] NGUYEN, H., M. MEINERS, L. SCHMIDT und J. FRANKE. Deep learning-based automated optical inspection system for crimp connectors. To be published. In: 2020 10th International Electric Drives Production Conference, EDPC 2020, 2020

- BABIEL, G. Bordnetze und Powermanagement. Thermische Modellbildung für elektrische und elektronische Bauelemente. 2. Aufl. 2019. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019. ISBN 9783658211424
- BÖR, J. Kabel und Leitungen für bewegte Industrieanwendungen. Im Zeitalter von Industrie 4.0. Berlin: VDE Verlag GmbH, 2018. ISBN 9783800743803
- [24] KATZIER, H. Elektrische Kabel und Leitungen. Technologien, Anwendungen und Anforderungen. Erste Auflage. Bad Saulgau: Leuze Verlag, 2015. ISBN 9783874802840
- [25] BRAUNKABEL. *BKData* [online]. *Ethernet CAT. 5e i x 4 x 26/7 AWG PVC*, 2017 [Zugriff am: 2. Dezember 2019]
- [26] MROCZKOWSKI, R.S. Electronic connector handbook. Theory and applications. New York, NY, USA: McGraw Hill, 1998.
 Electronic packaging and interconnection series. ISBN 0070414017
- [27] SWINGLER, J. The automotive connector: The influence of powering and lubricating a fretting contact interface [online]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2000, 214(6), S. 615-623. ISSN 0954-4070. Verfügbar unter: doi:10.1243/0954407001527484
- [28] VINARICKY, E., Hg. Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen. Grundlagen, Technologien, Pr
 üfverfahren. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016. ISBN 9783642454271
- [29] ENDRES, H. und T. BEST, Hg. Praxishandbuch Steckverbinder.
 Würzburg: Vogel Business Media, 2018. Ein Fachbuch von Elektronik Praxis. ISBN 9783834362384
- [30] KATZIER, H. Elektrische Steckverbinder. Technologien, Anwendungen und Anforderungen. Bad Saulgau: Leuze Verlag, 2012. ISBN 9783874802734
- [31] MROCZKOWSKI, R.S. Trilogie der Steckverbinder. Applikationshandbuch zur optimierten Steckverbinderauswahl ; Steckverbindergrundlagen und Designkriterien. 2., erw. und überarb. Aufl. Künzelsau: Swiridoff, 2013. ISBN 9783899292008

- BEHRENS, V., Hg. Elektrische Kontakte. Werkstoffe, Gestaltungen und Anwendungen in der Nachrichten-, Automobilund Energietechnik ; mit ... 30 Tabellen. 3., völlig neubearbeitete Auflage. Renningen: expert-Verlag, 2010. Kontakt & Studium. 366. ISBN 9783816922926
- [33] VINARICKY, E., G. HORN und V. BEHRENS, Hg. Datenbuch der elektrischen Kontakte. Kontaktwerkstoffe, Halbzeuge, Kontaktteile, Kunststoff-Metall-Verbundteile, Beschichtungen, Galvanikprodukte, Edelmetall-Recycling : Daten, Eigenschaften, Anwendungen, Normen. Überarbeitete 3. Auflage. Mühlacker: Stieglitz Verlag, 2012. ISBN 3798704104
- [34] KATZIER, H. *Fehlerbilder bei Steckverbindern*. Workshop. Würzburg, 3. Juli 2018. Anwenderkongress Steckverbinder 2018
- BLUMENROTH, F., H. LÖBL, S. GROßMANN und M. KUDOKE.
 Influence of stress relaxation and sliding on long time behaviour of plug-in power connectors with helical springs. In: 24th
 International Conference on Electrical Contacts, 2008, S. 368-373
- [36] BLUMENROTH, F., H. LOEBL, S. GROßMANN und M. KUDOKE. Spannungsrelaxation an Kontaktelementen in Steckverbindungen der Elektroenergietechnik. Metall, 2008, 62, S. 631-636
- [37] BOWDEN, F.P. und D. TABOR. *The friction and lubrication of solids*. Oxford: Oxford university press, 2001. Oxford classic texts in the physical sciences. ISBN 0198507771
- [38] ZHANG, J.-G. *The application and mechanism of lubricants on electrical contacts.* In: *Proceedings of IEEE Holm Conference on Electrical Contracts.* Piscataway, NJ: IEEE, 1994, S. 145-154. ISBN 0-7803-2133-2. Verfügbar unter: doi:10.1109/HOLM.1994.636831
- [39] BRAUNOVIC, M. Fretting damage in tin-plated aluminum and copper connectors. In: Proceedings of the Thirty Fourth Meeting of the IEEE Holm Conference on Electrical Contacts: IEEE, 1988, S. 179-186. Verfügbar unter: doi:10.1109/HOLM.1988.16114
- [40] DAIMLER AG. CASE Intuitive Mobilität [online]. Connected, Autonomous, Shared, Electric, 2017 [Zugriff am: 2. Dezember 2019]

- [41] GROMALA, P., F. DIETZ, S. RZEPKA und B. HAN. Concept of the 3 rd Generation of Reliability for Electronic Smart Systems. In: 18th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm). Piscataway, NJ: IEEE, 2019, S. 917-922. ISBN 978-1-7281-2461-2. Verfügbar unter: doi:10.1109/ITHERM.2019.8757462
- [42] MALUCCI, R.D. The impact of contact resistance on high speed digital signal transmission. In: Proceedings of the Forty-Eighth IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Piscataway, NJ: IEEE, 2002, S. 212-220. ISBN 0-7803-7433-9. Verfügbar unter: doi:10.1109/HOLM.2002.1040844
- [43] ZVEI ZENTRALVERBAND ELEKTROTECHNIK- UND ELEKTRONIKINDUSTRIE E. V., Hg. Spannungsklassen in der Elektromobilität. Frankfurt am Main, 2013
- [44] KUME, H. *Tesla teardown finds electronics 6 years ahead of Toyota and VW* [online], 2020 [Zugriff am: 18. August 2021]
- [45] TAUBE, J. und L. TIPPE. *Bordnetz-Topologien* [online] [Zugriff am: 18. August 2021]
- [46] WORTBERG, M., P. THOMA und A. BACHMEIER. Bordnetzarchitekturen - Von der Evolution zur Revolution. ATZelektronik, 04.2016, 11. Jahrgang, S. 26-33
- [47] RESEARCH AND MARKETS. Global Automotive Wiring Harness Market Report 2021 with Focus on China [online]. Adoption of Wireless Communication to Reduce the Use of Automotive Wiring Harness, 2021
- [48] ARBIB, J. und T. SEBA. *Rethinking Transportation 2020-2030*. *The Disruption of Transportation and the Collapse of the Internal*-*Combustion Vehicle and Oil Industries*, 2017
- [49] YANG, G. *Life cycle reliability engineering*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Inc, 2007. ISBN 9780471715290
- [50] NEHER, W. Zuverlässigkeitsbetrachtungen an Aufbau- und Verbindungstechnologien für elektronische Steuergeräte im Kraftfahrzeug unter Hochtemperaturbeanspruchungen. Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2006. Templin: Detert, 2006. Themenreihe. 14. ISBN 9783934142206

- [51] KNOBLAUCH, G. Steckverbinder II. Theorie der Kontakte, neue Technologien, Produkte und Management-Konzepte. 4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Renningen: expert-Verlag, 2016. Kontakt & Studium. 583. ISBN 9783816932888
- [52] SYED, A. Limitations of Norris-Landzberg equation and application of damage accumulation based methodology for estimating acceleration factors for Pb free solders. In: 11th International Thermal, Mechanical & Multi-Physics Simulation, and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE). Piscataway, NJ: IEEE, 2010, S. 1-11
- [53] Volkswagen AG, VW 75174: 10.2018, *Kfz-Steckverbinder -Prüfungen*
- [54] BERTSCHE, B. und G. LECHNER. Zuverlässigkeit im Fahrzeugund Maschinenbau. Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage.
 Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2004. VDI-Buch. ISBN 9783540208716
- [55] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 62506:
 03.2014, Verfahren für beschleunigte Produktprüfungen (IEC 62506:2013). Berlin: Beuth Verlag GmbH. Verfügbar unter:
 doi:10.31030/2083259
- [56] ESCOBAR, L.A. und W.Q. MEEKER. A Review of Accelerated Test Models [online]. *Statistical science*, 2006, 21(4), S. 552-577. Verfügbar unter: doi:10.1214/08834230600000321
- [57] MEYNA, A. und B. PAULI. Taschenbuch der Zuverlässigkeits- und Sicherheitstechnik. Quantitative Bewertungsverfahren ; mit 37 Tabellen und 98 Beispielen mit Lösungen. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2003. Praxisreihe Qualitätswissen. ISBN 3446224742
- [58] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN 40041: 12.1990, Zuverlässigkeit - Begriffe. Berlin: Beuth Verlag GmbH. Verfügbar unter: doi:10.31030/2386665
- [59] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 60512-2-2:
 01.2004, Steckverbinder für elektronische Einrichtungen Mess- und Prüfverfahren Teil 2-2: Prüfungen des elektrischen Durchgangs und Durchgangswiderstands. Berlin: Beuth Verlag GmbH. Verfügbar unter: doi:10.31030/9522679

- [60] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 60512-2-1: 01.2003, Steckverbinder für elektronische Einrichtungen Mess- und Prüfverfahren Teil 2-1: Prüfungen des elektrischen Durchgangs und Durchgangswiderstands. Berlin: Beuth Verlag GmbH. Verfügbar unter: doi:10.31030/9390372
- [61] WEICHERT, N. und M. WÜLKER. Messtechnik und Messdatenerfassung. München: Oldenbourg, 2010. Oldenbourg-Lehrbücher für Ingenieure. ISBN 9783486251029
- [62] Volkswagen AG, VW 80000: 06.2013, Elektrische und elektronische Komponenten in Kraftfahrzeugen bis 3,5 t -
- [63] VAN BASSHUYSEN, R. und F. SCHÄFER, Hg. Handbuch Verbrennungsmotor. Grundlagen, Komponenten, Systeme, Perspektiven. 8. überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017. ATZ / MTZ-Fachbuch. ISBN 9783658109011
- [64] International Organization for Standardization ISO, ISO 16750-4:2010: 04.2010, Road vehicles - Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment. Genf
- [65] Daimler Chrysler, DC-10611 Rev-A: 09.2003, Umweltprüfanforderungen für EIE-Komponenten
- [66] HERING, E., K. BRESSLER und J. GUTEKUNST, Hg. Elektronik für Ingenieure und Naturwissenschaftler. 7., aktualisierte und verbesserte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2017. ISBN 9783662542132
- [67] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN ISO 857-2:2007-03: 03.2007, Schweißen und verwandte Prozesse_- Begriffe_-Teil_2: Weichlöten, Hartlöten und verwandte Begriffe (ISO_857-2:2005). Berlin: Beuth Verlag GmbH. Verfügbar unter: doi:10.31030/9780697
- [68] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 60352-1: 04.1998, Lötfreie Verbindungen - Teil 1: Wickelverbindungen; Allgemeine Anforderungen; Prüfverfahren und Anwendungshinweise. Berlin: Beuth Verlag GmbH. Verfügbar unter: doi:10.31030/7455343

- [69] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 60352-5:
 10.2012, Lötfreie Verbindungen Teil 5: Einpressverbindungen Allgemeine Anforderungen, Prüfverfahren und Anwendungshinweise. Berlin: Beuth Verlag GmbH. Verfügbar unter: doi:10.31030/1907172
- [70] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 60352-3:
 05.1995, Lötfreie elektrische Verbindungen Teil 3 Lötfreie zugängliche Schneidklemmverbindungen Allgemeine Anforderungen, Prüfverfahren und Anwendungshinweise. Berlin: Beuth Verlag GmbH. Verfügbar unter: doi:10.31030/2783388
- [71] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 60352-4:
 09.2001, Lötfreie elektrische Verbindungen Teil 4 Lötfreie nichtzugängliche Schneidklemmverbindungen Allgemeine Anforderungen, Prüfverfahren und Anwendungshinweise. Berlin: Beuth Verlag GmbH. Verfügbar unter: doi:10.31030/9179908
- [72] JÖRGENS, S. Insulation displacement technology as technically equivalent and more cost-effective alternative compared to crimping technology. In: Proceedings of the 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts and the 22nd International Conference on Electrical Contacts. Piscataway, NJ: IEEE, 2004, S. 421-428. Verfügbar unter: doi:10.1109/HOLM.2004.1353151
- [73] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 60352-2: 04.2014, Lötfreie Verbindungen - Teil 2 Crimpverbindungen -Allgemeine Anforderungen, Prüfverfahren und Anwendungshinweise. Berlin: Beuth Verlag GmbH. Verfügbar unter: doi:10.31030/2089900
- [74] DIN Deutsches Institut f
 ür Normung e. V., DIN EN 60352-7:2003-07: 07.2003, L
 ötfreie Verbindungen - Teil 7: Federklemmverbindungen. Berlin: Beuth Verlag GmbH. Verf
 ügbar unter: doi:10.31030/9484855
- [75] ZVEI ZENTRALVERBAND ELEKTROTECHNIK- UND ELEKTRONIKINDUSTRIE E. V., Hg. *Die Welt der Steckverbinder. Technologien und Trends.* Frankfurt am Main, 2015
- [76] HOLM, R. *Electric contacts:. Theory and application.* 4. compl. rewritten ed. Berlin [u.a.]: Springer, 1967. ISBN 9783662066881
- [77] BRAUNOVIC, M., N. MYSHKIN und V. KONCHITS. *Electrical Contacts.* Boca Raton: CRC Press, 2006. 20066652. ISBN 9781574447279
- [78] GREENWOOD, J.A. Constriction resistance and the real area of contact [online]. *British Journal of Applied Physics*, 1966, 17(12), S. 1621-1632. ISSN 0508-3443. Verfügbar unter: doi:10.1088/0508-3443/17/12/310
- [79] HOLM, R. Die technische Physik der elektrischen Kontakte.
 Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1941. ISBN 978-3-662-42222-9
- [80] KEIL, A. *Werkstoffe für elektrische Kontakte*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1960. 16
- [81] DETERS, L., A. FISCHER, E. SANTNER und U. STOLZ.
 Arbeitsblatt 7 Tribologie [online]. Definitionen, Begriffe, Prüfung, 2002(Arbeitsblatt 7)
- [82] LANGE, G. und M. POHL, Hg. Systematische Beurteilung technischer Schadensfälle. 6. Aufl. Weinheim [u.a.]: Wiley-VCH, 2014. ISBN 9783527325306
- [83] WAHL, W. Abrasive Verschleißschäden und ihre Verminderung.
 In: Methodik der Schadensuntersuchung. VDI-Tagung Stuttgart 1975. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1975, S. 171-187. ISBN 3180902434
- [84] SLADE, P.G., Hg. Electrical contacts. Principles and applications. Second edition, first issued in paperback. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2014. ISBN 9781138077102
- [85] FOX, A. Stress Relaxation and Fatigue of Two Electromechanical Spring Materials Strengthened by Thermomechanical Processing [online]. *IEEE Transactions on Parts, Materials and Packaging,* 1971, 7(1), S. 34-47. ISSN 0018-9502. Verfügbar unter: doi:10.1109/TPMP.1971.1136441
- [86] ANTLER, M. und M.H. DROZDOWICZ. Wear of Gold Electrodeposits: Effect of Substrate and of Nickel Underplate [online]. *Bell System Technical Journal*, 1979, 58(2), S. 323-349.
 ISSN 00058580. Verfügbar unter: doi:10.1002/j.1538-7305.1979.tb02223.x

- [87] TOMLINSON, G.A. The Rusting of Steel Surfaces in Contact
 [online]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical,
 Physical and Engineering Sciences, 1927, 115(771), S. 472-483. ISSN 1364-5021. Verfügbar unter: doi:10.1098/rspa.1927.0104
- [88] BRAUNOVIC, M. Fretting in Electrical/Electronic Connections: A Review [online]. *IEICE Transactions on Electronics*, 2009, E92-C(8), S. 982-991. ISSN 0916-8524. Verfügbar unter: doi:10.1587/transele.E92.C.982
- [89] BRAUNOVIC, M. Fretting damage in tin-plated aluminum and copper connectors [online]. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology,* 1989, 12(2), S. 215-223.
 ISSN 01486411. Verfügbar unter: doi:10.1109/33.31426
- [90] GAGNON, D. und M. BRAUNOVIC. Fretting in copper-to-copper contacts under AC and DC current conditions. In: Electrical Contacts - 2000. Proceedings of the Forty-Sixth IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Piscataway, NJ: IEEE, 2000, S. 247-253. ISBN 0-7803-5960-7. Verfügbar unter: doi:10.1109/HOLM.2000.889938
- [91] DEYBER, P. Möglichkeiten zur Einschränkung von Schwingungsverschleiß. Reibung und Verschleiß von Werkstoffen, Bauteilen und Konstruktionen, Federführender Autor H. Czichos, Grafenau: Expert-Verlag, 1982, S. 149
- [92] CZICHOS, H. und K.-H. HABIG. *Tribologie-Handbuch. Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik.* 5th ed. 2020. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2020. ISBN 9783658294847
- [93] ANTLER, M. Electrical effects of fretting connector contact materials: A review [online]. *Wear*, 1985, 106(1-3), S. 5-33. ISSN 00431648. Verfügbar unter: doi:10.1016/0043-1648(85)90101-2
- [94] ABBOTT, W.H. Materials, environment, motion, and electrical contact failure mechanisms. In: Proceedings of the Thirty Fifth Meeting of the IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Piscataway, NJ: IEEE, 1989, S. 3-11. Verfügbar unter: doi:10.1109/HOLM.1989.77913
- [95] HERMANCE, H.W. und T.F. EGAN. Organic Deposits on Precious Metal Contacts [online]. *Bell System Technical Journal*, 1958, 37(3), S. 739-776. ISSN 00058580. Verfügbar unter: doi:10.1002/j.1538-7305.1958.tb03885.x

- [96] ANTLER, M. und M.H. DROZDOWICZ. Fretting corrosion of gold-plated connector contacts [online]. Wear, 1981, 74(1), S. 27-50. ISSN 00431648. Verfügbar unter: doi:10.1016/0043-1648(81)90192-7
- [97] NOBEL, F. Electroplated Palladium-Silver (60/40 wt%) Alloy as a Contact Metal [online]. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology,* 1985, 8(1), S. 163-172.
 ISSN 01486411. Verfügbar unter: doi:10.1109/TCHMT.1985.1136468
- [98] ANTLER, M. Fretting of electrical contacts: An investigation of palladium mated to other materials [online]. *Wear*, 1982, 81(1), S. 159-173. ISSN 00431648. Verfügbar unter: doi:10.1016/0043-1648(82)90312-X
- [99] ANTLER, M. Fretting Corrosion of Solder-Coated Electrical Contacts [online]. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology,* 1984, 7(1), S. 129-138. ISSN 01486411. Verfügbar unter: doi:10.1109/TCHMT.1984.1136330
- KONGSJORDEN, H., J. KULSETAS und J. SLETBAK. Degradation of Electrical Contacts Caused by Oscillatory Micromotion Between the Contact Members [online]. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology,* 1979, 2(1), S. 32-36. ISSN 01486411. Verfügbar unter: doi:10.1109/TCHMT.1979.1135432
- YUAN, H., J. SONG und V. SCHINOW. Fretting corrosion of tin coated electrical contacts: The influence of normal force, coating thickness and geometry of sample configuration. In: I.H.C.o.E. CONTACTS, Hg. Electrical contacts - 2016. Proceedings of the Sixty-second IEEE Holm Conference on Electrical Contacts : held 9-12 October 2016, Hilton Hotel, Clearwater Beach, Florida, USA. Piscataway, NJ: IEEE, 2016, S. 33-38. ISBN 978-1-5090-5075-8. Verfügbar unter: doi:10.1109/HOLM.2016.7780003
- BOWDEN, F.P. und WILLIAMSON J.B.P. Electrical conduction in solids I. Influence of the passage of current on the contact between solids [online]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 1958, 246(1244), S. 1-12. ISSN 2053-9169. Verfügbar unter: doi:10.1098/rspa.1958.0102

- [103] GARTE, S.M. The effect of design on contact fretting. In: Proceedings of the Holm Seminar on Electrical Contacts, 1976, S. 65-70
- [104] ANTLER, M. Contact fretting of electronic connectors. IEICE Transactions on Electronics, 1999, 82(1), S. 3-12
- [105] FENG, I.-M., H.H. UHLIG und OTHERS. Fretting corrosion of mild steel in air and in nitrogen. Journal of Applied Mechanics-Transactions of the ASME, 1954, 21(4), S. 395-400
- [106] PARK, Y.W., T.S. NARAYANAN und K.Y. LEE. Fretting corrosion of tin-plated contacts [online]. *Tribology International*, 2008, 41(7), S. 616-628. ISSN 0301-679X. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.triboint.2007.02.002
- [107] VAN DIJK, P., Å. KASSMAN und D. KLAFFKE. Investigations on Electrical Contacts Subjected to Fretting Motion. In: Proceedings ICEC 2002: 21st International Conference on Electrical Contacts. Zürich, 2002, S. 189-195
- [108] LEE, A., A. MAO und M.S. MAMRICK. Fretting corrosion of tin at elevated temperatures. In: Electrical Contacts, 1988,. Proceedings of the Thirty Fourth Meeting of the IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Piscataway, NJ: IEEE, 1988, S. 87-91. Verfügbar unter: doi:10.1109/HOLM.1988.16101
- PARK, Y.W., T.S. NARAYANAN und K.Y. LEE. Effect of temperature on the fretting corrosion of tin plated copper alloy contacts [online]. *Wear*, 2007, 262(3), S. 320-330. ISSN 00431648. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.wear.2006.05.020
- PARK, Y.W., T.S. NARAYANAN und K.Y. LEE. Effect of fretting amplitude and frequency on the fretting corrosion behaviour of tin plated contacts [online]. *Surface and Coatings Technology*, 2006, 201(6), S. 2181-2192. ISSN 0257-8972. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.surfcoat.2006.03.031
- [11] VINGSBO, O. und S. SÖDERBERG. On fretting maps [online].
 Wear, 1988, 126(2), S. 131-147. ISSN 00431648. Verfügbar unter: doi:10.1016/0043-1648(88)90134-2
- PEARSON, S.R. und P.H. SHIPWAY. Is the wear coefficient dependent upon slip amplitude in fretting? Vingsbo and Söderberg revisited [online]. *Wear*, 2015, 330-331, S. 93-102. ISSN 00431648. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.wear.2014.11.005

- [113] ZHOU, Z.R. und L. VINCENT. Mixed fretting regime [online]. *Wear*, 1995, 181-183, S. 531-536. ISSN 00431648. Verfügbar unter: doi:10.1016/0043-1648(95)90168-X
- [114] ANTLER, M. Survey of Contact Fretting in Electrical Connectors
 [online]. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 1985, 8(1), S. 87-104. ISSN 01486411.
 Verfügbar unter: doi:10.1109/TCHMT.1985.1136462
- BRAUNOVIC, M. Effect of contact load on the contact resistance behaviour of different conductor and contact materials under fretting conditions. In: Proceedings of 19th International Conference on Electrical Contacts, 1998, S. 283-287
- [116] SONG, J., C. KOCH und L. WANG. Correlation between Wear Resistance and Lifetime of Electrical Contacts [online]. Advances in Tribology, 2012, 2012, S. 1-9. ISSN 1687-5915. Verfügbar unter: doi:10.1155/2012/893145
- FOUVRY, S., J. LAPORTE, O. PERRINET, P. JEDRZEJCZYK, O. GRATON, O. ALQUIER und J. SAUTEL. Fretting wear of low current electrical contacts: Quantification of electrical endurance. In: 2017 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Piscataway, NJ: IEEE, 2017, S. 1-11. ISBN 978-1-5386-1091-6. Verfügbar unter: doi:10.1109/HOLM.2017.8088056
- ZHOU, Z.R., S.R. GU und L. VINCENT. An investigation of the fretting wear of two aluminium alloys [online]. *Tribology International*, 1997, 30(1), S. 1-7. ISSN 0301-679X. Verfügbar unter: doi:10.1016/0301-679X(95)00118-N
- [119] SONG, J., L. WANG, A. ZIBART und C. KOCH. Corrosion Protection of Electrically Conductive Surfaces [online]. *Metals*, 2012, 2(4), S. 450-477. Verfügbar unter: doi:10.3390/met2040450
- [120] GÜNTER, F. Ausfallmechanismen, Ausfallmodelle und Zuverlässigkeitsbewertung von kalten Kontaktiertechniken. Zugl.: Ilmenau, Techn. Univ., Diss., 2009. Ilmenau: Universitäts-Verlag Ilmenau, 2010. Werkstofftechnik aktuell. 3. ISBN 978-3-939473-77-0
- [121] TE CONNECTIVITY. C-963754 6.3 mm Flachkontakt f. 1.5-2.5mm². Customer Drawing, 13. August 2007
- [122] TE CONNECTIVITY. C-92880 Standard-Timer Kontakt. Customer Drawing, 28. November 2014

- [123] TE CONNECTIVITY. Zielsetzung Leistungsdaten 108-18054-1. Standard Timer Kontakt, 3. April 2014
- POPOV, V. Kontaktmechanik und Reibung. Von der Nanotribologie bis zur Erdbebendynamik. 3rd ed. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2016. ISBN 9783662459744
- SPAHR, M., S. KREITLEIN, R. HAAS, A. JAUMANN, T. GLÄßEL, S. SPRENG und J. FRANKE. Application and comparison of analytic accelerated test-models for lifetime prediction of a novel contacting method. In: I.H.C.o.E. CONTACTS, Hg. Electrical contacts - 2016. Proceedings of the Sixty-second IEEE Holm Conference on Electrical Contacts : held 9-12 October 2016, Hilton Hotel, Clearwater Beach, Florida, USA. Piscataway, NJ: IEEE, 2016, S. 94-99. ISBN 978-1-5090-5075-8. Verfügbar unter: doi:10.1109/HOLM.2016.7780013
- [126] SPAHR, M. Automatisierte Kontaktierungsverfahren für flachleiterbasierte Pkw-Bordnetzsysteme. Dissertation. Bamberg: Meisenbach Verlag, 2017. Fertigungstechnik - Erlangen. 305.
 ISBN 978-3-87525-432-7
- [127] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN ISO 25178-2:2012-09: 09.2012, Geometrische Produktspezifikation (GPS) -Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 2:. Berlin: Beuth Verlag GmbH. Verfügbar unter: doi:10.31030/1754208
- [128] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN EN 60068-2-14:2010-04: 04.2010, Umgebungseinflüsse - Teil 2-14: Prüfverfahren - Prüfung N: Temperaturwechsel (IEC 60068-2-14:2009). Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [129] ZVEI ZENTRALVERBAND ELEKTROTECHNIK- UND ELEKTRONIKINDUSTRIE E. V., Hg. Handbook for Robustness Validation. of Automotive Electrical/Electronic Modules. Second revised edition. Frankfurt am Main, 2013
- [130] SWINGLER, J., J.W. MCBRIDE und C. MAUL. Degradation of road tested automotive connectors [online]. *IEEE Transactions* on Components and Packaging Technologies, 2000, 23(1), S. 157-164. ISSN 15213331. Verfügbar unter: doi:10.1109/6144.833055
- [131] Daimler Chrysler, DC-10612 Rev-A: 10.2003, Prüfungsauswahlverfahren für E/E-Komponenten

- [132] HERING, E., R. MARTIN und M. STOHRER. *Physik für Ingenieure*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021. ISBN 978-3-662-63176-8
- [133] GELLER, W. Thermodynamik für Maschinenbauer. Grundlagen für die Praxis. 5., erg. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2015.
 Springer-Lehrbuch. ISBN 9783662449615
- [134] CZESLIK, C., H. SEEMANN und R. WINTER. Basiswissen Physikalische Chemie. 4., aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2010. ISBN 9783834893598
- [135] FUCHS, N. Über die Taubildung [online]. *Kolloid-Zeitschrift*, 1935, 71(2), S. 145-149. ISSN 0303-402X. Verfügbar unter: doi:10.1007/BF01496819
- KAESCHE, H. Elektrochemische Merkmale der atmosphärischen Korrosion [online]. *Materials and Corrosion*, 1964, 15(5), S. 379-390. ISSN 09475117. Verfügbar unter: doi:10.1002/mac0.19640150506
- BARTOŇ, K. und BARTOŇOVÁ Ž. Der Begriff "kritische Feuchtigkeit" beim atmosphrischen Rosten von Stahl [online]. *Materials and Corrosion*, 1970, 21(2), S. 85-88. ISSN 09475117. Verfügbar unter: doi:10.1002/mac0.19700210203
- [138] KNOTKOVÁ-ČERMÁKOVÁ, D., J. VLČKOVÁ und D.
 KUCHYŇKA. Atmosphärische Korrosion des Eisens bei periodischer Befeuchtung [online]. *Materials and Corrosion*, 1973, 24(8), S. 684-691. ISSN 09475117. Verfügbar unter: doi:10.1002/mac0.19730240803
- SCHMITT, S. Einfluß von Betauung und Feuchteadsorption auf die Zuverlässigkeit elektronischer Baugruppen. München: Utz, 2013.
 Werkstoffwissenschaften. ISBN 3831680205
- PASAOGLU, G., D. FIORELLO, A. MARTINO, G. SCARCELLA, A. ALEMANNO, C. ZUBARYEVA und C. THIEL. *Driving and parking patterns of European car drivers. A mobility survey.* Luxembourg: Publications Office, 2012. EUR (Luxembourg. Online). 25627. ISBN 9279277383
- [141] INFAS INSTITUT FÜR ANGEWANDTE SOZIALWISSENSCHAFT GMBH. Mobilität in Deutschland – MiD. Ergebnisbericht. Bonn, 02.2019

- [142] General Motors Company, GMW8758: 06.2011, Calibrated Accelerated Life Testing (CALT)
- [143] CARUSO, H. und A. DASGUPTA. A fundamental overview of accelerated-testing analytic models. In: Annual Reliability and Maintainability Symposium. Proceedings. International Symposium on Product Quality and Integrity, 1998, S. 389-393. Verfügbar unter: doi:10.1109/RAMS.1998.653809
- [144] EVANS, J., M.J. CUSHING, P. LALL und R. BAUERNSCHUB. A physics-of-failure (POF) approach to addressing device reliability in accelerated testing of MCMs. In: Multi-Chip Module Conference. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, 1995, S. 14-25. ISBN 0-8186-6970-5. Verfügbar unter: doi:10.1109/MCMC.1995.511998
- SCHREIER-ALT, J., E. RASTJAGAEV und A. RAßMANN.
 Raffungsmodelle für die Qualifikation mechatronischer Systeme und Komponenten. Abschlussbericht; Forschungsvorhaben Nr.
 618 I; Förderkennzeichen AIF 16482 N. In: FVA,
 FORSCHUNGSVEREINIGUNG ANTRIEBSTECHNIK E.V.,
 ARBEITSKREIS MECHATRONIK, Hg. FVA-Heft 1093. Frankfurt, 2014, 78 S
- [146] ARRHENIUS, S. Über die Reaktionsgeschwindigkeit bei der Inversion von Rohrzucker durch Säuren [online]. Zeitschrift für Physikalische Chemie, 1889, 4U(1). ISSN 0942-9352. Verfügbar unter: doi:10.1515/zpch-1889-0416
- BLACK, J.R. Mass Transport of Aluminum by Momentum Exchange with Conducting Electrons. In: 6th Annual Reliability Physics Symposium. Piscataway, NJ: IEEE, 1967, S. 148-159. Verfügbar unter: doi:10.1109/IRPS.1967.362408
- BAYERER, R., T. HERRMANN, T. LICHT, J. LUTZ und M.
 FELLER. Model for Power Cycling lifetime of IGBT Modules various factors influencing lifetime. In: 5th International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS), 2008, S. 1-6
- [149] MANSON, S.S. Behavior of materials under conditions of thermal stress. Washington D.C., USA: National Advisory Committee for Aeronautics, 1953

- [150] COFFIN, L. The problem of thermal stress fatigue in austenitic steels at elevated temperatures. In: Symposium on Effect of Cyclic Heating and Stressing on Metals at Elevated Temperatures, 1954, S. 31. Verfügbar unter: doi:10.1520/STP48000S
- [151] COFFIN, L. A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 1954, 76, S. 931-950
- [152] ENGELMAIER, W. Fatigue Life of Leadless Chip Carrier Solder Joints During Power Cycling [online]. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology,* 1983, 6(3), S. 232-237. ISSN 01486411. Verfügbar unter: doi:10.1109/TCHMT.1983.1136183
- [153] GLASSTONE, S., H. EYRING und K.J. LAIDLER. The theory of rate processes. The kinetics of chemical reactions, viscosity, diffusion and electrochemical phenomena. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1941
- [154] HALLECK, M.C. The I.C. Plastic Package a Simple Method for Predicting Package Performance. In: 10th Reliability Physics Symposium. Piscataway, NJ: IEEE, 1972, S. 88-94. Verfügbar unter: doi:10.1109/IRPS.1972.362533
- [155] KEMÉNY, A.P. Experiments concerning the life testing of semiconductor devices—II. Life testing of transistors in switching operation mode [online]. *Microelectronics Reliability*, 1971, 10(2), S. 75-93. ISSN 00262714. Verfügbar unter: doi:10.1016/0026-2714(71)90499-9
- [156] LAWSON R. W. The Accelerated Testing of Plastic Encapsulated Semiconductor Components. In: 12th International Reliability Physics Symposium. Piscataway, NJ: IEEE, 1974, S. 243-249. Verfügbar unter: doi:10.1109/IRPS.1974.362653
- [157] NORRIS, K.C. und A.H. LANDZBERG. Reliability of Controlled Collapse Interconnections [online]. *IBM Journal of Research and Development*, 1969, 13(3), S. 266-271. ISSN 0018-8646. Verfügbar unter: doi:10.1147/rd.133.0266

- [158] HSU, M., C. LEE und K. CHIANG. A Modified Acceleration Factor Empirical Equation for BGA Type Package. In: 2017 IEEE 67th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). Piscataway, NJ: IEEE, 2017, S. 1020-1026. Verfügbar unter: doi:10.1109/ECTC.2017.28
- [159] SUN, F.Q., J.C. LIU, Z.Q. CAO, X.Y. LI und T.M. JIANG. Modified Norris-Landzberg Model and Optimum Design of Temperature Cycling Alt [online]. *Strength of Materials*, 2016, 48(1), S. 135-145. ISSN 1573-9325. Verfügbar unter: doi:10.1007/S11223-016-9748-1
- [160] PECK, D.S. Comprehensive Model for Humidity Testing Correlation. In: 24th International Reliability Physics Symposium. Piscataway, NJ: IEEE, 1986, S. 44-50. Verfügbar unter: doi:10.1109/IRPS.1986.362110
- [161] REICH, B. und E.B. HAKIM. Environmental Factors Governing Field Reliability of Plastic Transistors and Integrated Circuits. In: 10th Reliability Physics Symposium. Piscataway, NJ: IEEE, 1972, S. 82-87. Verfügbar unter: doi:10.1109/IRPS.1972.362532
- [162] SCHEUERMANN, U. und R. SCHMIDT. A new lifetime model for advanced power modules with sintered chips and optimized Al wire bonds. In: Proceedings PCIM, 2013, S. 810-813
- ZORN, C. und N. KAMINSKI. Acceleration of temperature humidity bias (THB) testing on IGBT modules by high bias levels. In: 27th International Symposium on Power Semiconductor Devices IC's (ISPSD). Piscataway, NJ: IEEE, 2015, S. 385-388. Verfügbar unter: doi:10.1109/ISPSD.2015.7123470
- [164] NELSON, W.B. Accelerated Testing. Statistical Models, Test Plans, and Data Analysis. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Inc, 2009. Wiley Series in Probability and Statistics. v.344. ISBN 9780471697367
- [165] JEDEC Solid State Technology Association, JEDEC JEP 122: 1.
 September 2016, Failure Mechanisms and Models for Semiconductor Devices
- [166] GOTTSCHALK, A. Qualitäts- und Zuverlässigkeitssicherung elektronischer Bauelemente und Systeme. Methoden -Vorgehensweisen - Voraussagen. 2., völlig neu bearbeitete Auflage. Renningen: expert-Verlag, 2010. Kontakt & Studium. 325. ISBN 9783816926801

- [167] DAUKSHER, W. A Second-Level SAC Solder-Joint Fatigue-Life Prediction Methodology [online]. *IEEE Transactions on Device* and Materials Reliability, 2008, 8(1), S. 168-173. ISSN 1530-4388. Verfügbar unter: doi:10.1109/TDMR.2007.912253
- [168] WU, K.C., C.H. LEE und K.-N. CHIANG. Characterization of Thermal Cycling Ramp Rate and Dwell Time Effects on AF (Acceleration Factor) Estimation. In: 2016 IEEE 66th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). Piscataway, NJ: IEEE, 2016, S. 251-256. ISBN 978-1-5090-1204-6. Verfügbar unter: doi:10.1109/ECTC.2016.18
- [169] PAN, N., G.A. HENSHALL, F. BILLAUT, S. DAI, M.J. STRUM, E. BENEDETTO und J. RAYNER. An acceleration model for Sn-Ag-Cu solder joint reliability under various thermal cycle conditions. Proceedings of SMTAI, 2005, S. 876-883
- [170] MARQUARDT, D.W. An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters [online]. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 1963, 11(2), S. 431-441. ISSN 0368-4245. Verfügbar unter: doi:10.1137/0111030
- [171] REINHARDT, R., A. HOFFMANN und T. GERLACH. Nichtlineare Optimierung. Theorie, Numerik und Experimente. Berlin: Springer Spektrum, 2013. ISBN 9783827429490

Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] FRÖHLIG, S., N. PIECHULEK, M. FRIEDLEIN, R. SÜß-WOLF, L. SCHMIDT, M. KUHN, H. NGUYEN, L. WANG, F. HEFNER, P. HEISLER, J. FRÖHLICH, M. MEINERS und J. FRANKE. Innovative signal and power connection solutions for alternative powertrain concepts. To be published. In: 2020 10th International Electric Drives Production Conference, EDPC 2020, 2020, Verfügbar unter: doi: 10.1109/EDPC51184.2020.9388180
- [P2] GRÄF, D., M. FRIEDLEIN, C. GANßMANTEL, J. FRANKE und N. ISCHDONAT. New concept for the Integration of Additive Manufactured Mechanical and Mechatronic Components in Aircraft Interior Systems. In: 2020 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET). Piscataway, New Jersey: IEEE, 2020, S. 1-5. ISBN 978-1-7281-4640-9. Verfügbar unter: doi:10.1109/ASET48392.2020.9118390
- [P3] FRIEDLEIN, M., D. GRÄF, F. RAISER, A. JAUMANN und J. FRANKE. Occurrence and Influence of Fretting Corrosion on Receptacle Contact Resistance. In: 2018 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Piscataway, NJ: IEEE, 2018, S. 295-301. Verfügbar unter: doi:10.1109/HOLM.2018.8611669
- [P4] FRIEDLEIN, M., M. SPAHR, R. SÜß-WOLF und J. FRANKE. Application and development of analytic accelerated test models for the lifetime prediction of a novel contacting method. In: R. SCHMITT und G. SCHUH, Hg. 7. WGP-Jahreskongress. Aachen: Apprimus Verlag, 2017, S. 465-472. ISBN 978-3-86359-555-5
- [P5] FRIEDLEIN, M., M. SPAHR, R. SUES-WOLF und J. FRANKE. Failure dependent progression of contact resistance in thermalshock testing of spring-clip contacts. In: 2017 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Piscataway, NJ: IEEE, 2017, S. 169-174. ISBN 978-1-5386-1091-6. Verfügbar unter: doi:10.1109/HOLM.2017.8088081
- [P6] FRIEDLEIN, M., D. GRÄF, J. STEGNER und J. FRANKE. Development and application of load pro-files for thermal qualification testing of receptacle automotive connectors [online]. *Materials Testing*, 2021, 63(3), S. 272-278. Verfügbar unter: doi:10.1515/mt-2020-0040

Verzeichnis promotionsbezogener studentischer Arbeiten

- [S1] BAUMEISTER, P. Charakterisierung und Konzipierung von Beschichtungssystemen für automobile Klemmkontakte.
 Masterarbeit. Erlangen, 6. März 2018. Verfügbar unter: Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
- [S2] GÖBEL, J. Charakterisierung und Optimierung von Online-Messsystemen für Bordnetzkomponenten. Masterarbeit. Erlangen, 3. September 2019
- [S3] PECHT, F. Entwicklung einer Qualifizierungsstrategie zur Lebensdauerprüfung von Steckverbindern. Projektarbeit.
 Erlangen, 15. Februar 2018. Verfügbar unter: Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
- [S4] SCHMITZ, L. Analyse der Lebensdauer und Quantifizierung der Schädigungsmechanismen automobiler Klemmkontakte während der Temperaturwechselprüfung. Bachelorarbeit. Erlangen, 5. April 2019. Verfügbar unter: Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
- [S5] SÖLLNER, F. Analyse realer Lastprofile für thermische Qualifizierungsuntersuchungen automobiler Steckverbinder. Bachelorarbeit. Erlangen, 15. April 2019. Verfügbar unter: Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
- [S6] RAISER, F. Entwicklung eines Versuchsaufbaus zum Induzieren von Relativbewegungen im Mikrometerbereich in Kontaktzonen von Klemmkontakten. Masterarbeit. Erlangen, 28. Februar 2018. Verfügbar unter: Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
- [S7] STEGNER, J. Entwicklung und Anwendung anwendungsnaher Lastprofile für thermische Qualifizierungsuntersuchungen von Steckverbindern. Masterarbeit. Erlangen, 01.01.20
- [S8] BAUMANN, M. Analyse von lebensdauerrelevanten Anforderungen für E/E-Komponenten in Kraft-, Schienen und Nutzfahrzeugen sowie der Luftfahrt. Masterarbeit. Erlangen, 1. Februar 2018. Verfügbar unter: Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik

- [S9] WINDMÖLLER, P. Vergleichende Betrachtung und Bewertung von Temperaturwechsel- und Lastprofiltests für automobile Klemmkontakte. Bachelorarbeit. Erlangen, 7. September 2020
- [S10] HOMANN, J. Raffungsmodelle zur Beschleunigung von Qualifizierungsuntersuchungen automobiler Klemmkontakte. Masterarbeit. Erlangen, 21. Dezember 2018. Verfügbar unter: Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
- [S11] WENG, M. Analyse zur Anwendung von Raffungsmodellen auf mediale Belastungen von Klemmkontakten im Automobil.
 Masterarbeit. Erlangen, 23. April 2018. Verfügbar unter: Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
- [S12] BOLOTIN, K. Analyse der Auswirkungen der ISO 26262 auf Bordnetzkomponenten und deren Pr
 üfverfahren am Beispiel von Sicherungen. Projektarbeit. Erlangen, 2. Mai 2018. Verf
 ügbar unter: Lehrstuhl f
 ür Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2022): Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, www.mb.fau.de/diss/

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

Band 1 – 52 Fertigungstechnik – Erlangen ISSN 1431-6226 Carl Hanser Verlag, München

Band 53 – 307 Fertigungstechnik – Erlangen ISSN 1431-6226 Meisenbach Verlag, Bamberg

ab Band 308 FAU Studien aus dem Maschinenbau ISSN 2625-9974 FAU University Press, Erlangen

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

FAPS	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
FMT	Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik
KTmfk	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
LFT	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
LGT	Lehrstuhl für Gießereitechnik
LPT	Lehrstuhl für Photonische Technologien
REP	Lehrstuhl für Ressourcen- und Energieeffiziente Produktionsmaschinen

Band 1: Andreas Hemberger

Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch wissensbasierte Systeme FAPS, 208 Seiten, 107 Bilder. 1988. ISBN 3-446-15234-2.

Band 2: Detlef Classe

Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte FAPS, 194 Seiten, 70 Bilder. 1988. ISBN 3-446-15529-5.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting

Projektierung von Montagesystemen FAPS, 201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tab. 1989.ISBN 3-446-15541-4.

Band 4: Karsten Schlüter

Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz der Simulationstechnik FAPS, 177 Seiten, 97 Bilder. 1989. ISBN 3-446-15542-2.

Band 5: Shir-Kuan Lin

Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern FAPS, 168 Seiten, 46 Bilder. 1989. ISBN 3-446-15546-5.

Band 6: Rudolf Nuss

Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab. 1989. ISBN 3-446-15783-2.

Band 7: Wolfgang Scholz

Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen FAPS, 194 Seiten, 89 Bilder. 1989.

ISBN 3-446-15825-1.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab. 1989. ISBN 3-446-15921-5.

Band 9: Rainer Eisele

Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der Produktion

FAPS, 183 Seiten, 86 Bilder. 1990. ISBN 3-446-16107-4.

Band 10: Rolf Pfeiffer

Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik FAPS, 216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tab. 1990. ISBN 3-446-16161-9.

Band 11: Herbert Fischer

Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990. ISBN 3-446-16105-8.

Band 12: Gerhard Kleineidam

CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990. ISBN 3-446-16112-0.

Band 13: Frank Vollertsen

Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls LFT, XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tab. 1990. ISBN 3-446-16133-3.

Band 14: Stephan Biermann

Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO2-Hochleistungslasern LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab. 1991. ISBN 3-446-16269-0.

Band 15: Uwe Geißler

Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle LFT, 124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tab. 1991. ISBN 3-446-16358-1.

Band 16: Frank Oswald Hake

Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991. ISBN 3-446-16428-6.

Band 17: Herbert Reichel

Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung FAPS, 198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tab. 1991. ISBN 3-446-16453-7.

Band 18: Josef Scheller

Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen FAPS, 198 Seiten, 65 Bilder. 1991. ISBN 3-446-16454-5.

Band 19: Arnold vom Ende

Untersuchungen zum Biegeumforme mit elastischer Matrize LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991. ISBN 3-446-16493-6.

Band 20: Joachim Schmid

Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß mit Industrierobotern FAPS, XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tab. 1991. ISBN 3-446-16560-6.

Band 21: Egon Sommer

Multiprozessorsteuerung für kooperierende Industrieroboter in Montagezellen FAPS, 188 Seiten, 102 Bilder. 1991. ISBN 3-446-17062-6.

Band 22: Georg Geyer

Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage FAPS, 192 Seiten, 112 Bilder. 1991. ISBN 3-446-16552-5.

Band 23: Rainer Flohr

Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT) FAPS, 186 Seiten, 79 Bilder. 1991. ISBN 3-446-16568-1.

Band 24: Alfons Rief

Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und schweißen in der Rohkarosseriefertigung LFT, VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5

Tab. 1991. ISBN 3-446-16593-2.

Band 25: Christoph Thim

Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen in der Elektronikmontage durch Simulation

FAPS, 188 Seiten, 74 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17118-5.

Band 26: Roland Müller

CO2 -Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen

LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab. 1992. ISBN 3-446-17104-5.

Band 27: Günther Schäfer

Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung FAPS, 195 Seiten, 76 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17117-7.

Band 28: Martin Hoffmann

Entwicklung einerCAD/CAM-Prozeßkette für die Herstellung von Blechbiegeteilen LFT, 149 Seiten, 89 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17154-1.

Band 29: Peter Hoffmann

Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und –schweißen: Prozeßführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung von Blechformteilen LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab.

1992. ISBN 3-446-17153-3.

Band 30: Olaf Schrödel

Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen

FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17242-4.

Band 31: Hubert Reinisch

Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen FAPS, XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17380-3.

Band 32: Brigitte Bärnreuther

Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17451-6.

Band 33: Joachim Hutfless

Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik in der Strahlführung einer CO2-Hochleistungslaseranlage LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993. ISBN 3-446-17532-6.

Band 34: Uwe Günzel

Entwicklung und Einsatz eines Simula-tionsverfahrens für operative undstrategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 1993. ISBN 3-446-17604-7.

Band 35: Bertram Ehmann

Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17658-6.

Band 36: Harald Kolléra

Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems für das Laserstrahlschneiden LFT, 129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tab. 1993. ISBN 3-446-17719-1.

Band 37: Stephanie Abels

Modellierung und Optimierung von Montageanlagen in einem integrierten Simulationssystem FAPS, 188 Seiten, 88 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17731-0.

Band 38: Robert Schmidt-Hebbel

Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993. ISBN 3-446-17778-7.

Band 39: Norbert Lutz

Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit XeCl-Excimerlaserstrahlung LFT, 187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tab. 1994. ISBN 3-446-17970-4.

Band 40: Konrad Grampp

Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an Steuerungssoftware von SMD-Bestücklinien FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18173-3.

Band 41: Martin Koch

Wissensbasierte Unterstützung derAngebotsbearbeitung in der Investitionsgüterindustrie FAPS, 169 Seiten, 68 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18174-1.

Band 42: Armin Gropp

Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser LFT, 160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tab. 1995. ISBN 3-446-18241-1.

Band 43: Werner Heckel

Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung mit dem Lichtschnittverfahren LFT, 149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tab. 1995. ISBN 3-446-18243-8.

Band 44: Armin Rothhaupt

Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung FAPS, 180 Seiten, 101 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18307-8.

Band 45: Bernd Zöllner

Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion FAPS, 195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18308-6.

Band 46: Bodo Vormann

Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung komplexer Blechbiegeteile LFT, 126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18345-0.

Band 47: Peter Schnepf

Zielkostenorientierte Montageplanung FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18397-3.

Band 48: Rainer Klotzbücher

Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung in flexiblen Fertigungssystemen FAPS, 156 Seiten, 62 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18412-0.

Band 49: Wolfgang Greska

Wissensbasierte Analyse undKlassifizierung von Blechteilen LFT, 144 Seiten, 96 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18462-7.

Band 50: Jörg Franke

Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID) FAPS, 196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tab. 1995. ISBN 3-446-18448-1.

Band 51: Franz-Josef Zeller

Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995. ISBN 3-446-18601-8.

Band 52: Michael Solvie

Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen FAPS, 200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tab. 1996. ISBN 3-446-18607-7.

Band 53: Robert Hopperdietzel

Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie FAPS, 180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tab. 1996. ISBN 3-87525-070-2.

Band 54: Thomas Rebhahn

Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern - Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen

LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab. 1996. ISBN 3-87525-075-3.

Band 55: Henning Hanebuth

Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1996. ISBN 3-87525-074-5.

Band 56: Uwe Schönherr

Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen mitkooperierenden Robotern

FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab. 1996. ISBN 3-87525-076-1.

Band 57: Stefan Holzer

Berührungslose Formgebung mit-Laserstrahlung LFT, 162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 1996. ISBN 3-87525-079-6.

Band 58: Markus Schultz

Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen vonBlechformteilen LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab.

1997. ISBN 3-87525-080-X.

Band 59: Thomas Krebs

Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-Produktmodell FAPS, 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tab. 1997. ISBN 3-87525-081-8.

Band 60: Jürgen Sturm

Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 1997. ISBN 3-87525-082-6.

Band 61: Andreas Brand

Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID) FAPS, 182 Seiten, 100 Bilder. 1997. ISBN 3-87525-087-7.

Band 62: Michael Kauf

Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer CO2-Hochleistungslaseranlage LFT, 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 1997. ISBN 3-87525-083-4.

Band 63: Peter Steinwasser

Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produktund Prozeßplanung FAPS, 190 Seiten, 87 Bilder. 1997. ISBN 3-87525-084-2.

Band 64: Georg Liedl

Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion FAPS, 196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tab. 1997. ISBN 3-87525-086-9.

Band 65: Andreas Otto

Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab. 1997. ISBN 3-87525-089-3.

Band 66: Wolfgang Blöchl

Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen zur Prozeß- und Programmoptimierung FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997. ISBN 3-87525-091-5.

Band 67: Klaus-Uwe Wolf

Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulenwickeln FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997. ISBN 3-87525-092-3.

Band 68: Frank Backes

Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung LFT, 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tab. 1997. ISBN 3-87525-093-1.

Band 69: Jürgen Kraus

Laserstrahlumformen von Profilen LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab. 1997. ISBN 3-87525-094-X.

Band 70: Norbert Neubauer

Adaptive Strahlführungen für CO2-Laseranlagen LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab. 1997. ISBN 3-87525-095-8.

Band 71: Michael Steber

Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen in der automatisierten Montage FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab. 1997. ISBN 3-87525-096-6.

Band 72: Markus Pfestorf

Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab. 1997. ISBN 3-87525-097-4.

Band 73: Volker Franke

Integrierte Planung und Konstruktion von Werkzeugen für die Biegebearbeitung LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998. ISBN 3-87525-098-2.

Band 74: Herbert Scheller

Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte Produktgestaltung elektronischer Baugruppen FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tab. 1998. ISBN 3-87525-099-0.

Band 75: Arthur Meßner

Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile – Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung LFT, 164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tab.

1998. ISBN 3-87525-100-8.

Band 76: Mathias Glasmacher

Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen LFT, 184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tab. 1998. ISBN 3-87525-101-6.

Band 77: Michael Schwind

Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab. 1998. ISBN 3-87525-102-4.

Band 78: Manfred Gerhard

Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen FAPS, 179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tab. 1998. ISBN 3-87525-103-2.

Band 79: Elke Rauh

Methodische Einbindung der Simulation in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe FAPS, 192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tab. 1998. ISBN 3-87525-104-0.

Band 80: Sorin Niederkorn

Meßeinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung bei umformtechnischen Prozessen LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab. 1998. ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schuberth

Regelung der Fokuslage beim Schweißen mit CO2-Hochleistungslasern unter Einsatz von adaptiven Optiken LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab. 1998. ISBN 3-87525-106-7.

Band 82: Armando Walter Colombo

Development and Implementation of Hierarchical Control Structures of Flexible Production Systems Using High Level Petri Nets FAPS, 216 Seiten, 86 Bilder. 1998. ISBN 3-87525-109-1.

Band 83: Otto Meedt

Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling durch flexible Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung FAPS, 186 Seiten, 103 Bilder. 1998. ISBN 3-87525-108-3.

Band 84: Knuth Götz

Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion FAPS, 212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tab. 1998. ISBN 3-87525-112-1.

Band 85: Ralf Luchs

Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT FAPS, 176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tab. 1998. ISBN 3-87525-113-7.

Band 86: Frank Pöhlau

Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID) FAPS, 144 Seiten, 99 Bilder. 1999. ISBN 3-87525-114-8.

Band 87: Roland T. A. Kals

Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes

LFT, 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1999. ISBN 3-87525-115-6.

Band 88: Gerhard Luhn

Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion FAPS, 252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tab. 1999. ISBN 3-87525-116-4.

Band 89: Axel Sprenger

Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen LFT, 114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tab. 1999. ISBN 3-87525-117-2.

Band 90: Hans-Jörg Pucher

Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten LFT, 158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tab. 1999. ISBN 3-87525-119-9.

Band 91: Horst Arnet

Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung LFT, 128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 1999. ISBN 3-87525-120-2.

Band 92: Doris Schubart

Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO2-Laserstrahlung LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 1999. ISBN 3-87525-122-9.

Band 93: Adrianus L. P. Coremans

Laserstrahlsintern von Metallpulver - Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper LFT, 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tab. 1999. ISBN 3-87525-124-5.

Band 94: Hans-Martin Biehler Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung FAPS, 194 Seiten, 105 Bilder. 1999. ISBN 3-87525-126-1.

Band 95: Wolfgang Becker

Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 1999. ISBN 3-87525-127-X.

Band 96: Philipp Hein

Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung LFT, 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tab. 1999. ISBN 3-87525-128-8.

Band 97: Gunter Beitinger

Herstellungs- und Prüfverfahren für thermoplastische Schaltungsträger FAPS, 169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tab. 1999. ISBN 3-87525-129-6.

Band 98: Jürgen Knoblach

Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation von Blechteilen mit Hilfe wissensbasierter Methoden

LFT, 155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tab. 1999. ISBN 3-87525-130-X.

Band 99: Frank Breitenbach

Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie elektronischer SMT-Bauelemente LFT, 147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2000. ISBN 3-87525-131-8.

Band 100: Bernd Falk

Simulationsbasierte Lebensdauervorhersage für Werkzeuge der Kaltmassivumformung LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab. 2000. ISBN 3-87525-136-9.

Band 101: Wolfgang Schlögl

Integriertes Simulationsdaten-Management für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung FAPS, 169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tab. 2000. ISBN 3-87525-137-7.

Band 102: Christian Hinsel

Ermüdungsbruchversagen hartstoffbeschichteter Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung LFT, 130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tab. 2000. ISBN 3-87525-138-5.

Band 103: Stefan Bobbert

Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren LFT, 123 Seiten, 77 Bilder. 2000. ISBN 3-87525-145-8.

Band 104: Harald Rottbauer

Modulares Planungswerkzeug zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder. 2001. ISBN 3-87525-139-3.

Band 105: Thomas Hennige

Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen LFT, 119 Seiten, 50 Bilder. 2001. ISBN 3-87525-140-7.

Band 106: Thomas Menzel

Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse LFT, 152 Seiten, 71 Bilder. 2001. ISBN 3-87525-142-3.

Band 107: Thomas Stöckel

Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene in Produktionssysteme durch Middleware-Frameworks FAPS, 147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-143-1.

Band 108: Frank Pitter

Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen

FAPS, 158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tab. 2001. ISBN 3-87525-144-X.

Band 109: Markus Korneli

Integration lokaler CAP-Systeme in einen globalen Fertigungsdaten- verbund

FAPS, 121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tab. 2001. ISBN 3-87525-146-6.

Band 110: Burkhard Müller

Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern - Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion LFT, 128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tab. 2001. ISBN 3-87525-159-8.

Band 111: Jürgen Göhringer

Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-147-4.

Band 112: Robert Feuerstein

Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementetechnologien in die Flachbaugruppenfertigung FAPS, 161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tab.

2001. ISBN 3-87525-151-2.

Band 113: Marcus Reichenberger

Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT) FAPS, 165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tab. 2001. ISBN 3-87525-152-0.

Band 114: Alexander Huber

Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren LFT, 122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-153-9.

Band 115: Sami Krimi

Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tab. 2001. ISBN 3-87525-157-1.

Band 116: Marion Merklein

Laserstrahlumformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften LFT, 122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tab. 2001. ISBN 3-87525-156-3.

Band 117: Thomas Collisi

Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten FAPS, 181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-164-4.

Band 118: Markus Koch

Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik FAPS, 176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tab. 2002. ISBN 3-87525-165-2.

Band 119: Michael Schmidt

Prozeßregelung für das Laserstrahl-Punktschweißen in der Elektronikproduktion LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 2002. ISBN 3-87525-166-0.

Band 120: Nicolas Tiesler

Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinstteile LFT, 126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-175-X.

Band 121: Lars Pursche

Methoden zur technologieorientierten Programmierung für die 3D-Lasermikrobearbeitung LFT, 11 Seiten, 39 Bilder, o Tab. 2002. ISBN 3-87525-183-0.

Band 122: Jan-Oliver Brassel

Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen LFT, 148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-181-4.

Band 123: Mark Geisel

Prozeßkontrolle und -steuerung beim Laserstrahlschweißen mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik LFT, 135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tab. 2002. ISBN 3-87525-180-6.

Band 124: Gerd Eßer

Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf Thermoplastsubstraten für die MID-Technik LFT, 148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-171-7.

Band 125: Marc Fleckenstein

Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen elektronischer Kontakte LFT, 159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-170-9.

Band 126: Stefan Kaufmann

Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG- Laserstrahlfügen von Silizium für Komponenten der Optoelektronik LFT, 159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-172-5.

Band 127: Thomas Fröhlich

Simultanes Löten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente mit Diodenlaserstrahlung LFT, 143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-186-5.

Band 128: Achim Hofmann

Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen

LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab. 2002. ISBN 3-87525-182-2.

Band 129: Ingo Kriebitzsch

3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik FAPS, 129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tab. 2002. ISBN 3-87525-169-5.

Band 130: Thomas Pohl

Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter Formplatinen aus Aluminiumlegierungen

LFT, 133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-173-3.

Band 131: Matthias Wenk

Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die flexible Sensorführung von Industrierobotern

FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab. 2002. ISBN 3-87525-174-1.

Band 132: Matthias Negendanck

Neue Sensorik und Aktorik für Bearbeitungsköpfe zum Laserstrahlschweißen LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab. 2002. ISBN 3-87525-184-9.

Band 133: Oliver Kreis

Integrierte Fertigung - Verfahrensintegration durch Innenhochdruck-Umformen, Trennen und Laserstrahlschweißen in einem Werkzeug sowie ihre tele- und multimediale Präsentation LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab. 2002. ISBN 3-87525-176-8.

Band 134: Stefan Trautner

Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab. 2002. ISBN 3-87525-177-6.

Band 135: Roland Meier

Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)

FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2002. ISBN 3-87525-178-4.

Band 136: Jürgen Wunderlich

Kostensimulation - Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer Produktionssysteme FAPS, 202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tab. 2002. ISBN 3-87525-179-2.

Band 137: Stefan Novotny

Innenhochdruck-Umformen von Blechen aus Aluminium- und Magnesiumlegierungen bei erhöhter Temperatur LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab.

2002. ISBN 3-87525-185-7.

Band 138: Andreas Licha

Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab. 2003. ISBN 3-87525-189-X.

Band 139: Michael Eisenbarth

Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen FAPS, 207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tab. 2003. ISBN 3-87525-190-3.

Band 140: Frank Christoph

Durchgängige simulationsgestützte Planung von Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion FAPS, 187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tab. 2003. ISBN 3-87525-191-1.

Band 141: Hinnerk Hagenah

Simulationsbasierte Bestimmung der zu erwartenden Maßhaltigkeit für das Blechbiegen LFT, 131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tab. 2003. ISBN 3-87525-192-X.

Band 142: Ralf Eckstein

Scherschneiden und Biegen metallischer Kleinstteile - Materialeinfluss und Materialverhalten LFT, 148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2003. ISBN 3-87525-193-8.

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff

Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien mit homogener Lichtlinie LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2003. ISBN 3-87525-196-2.

Band 144: Andreas Kach

Rechnergestützte Anpassung von Laserstrahlschneidbahnen an Bauteilabweichungen LFT, 139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 2004. ISBN 3-87525-197-0.

Band 145: Stefan Hierl

System- und Prozeßtechnik für das simultane Löten mit Diodenlaserstrahlung von elektronischen Bauelementen LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab.

2004. ISBN 3-87525-198-9.

Band 146: Thomas Neudecker

Tribologische Eigenschaften keramischer Blechumformwerkzeuge-Einfluss einer Oberflächenendbearbeitung mittels Excimerlaserstrahlung

LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab. 2004. ISBN 3-87525-200-4.

Band 147: Ulrich Wenger

Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, o Tab. 2004. ISBN 3-87525-203-9.

Band 148: Stefan Slama

Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, o Tab. 2004. ISBN 3-87525-204-7.

Band 149: Thomas Wurm

Laserstrahljustieren mittels Aktoren-Entwicklung von Konzepten und Methoden für die rechnerunterstützte Modellierung und Optimierung von komplexen Aktorsystemen in der Mikrotechnik LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab. 2004. ISBN 3-87525-206-3.

Band 150: Martino Celeghini

Wirkmedienbasierte Blechumformung: Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Werkstoff und Bauteilgeometrie LFT, 146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tab. 2004. ISBN 3-87525-207-1.

Band 151: Ralph Hohenstein

Entwurf hochdynamischer Sensorund Regelsysteme für die adaptiveLaserbearbeitung LFT, 282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tab. 2004. ISBN 3-87525-210-1.

Band 152: Angelika Hutterer

Entwicklung prozessüberwachender Regelkreise für flexible Formgebungsprozesse LFT, 149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tab. 2005. ISBN 3-87525-212-8.

Band 153: Emil Egerer

Massivumformen metallischer Kleinstteile bei erhöhter Prozesstemperatur LFT, 158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tab. 2005, ISBN 3-87525-213-6.

Band 154: Rüdiger Holzmann

Strategien zur nachhaltigen Optimierung von Qualität und Zuverlässigkeit in der Fertigung hochintegrierter Flachbaugruppen FAPS, 186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tab. 2005. ISBN 3-87525-217-9.

Band 155: Marco Nock

Biegeumformen mit Elastomerwerkzeugen Modellierung, Prozessauslegung und Abgrenzung des Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tab. 2005. ISBN 3-87525-218-7.

Band 156: Frank Niebling

Qualifizierung einer Prozesskette zum Laserstrahlsintern metallischer Bauteile LFT, 148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 2005. ISBN 3-87525-219-5.

Band 157: Markus Meiler

Großserientauglichkeit trockenschmierstoffbeschichteter Aluminiumbleche im Presswerk Grundlegende Untersuchungen zur Tribologie, zum Umformverhalten und Bauteilversuche LFT, 104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab. 2005. ISBN 3-87525-221-7.

Band 158: Agus Sutanto

Solution Approaches for Planning of Assembly Systems in Three-Dimensional Virtual Environments FAPS, 169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tab. 2005. ISBN 3-87525-220-9.

Band 159: Matthias Boiger

Hochleistungssysteme für die Fertigung elektronischer Baugruppen auf der Basis flexibler Schaltungsträger FAPS, 175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tab. 2005. ISBN 3-87525-222-5.

Band 160: Matthias Pitz

Laserunterstütztes Biegen höchstfester Mehrphasenstähle LFT, 120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2005. ISBN 3-87525-223-3.

Band 161: Meik Vahl

Beitrag zur gezielten Beeinflussung des Werkstoffflusses beim Innenhochdruck-Umformen von Blechen

LFT, 165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tab. 2005. ISBN 3-87525-224-1.

Band 162: Peter K. Kraus

Plattformstrategien - Realisierung einer varianz- und kostenoptimierten Wertschöpfung FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, o Tab. 2005. ISBN 3-87525-226-8.

Band 163: Adrienn Cser

Laserstrahlschmelzabtrag - Prozessanalyse und -modellierung LFT, 146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tab. 2005. ISBN 3-87525-227-6.

Band 164: Markus C. Hahn

Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung von Leichtbauverbundstrukturen mit Aluminiumschaumkern LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2005. ISBN 3-87525-228-4.

Band 165: Gordana Michos

Mechatronische Ansätze zur Optimierung von Vorschubachsen FAPS, 146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2005. ISBN 3-87525-230-6.

Band 166: Markus Stark

Auslegung und Fertigung hochpräziser Faser-Kollimator-Arrays LFT, 158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tab. 2005. ISBN 3-87525-231-4.

Band 167: Yurong Zhou

Kollaboratives Engineering Management in der integrierten virtuellen Entwicklung der Anlagen für die Elektronikproduktion FAPS, 156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tab. 2005. ISBN 3-87525-232-2.

Band 168: Werner Enser

Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen FAPS, 190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab.

2005. ISBN 3-87525-233-0.

Band 169: Katrin Melzer

Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle FAPS, 155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tab. 2005. ISBN 3-87525-234-9.

Band 170: Alexander Putz

Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall LFT, 137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tab. 2006. ISBN 3-87525-237-3.

Band 171: Martin Prechtl

Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien - Systemund Prozesstechnik LFT, 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tab. 2006. ISBN 3-87525-238-1.

Band 172: Markus Meidert

Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung LFT, 131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tab. 2006. ISBN 3-87525-239-X.

Band 173: Bernd Müller

Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile FAPS, 147 Seiten, 77 Bilder, o Tab. 2006. ISBN 3-87525-240-3.

Band 174: Alexander Hofmann

Hybrides Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen LFT, 136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-243-9.

Band 175: Peter Wölflick

Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für bleifreie Mechatronik-Anwendungen FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006.

ISBN 978-3-87525-246-0.

Band 176: Attila Komlodi

Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-248-4.

Band 177: Uwe Popp

Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen LFT, 140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-249-1.

Band 178: Veit Rückel

Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter FAPS, 148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-250-7.

Band 179: Manfred Dirscherl

Nicht-thermische Mikrojustiertechnik mittels ultrakurzer Laserpulse

LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-251-4.

Band 180: Yong Zhuo

Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3D-MID) FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang

Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß

Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker

Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-259-0.

Band 184: Rainer Kohlbauer

Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechumformprozesse LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-260-6.

Band 185: Klaus Lamprecht

Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge LFT, 137 Seiten, 81 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß

Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischerBaugruppen FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-266-8.

Band 187: Michael Kerausch

Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter Aluminiumplatinen

LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber

Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme FAPS, 183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-269-9.

Band 189: Thomas Frick

Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Laserstrahlschweißen von Kunststoffen LFT, 104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-268-2.

Band 190: Joachim Hecht

Werkstoffcharakterisierung und Prozessauslegung für die wirkmedienbasierte Doppelblech-Umformung von Magnesiumlegierungen LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab.

2007. ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl

Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-272-9.

Band 192: Massimo Tolazzi

Innenhochdruck-Umformen verstärkter Blech-Rahmenstrukturen LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff

Untersuchung der Prozesseinflussgrößen beim Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5

LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-275-0.

Band 194: Christian Alvarez

Simulationsgestützte Methoden zur effizienten Gestaltung von Lötprozessen in der Elektronikproduktion

FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze

Automatisierte Montage von makromechatronischen Modulen zur flexiblen Integration in hybride Pkw-Bordnetzsysteme FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008.

ISBN 978-3-87525-278-1.

Band 196: Wolfgang Hußnätter Grundlegende Untersuchungen zur experimentellen Ermittlung und zur Modellierung von Fließortkurven bei erhöhten Temperaturen

LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl

Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsatzgerechten elektronischen Baugruppen

FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-292-7. 2008.

ISBN 978-3-87525-280-4.

Band 198: Stephan Roth

Grundlegende Untersuchungen zum Excimerlaserstrahl-Abtragen unter Flüssigkeitsfilmen LFT, 113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-281-1.

Band 199: Artur Giera

Prozesstechnische Untersuchungen zum Rührreibschweißen metallischer Werkstoffe LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-282-8.

Band 200: Jürgen Lechler

Beschreibung und Modellierung des Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen LFT, 154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-286-6.

Band 201: Andreas Blankl

Untersuchungen zur Erhöhung der Band 208: Uwe Vogt Prozessrobustheit bei der Innenhochdruck-Umformung von flächigen Halbzeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten Laserstrahlfügeoperationen LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab.

2009. ISBN 978-3-87525-287-3.

Band 202: Andreas Schaller

Modellierung eines nachfrageorientierten Produktionskonzeptes für mobile Telekommunikationsgeräte

FAPS, 120 Seiten, 79 Bilder, o Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-289-7.

Band 203: Claudius Schimpf

Optimierung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfabläufen und Nacharbeitsprozessen in der Elektronikproduktion FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2000 ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich

Sensoriken zur Schwerpunktslagebestimmung der optischen Prozessemissionen beim Laserstrahltiefschweißen

LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab.

Band 205: Wolfgang Wolf

Entwicklung eines agentenbasierten Steuerungssystems zur Materialflussorganisation im wandelbaren Produktionsumfeld FAPS, 167 Seiten, 98 Bilder. 2009. ISBN 978-3-87525-293-4.

Band 206: Steffen Polster

Laserdurchstrahlschweißen transparenter Polymerbauteile LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfler

Rührreibschweißen von walzplattiertem Halbzeug und Aluminiumblech zur Herstellung flächiger Aluminiumschaum-Sandwich-Verbundstrukturen

LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-295-8.

Seriennahe Auslegung von Aluminium Tailored Heat Treated Blanks LFT, 151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tab.

2009. ISBN 978-3-87525-296-5.

Band 209: Till Laumann

Qualitative und quantitative Bewertung der Crashtauglichkeit von höchstfesten Stählen LFT, 117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tab. 2009. ISBN 978-3-87525-299-6.

Band 210: Alexander Diehl

Größeneffekte bei Biegeprozessen-Entwicklung einer Methodik zur Identifikation und Quantifizierung LFT, 180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-302-3.

Band 211: Detlev Staud

Effiziente Prozesskettenauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter und geschweißter Aluminiumbleche LFT, 164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-303-0.

Band 212: Jens Ackermann

Prozesssicherung beim Laserdurchstrahlschweißen thermoplastischer Kunststoffe LPT, 129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-305-4.

Band 213: Stephan Weidel

Grundlegende Untersuchungen zum Kontaktzustand zwischen Werkstück und Werkzeug bei umformtechnischen Prozessen unter tribologischen Gesichtspunkten LFT, 144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-307-8.

Band 214: Stefan Geißdörfer

Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassivumformung mit Methoden der FE-Simulation

LFT, 133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-308-5.

Band 215: Christian Matzner

Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betauung im Automobil

FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-309-2.

Band 216: Florian Schüßler

Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen

FAPS, 184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tab. 2.010

ISBN 978-3-87525-310-8.

Band 217: Massimo Cojutti

Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-312-2.

Band 218: Raoul Plettke

Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren LFT, 152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tab. 2010. ISBN 978-3-87525-315-3.

Band 219: Andreas Dobroschke

Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte FAPS, 184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-317-7.

Band 220: Azhar Zam

Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled Tissue-Specific Laser Surgery LPT, 99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-318-4.

Band 221: Michael Rösch

Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion

FAPS, 192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tab. 2011.

ISBN 978-3-87525-319-1.

Band 222: Thomas Rechtenwald

Quasi-isothermes Laserstrahlsintern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff-prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-320-7.

Band 223: Daniel Craiovan

Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern FAPS, 165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-324-5.

Band 224: Kay Wagner

Beanspruchungsangepasste Kaltmassivumformwerkzeuge durch lokal optimierte Werkzeugoberflächen

LFT, 147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-325-2.

Band 225: Martin Brandhuber

Verbesserung der Prognosegüte des Versagens von Punktschweißverbindungen bei höchstfesten Stahlgüten LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-327-6.

Band 226: Peter Sebastian Feuser

Ein Ansatz zur Herstellung von pressgehärteten Karosseriekomponenten mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften: Temperierte Umformwerkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimuation und funktionale Untersuchung LFT, 195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-328-3.

Band 227: Murat Arbak

Material Adapted Design of Cold Forging Tools Exemplified by Powder Metallurgical Tool Steels and Ceramics LFT, 109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-330-6.

Band 228: Indra Pitz

Beschleunigte Simulation des Laserstrahlumformens von Aluminiumblechen LPT, 137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-333-7.

Band 229: Alexander Grimm Prozessanalyse und -überwachung

des Laserstrahlhartlötens mittels optischer Sensorik LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-334-4.

Band 230: Markus Kaupper

Biegen von höhenfesten Stahlblechwerkstoffen - Umformverhalten und Grenzen der Biegbarkeit LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-339-9.

Band 231: Thomas Kroiß

Modellbasierte Prozessauslegung für die Kaltmassivumformung unter Brücksichtigung der Werkzeug- und Pressenauffederung LFT, 169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-341-2.

Band 232: Christian Goth Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID) FAPS, 176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-340-5.

Band 233: Christian Ziegler

Ganzheitliche Automatisierung mechatronischer Systeme in der Medizin am Beispiel Strahlentherapie

FAPS, 170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-342-9.

Band 234: Florian Albert

Automatisiertes Laserstrahllöten und -reparaturlöten elektronischer Baugruppen LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-344-3.

Band 235: Thomas Stöhr

Analyse und Beschreibung des mechanischen Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen LFT, 118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tab.

2013. ISBN 978-3-87525-346-7.

Band 236: Christian Kägeler

Prozessdynamik beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche im Überlappstoß LPT, 145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-347-4.

Band 237: Andreas Sulzberger

Seriennahe Auslegung der Prozesskette zur wärmeunterstützten Umformung von Aluminiumblechwerkstoffen LFT, 153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-349-8.

Band 238: Simon Opel

Herstellung prozessangepasster Halbzeuge mit variabler Blechdicke durch die Anwendung von Verfahren der Blechmassivumformung

LFT, 165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-350-4.

Band 239: Rajesh Kanawade

In-vivo Monitoring of Epithelium Vessel and Capillary Density for the Application of Detection of Clinical Shock and Early Signs of Cancer Development LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-351-1.

Band 240: Stephan Busse

Entwicklung und Qualifizierung eines Schneidclinchverfahrens LFT, 119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-352-8.

Band 241: Karl-Heinz Leitz

Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz und ultrakurz gepulster Laserstrahlung LPT, 154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-355-9.

Band 242: Markus Michl

Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen technischen Diagnose FAPS, 182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-356-6.

Band 243: Vera Sturm

Einfluss von Chargenschwankungen auf die Verarbeitungsgrenzen von Stahlwerkstoffen LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-357-3.

Band 244: Christian Neudel

Mikrostrukturelle und mechanisch-technologische Eigenschaften widerstandspunktgeschweißter Aluminium-Stahl-Verbindungen für den Fahrzeugbau LFT, 178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-358-0.

Band 245: Anja Neumann

Konzept zur Beherrschung der Prozessschwankungen im Presswerk

LFT, 162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-360-3.

Band 246: Ulf-Hermann Quentin

Laserbasierte Nanostrukturierung mit optisch positionierten Mikrolinsen

LPT, 137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-361-0.

Band 247: Erik Lamprecht

Der Einfluss der Fertigungsverfahren auf die Wirbelstromverluste von Stator-Einzelzahnblechpaketen für den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-362-7.

Band 248: Sebastian Rösel

Wirkmedienbasierte Umformung von Blechhalbzeugen unter Anwendung magnetorheologischer Flüssigkeiten als kombiniertes Wirk- und Dichtmedium LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-363-4.

Band 249: Paul Hippchen

Simulative Prognose der Geometrie indirekt pressgehärteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung LFT, 163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tab.

2014. ISBN 978-3-87525-364-1.

Band 250: Martin Zubeil

Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumformund Falzverfahren LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-365-8.

Band 251: Alexander Kühl

Flexible Automatisierung der Statorenmontage mit Hilfe einer universellen ambidexteren Kinematik FAPS, 142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tab. 2014.

ISBN 978-3-87525-367-2.

Band 252: Thomas Albrecht

Optimierte Fertigungstechnologien für Rotoren getriebeintegrierter PM-Synchronmotoren von Hybridfahrzeugen FAPS, 198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-368-9.

Band 253: Florian Risch

Planning and Production Concepts for Contactless Power Transfer Systems for Electric Vehicles FAPS, 185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tab. 2014.

ISBN 978-3-87525-369-6.

Band 254: Markus Weigl

Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen LPT, 184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-370-2.

Band 255: Johannes Noneder

Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen LFT, 161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-371-9.

Band 256: Andreas Reinhardt

Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger FAPS, 123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-373-3.

Band 257: Tobias Schmuck

Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation FAPS, 151 Seiten, 74 Bilder. 2014.

ISBN 978-3-87525-374-0.

Band 258: Bernd Eichenhüller

Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen

LFT, 127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tab. 2014. ISBN 978-3-87525-375-7.

Band 259: Felix Lütteke

Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren FAPS, 152 Seiten, 54 Bilder, 20 Tab. 2014.

ISBN 978-3-87525-376-4.

Band 260: Martin Grüner

Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium LFT, 144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tab.

2014. ISBN 978-3-87525-379-5.

Band 261: Christian Brock

Analyse und Regelung des Laserstrahltiefschweißprozesses durch Detektion der Metalldampffackelposition LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-380-1.

Band 262: Peter Vatter

Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode LFT, 145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-381-8.

Band 263: Florian Klämpfl

Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung LPT, 169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tab.

2015. ISBN 978-3-87525-384-9.

Band 264: Matthias Domke

Transiente physikalische Mechanismen bei der Laserablation von dünnen Metallschichten LPT, 133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-385-6.

Band 265: Johannes Götz

Community-basierte Optimierung des Anlagenengineerings FAPS, 177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-386-3.

Band 266: Hung Nguyen

Oualifizierung des Potentials von Verfestigungseffekten zur Erweiterung des Umformvermögens aushärtbarer Aluminiumlegierungen LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert

Erweiterung und Verbesserung von Versuchs- und Auswertetechniken für die Bestimmung von Grenzformänderungskurven LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-388-7.

Band 268: Kathleen Klaus

Erstellung eines Werkstofforientierten Fertigungsprozessfensters zur Steigerung des Formgebungsvermögens von Alumi-niumlegierungen unter Anwendung einer zwischengeschalteten Wärmebehandlung

LFT, 154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-391-7.

Band 269: Thomas Svec

Untersuchungen zur Herstellung von funktionsoptimierten Bauteilen im partiellen Presshärtprozess mittels lokal unterschiedlich temperierter Werkzeuge LFT, 166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-392-4.

Band 270: Tobias Schrader

Grundlegende Untersuchungen zur Verschleißcharakterisierung beschichteter Kaltmassivumformwerkzeuge

LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela

Untersuchung von Magnetfeld-Messmethoden zur ganzheitlichen Wertschöpfungsoptimierung und Fehlerdetektion an magnetischen Aktoren

FAPS, 170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-394-8.

Band 272: Michael Wieland

Entwicklung einer Methode zur Prognose adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen für das direkte Presshärten LFT, 156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-395-5.

Band 273: René Schramm

Strukturierte additive Metallisierung durch kaltaktives Atmosphärendruckplasma FAPS, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-396-2.

Band 274: Michael Lechner

Herstellung beanspruchungsangepasster Aluminiumblechhalbzeuge durch eine maßgeschneiderte Variation der Abkühlgeschwindigkeit nach Lösungsglühen LFT, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-397-9.

Band 275: Kolja Andreas

Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim Kaltfließpressen LFT, 169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-398-6.

Band 276: Marcus Baum

Laser Consolidation of ITO Nanoparticles for the Generation of Thin Conductive Layers on Transparent Substrates LPT, 158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-399-3.

Band 277: Thomas Schneider Umformtechnische Herstellung dünnwandiger Funktionsbauteile aus Feinblech durch Verfahren der Blechmassivumformung LFT, 188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-401-3.

Band 278: Jochen Merhof

Sematische Modellierung automatisierter Produktionssysteme zur Verbesserung der IT-Integration zwischen Anlagen-Engineering und Steuerungsebene FAPS, 157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tab. 2015. ISBN 978-3-87525-402-0.

Band 279: Fabian Zöller

Erarbeitung von Grundlagen zur Abbildung des tribologischen Systems in der Umformsimulation LFT, 126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-403-7.

Band 280: Christian Hezler

Einsatz technologischer Versuche zur Erweiterung der Versagensvorhersage bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten Stählen LFT, 147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-404-4.

Band 281: Jochen Bönig

Integration des Systemverhaltens von Automobil-Hochvoltleitungen in die virtuelle Absicherung durch strukturmechanische Simulation FAPS, 177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tab. 2016.

ISBN 978-3-87525-405-1.

Band 282: Johannes Kohl

Automatisierte Datenerfassung für diskret ereignisorientierte Simulationen in der energieflexibelen Fabrik FAPS, 160 Seiten, 80 Bilder, 27 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-406-8.

Band 283: Peter Bechtold

Mikroschockwellenumformung mittels ultrakurzer Laserpulse LPT, 155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-407-5.

Band 284: Stefan Berger

Laserstrahlschweißen thermoplastischer Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe mit spezifischem Zusatzdraht LPT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-408-2.

Band 285: Martin Bornschlegl Methods-Energy Measurement -Eine Methode zur Energieplanung für Fügeverfahren im Karosseriebau

FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-417-4. 2016.

ISBN 978-3-87525-409-9.

Band 286: Tobias Rackow

Erweiterung des Unternehmenscontrollings um die Dimension Energie FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-410-5.

Band 287: Johannes Koch

Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung zyklisch-symmetrischer Bauteile mit Nebenformelementen durch Blechmassivumformung

LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-411-2.

Band 288: Hans Ulrich Vierzigmann

Beitrag zur Untersuchung der tribologischen Bedingungen in der Blechmassivumformung - Bereitstellung von tribologischen Modellversuchen und Realisierung von Tailored Surfaces LFT, 174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-412-9.

Band 289: Thomas Senner

Methodik zur virtuellen Absicherung der formgebenden Operation des Nasspressprozesses von Gelege-Mehrschichtverbunden LFT, 156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-414-3.

Band 290: Sven Kreitlein

Der grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf als Referenzwert zur Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion FAPS, 185 Seiten, 64 Bilder, 30 Tab. 2016.

ISBN 978-3-87525-415-0.

Band 291: Christian Roos

Remote-Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche in Kehlnahtgeometrie

LPT, 123 Seiten, 52 Bilder, o Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-416-7.

Band 292: Alexander Kahrimanidis

Thermisch unterstützte Umformung von Aluminiumblechen LFT, 165 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-417-4.

Band 293: Jan Tremel

Flexible Systems for Permanent Magnet Assembly and Magnetic Rotor Measurement / Flexible Systeme zur Montage von Permanentmagneten und zur Messung magnetischer Rotoren FAPS, 152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tab. 2016. ISBN 978-3-87525-419-8.

Band 294: Ioannis Tsoupis

Schädigungs- und Versagensverhalten hochfester Leichtbauwerkstoffe unter Biegebeanspruchung LFT, 176 Seiten, 51 Bilder, 6 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-420-4.

Band 295: Sven Hildering

Grundlegende Untersuchungen zum Prozessverhalten von Silizium als Werkzeugwerkstoff für das Mikroscherschneiden metallischer Folien

LFT, 177 Seiten, 74 Bilder, 17 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-422-8.

Band 296: Sasia Mareike Hertweck

Zeitliche Pulsformung in der Lasermikromaterialbearbeitung – Grundlegende Untersuchungen und Anwendungen LPT, 146 Seiten, 67 Bilder, 5 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-423-5.

Band 297: Paryanto

Mechatronic Simulation Approach for the Process Planning of Energy-Efficient Handling Systems FAPS, 162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-424-2.

Band 298: Peer Stenzel

Großserientaugliche Nadelwickeltechnik für verteilte Wicklungen im Anwendungsfall der E-Traktionsantriebe FAPS, 239 Seiten, 147 Bilder, 20 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-425-9.

Band 299: Mario Lušić

Ein Vorgehensmodell zur Erstellung montageführender Werkerinformationssysteme simultan zum Produktentstehungsprozess FAPS, 174 Seiten, 79 Bilder, 22 Tab. 2017.

ISBN 978-3-87525-426-6.

Band 300: Arnd Buschhaus

Hochpräzise adaptive Steuerung und Regelung robotergeführter Prozesse

FAPS, 202 Seiten, 96 Bilder, 4 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-427-3.

Band 301: Tobias Laumer

Erzeugung von thermoplastischen Werkstoffverbunden mittels simultanem, intensitätsselektivem Laserstrahlschmelzen LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, o Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-428-0.

Band 302: Nora Unger

Untersuchung einer thermisch unterstützten Fertigungskette zur Herstellung umgeformter Bauteile aus der höherfesten Aluminiumlegierung EN AW-7020 LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-429-7.

Band 303: Tommaso Stellin

Design of Manufacturing Processes for the Cold Bulk Forming of Small Metal Components from Metal Strip LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab.

2017. ISBN 978-3-87525-430-3.

Band 304: Bassim Bachy

Experimental Investigation, Modeling, Simulation and Optimization of Molded Interconnect Devices (MID) Based on Laser Direct Structuring (LDS) / Experimentelle Untersuchung, Modellierung, Simulation und Optimierung von Molded Interconnect Devices (MID) basierend auf Laser Direktstrukturierung (LDS) FAPS, 168 Seiten, 120 Bilder, 26 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-431-0.

Band 305: Michael Spahr

Automatisierte Kontaktierungsverfahren für flachleiterbasierte Pkw-Bordnetzsysteme FAPS, 197 Seiten, 98 Bilder, 17 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-432-7.

Band 306: Sebastian Suttner

Charakterisierung und Modellierung des spannungszustandsabhängigen Werkstoffverhaltens der Magnesiumlegierung AZ31B für die numerische Prozessauslegung LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-433-4.

Band 307: Bhargav Potdar

A reliable methodology to deduce thermo-mechanical flow behaviour of hot stamping steels LFT, 203 Seiten, 98 Bilder, 27 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-436-5.

Band 308: Maria Löffler

Steuerung von Blechmassivumformprozessen durch maßgeschneiderte tribologische Systeme LFT, viii u. 166 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-133-1.

Band 309: Martin Müller

Untersuchung des kombinierten Trenn- und Umformprozesses beim Fügen artungleicher Werkstoffe mittels Schneidclinchverfahren

LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.

13011.970-3-90147-135-5.

Band 310: Christopher Kästle

Qualifizierung der Kupfer-Drahtbondtechnologie für integrierte Leistungsmodule in harschen Umgebungsbedingungen FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-145-4.

Band 311: Daniel Vipavc

Eine Simulationsmethode für das 3-Rollen-Schubbiegen LFT, xiii u. 121 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-147-8.

Band 312: Christina Ramer

Arbeitsraumüberwachung und autonome Bahnplanung für ein sicheres und flexibles Roboter-Assistenzsystem in der Fertigung FAPS, xiv u. 188 Seiten, 57 Bilder, 9 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-153-9.

Band 313: Miriam Rauer

Der Einfluss von Poren auf die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen von Hochleistungs-Leuchtdioden FAPS, xii u. 209 Seiten, 108 Bilder, 21 Tab. 2018.

ISBN 978-3-96147-157-7.

Band 314: Felix Tenner

Kamerabasierte Untersuchungen der Schmelze und Gasströmungen beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche LPT, xxiii u. 184 Seiten, 94 Bilder, 7 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-160-7.

Band 315: Aarief Syed-Khaja

Diffusion Soldering for High-temperature Packaging of Power Electronics

FAPS, x u. 202 Seiten, 144 Bilder, 32 Tab. 2018.

ISBN 978-3-87525-162-1.

Band 316: Adam Schaub

Grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der kombinierten Prozesskette aus Umformen und Additive Fertigung LFT, xi u. 192 Seiten, 72 Bilder, 27 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-166-9.

Band 317: Daniel Gröbel

Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung LFT, x u. 165 Seiten, 96 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-168-3.

Band 318: Philipp Hildenbrand

Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Tailored Blanks mit definierten Halbzeugeigenschaften durch einen Taumelprozess

LFT, ix u. 153 Seiten, 77 Bilder, 4 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-174-4.

Band 319: Tobias Konrad

Simulative Auslegung der Spannund Fixierkonzepte im Karosserierohbau: Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit unter Berücksichtigung schwankender Einflussgrößen LFT, x u. 203 Seiten, 134 Bilder, 32

Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-176-8.

Band 320: David Meinel

Architektur applikationsspezifischer Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren am Beispiel modularer Triebzüge FAPS, xii u. 166 Seiten, 82 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-184-3.

Band 321: Andrea Zimmermann

Grundlegende Untersuchungen zum Einfluss fertigungsbedingter Eigenschaften auf die Ermüdungsfestigkeit kaltmassivumgeformter Bauteile

LFT, ix u. 160 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-190-4.

Band 322: Christoph Amann

Simulative Prognose der Geometrie nassgepresster Karosseriebauteile aus Gelege-Mehrschichtverbunden LFT, xvi u. 169 Seiten, 80 Bilder, 13 Tab. 2019.

ISBN 978-3-96147-194-2.

Band 323: Jennifer Tenner

Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse durch maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen LFT, x u. 187 Seiten, 68 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-196-6.

Band 324: Susan Zöller

Mapping Individual Subjective Values to Product Design KTmfk, xi u. 223 Seiten, 81 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-202-4.

Band 325: Stefan Lutz

Erarbeitung einer Methodik zur semiempirischen Ermittlung der Umwandlungskinetik durchhärtender Wälzlagerstähle für die Wärmebehandlungssimulation LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

Band 326: Tobias Gnibl

Modellbasierte Prozesskettenabbildung rührreibgeschweißter Aluminiumhalbzeuge zur umformtechnischen Herstellung höchstfester Leichtbau-strukturteile LFT, xii u. 167 Seiten, 68 Bilder, 17 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-217-8.

Band 327: Johannes Bürner

Technisch-wirtschaftliche Optionen zur Lastflexibilisierung durch intelligente elektrische Wärmespeicher

FAPS, xiv u. 233 Seiten, 89 Bilder, 27 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-219-2.

Band 328: Wolfgang Böhm

Verbesserung des Umformverhaltens von mehrlagigen Aluminiumblechwerkstoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-227-7.

Band 329: Stefan Landkammer

Grundsatzuntersuchungen, mathematische Modellierung und Ableitung einer Auslegungsmethodik für Gelenkantriebe nach dem Spinnenbeinprinzip LFT, xii u. 200 Seiten, 83 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-229-1.

Band 330: Stephan Rapp

Pump-Probe-Ellipsometrie zur Messung transienter optischer Materialeigen-schaften bei der Ultrakurzpuls-Lasermaterialbearbeitung LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2 Tab. 2019.

ISBN 978-3-96147-235-2.

Band 331: Michael Scholz

Intralogistics Execution System mit integrierten autonomen, servicebasierten Transportentitäten FAPS, xi u. 195 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-237-6.

Band 332: Eva Bogner

Strategien der Produktindividualisierung in der produzierenden Industrie im Kontext der Digitalisierung FAPS, ix u. 201 Seiten, 55 Bilder, 28 Tab. 2019.

ISBN 978-3-96147-246-8.

Band 333: Daniel Benjamin Krüger

Ein Ansatz zur CAD-integrierten muskuloskelettalen Analyse der Mensch-Maschine-Interaktion KTmfk, x u. 217 Seiten, 102 Bilder, 7 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-250-5.

Band 334: Thomas Kuhn

Qualität und Zuverlässigkeit laserdirektstrukturierter mechatronisch integrierter Baugruppen (LDS-MID) FAPS, ix u. 152 Seiten, 69 Bilder, 12 Tab. 2019. ISBN: 978-3-96147-252-9.

Band 335: Hans Fleischmann

Modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung auf Basis soziocyber-physischer Systeme FAPS, xi u. 214 Seiten, 111 Bilder, 18 Tab. 2019. ISBN: 978-3-96147-256-7.

Band 336: Markus Michalski

Grundlegende Untersuchungen zum Prozess- und Werkstoffverhalten bei schwingungsüberlagerter Umformung LFT, xii u. 197 Seiten, 93 Bilder, 11 Tab. 2019. ISBN: 978-3-96147-270-3.

Band 337: Markus Brandmeier

Ganzheitliches ontologiebasiertes Wissensmanagement im Umfeld der industriellen Produktion FAPS, xi u. 255 Seiten, 77 Bilder, 33 Tab. 2020. ISBN: 978-3-96147-275-8.

Band 338: Stephan Purr

Datenerfassung für die Anwendung lernender Algorithmen bei der Herstellung von Blechformteilen LFT, ix u. 165 Seiten, 48 Bilder, 4 Tab. 2020. ISBN: 978-3-96147-281-9.

Band 339: Christoph Kiener

Kaltfließpressen von gerad- und schrägverzahnten Zahnrädern LFT, viii u. 151 Seiten, 81 Bilder, 3 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-287-1.

Band 340: Simon Spreng

Numerische, analytische und empirische Modellierung des Heißcrimpprozesses FAPS, xix u. 204 Seiten, 91 Bilder, 27 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-293-2.

Band 341: Patrik Schwingenschlögl

Erarbeitung eines Prozessverständnisses zur Verbesserung der tribologischen Bedingungen beim Presshärten LFT, x u. 177 Seiten, 81 Bilder, 8 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-297-0.

Band 342: Emanuela Affronti

Evaluation of failure behaviour of sheet metals LFT, ix u. 136 Seiten, 57 Bilder, 20 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-303-8.

Band 343: Julia Degner

Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung hochfester Aluminiumblechbauteile in einem kombinierten Umform- und Abschreckprozess LFT, x u. 172 Seiten, 61 Bilder, 9 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-307-6.

Band 344: Maximilian Wagner

Automatische Bahnplanung für die Aufteilung von Prozessbewegungen in synchrone Werkstück- und Werkzeugbewegungen mittels Multi-Roboter-Systemen FAPS, xxi u. 181 Seiten, 111 Bilder, 15 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-309-0.

Band 345: Stefan Härter

Qualifizierung des Montageprozesses hochminiaturisierter elektronischer Bauelemente FAPS, ix u. 194 Seiten, 97 Bilder, 28 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-314-4.

Band 346: Toni Donhauser

Ressourcenorientierte Auftragsregelung in einer hybriden Produktion mittels betriebsbegleitender Simulation FAPS, xix u. 242 Seiten, 97 Bilder, 17 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-316-8.

Band 347: Philipp Amend

Laserbasiertes Schmelzkleben von Thermoplasten mit Metallen LPT, xv u. 154 Seiten, 67 Bilder. 2020. ISBN 978-3-96147-326-7.

Band 348: Matthias Ehlert

Simulationsunterstützte funktionale Grenzlagenabsicherung KTmfk, xvi u. 300 Seiten, 101 Bilder, 73 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-328-1.

Band 349: Thomas Sander

Ein Beitrag zur Charakterisierung und Auslegung des Verbundes von Kunststoffsubstraten mit harten Dünnschichten KTmfk, xiv u. 178 Seiten, 88 Bilder, 21 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-330-4.

Band 350: Florian Pilz

Fließpressen von Verzahnungselementen an Blechen LFT, x u. 170 Seiten, 103Bilder, 4 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-332-8.

Band 351: Sebastian Josef Katona

Evaluation und Aufbereitung von Produktsimulationen mittels abweichungsbehafteter Geometriemodelle KTmfk, ix u. 147 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-336-6.

Band 352: Jürgen Herrmann

Kumulatives Walzplattieren. Bewertung der Umformeigenschaften mehrlagiger Blechwerkstoffe der ausscheidungshärtbaren Legierung AA6014 LFT, x u. 157 Seiten, 64 Bilder, 5 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-344-1.

Band 353: Christof Küstner

Assistenzsystem zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung KTmfk, xii u. 219 Seiten, 63 Bilder, 14 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-348-9.

Band 354: Tobias Gläßel

Prozessketten zum Laserstrahlschweißen von flachleiterbasierten Formspulenwicklungen für automobile Traktionsantriebe FAPS, xiv u. 206 Seiten, 89 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-356-4.

1021 (970 J 90147 JJ0 4

Band 355: Andreas Meinel

Experimentelle Untersuchung der Auswirkungen von Axialschwingungen auf Reibung und Verschleiß in Zylinderrol-lenlagern KTmfk, xii u. 162 Seiten, 56 Bilder, 7 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-358-8.

Band 356: Hannah Riedle

Haptische, generische Modelle weicher anatomischer Strukturen für die chirurgische Simulation FAPS, xxx u. 179 Seiten, 82 Bilder, 35 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-367-0.

Band 357: Maximilian Landgraf

Leistungselektronik für den Einsatz dielektrischer Elastomere in aktorischen, sensorischen und integrierten sensomotorischen Systemen FAPS, xxiii u. 166 Seiten, 71 Bilder, 10 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-380-9.

Band 358: Alireza Esfandyari

Multi-Objective Process Optimization for Overpressure Reflow Soldering in Electronics Production FAPS, xviii u. 175 Seiten, 57 Bilder, 23 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-382-3.

Band 359: Christian Sand

Prozessübergreifende Analyse komplexer Montageprozessketten mittels Data Mining FAPS, XV u. 168 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-398-4.

Band 360: Ralf Merkl

Closed-Loop Control of a Storage-Supported Hybrid Compensation System for Improving the Power Quality in Medium Voltage Networks FAPS, xxvii u. 200 Seiten, 102 Bilder, 2 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-402-8.

Band 361: Thomas Reitberger

Additive Fertigung polymerer optischer Wellenleiter im Aerosol-Jet-Verfahren FAPS, xix u. 141 Seiten, 65 Bilder, 11 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-400-4.

Band 362: Marius Christian Fechter

Modellierung von Vorentwürfen in der virtuellen Realität mit natürlicher Fingerinteraktion KTmfk, x u. 188 Seiten, 67 Bilder, 19 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-404-2.

Band 363: Franziska Neubauer Oberflächenmodifizierung und Entwicklung einer Auswertemethodik zur Verschleißcharakterisierung im Presshärteprozess LFT, ix u. 177 Seiten, 42 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-406-6.

Band 364: Eike Wolfram Schäffer

Web- und wissensbasierter Engineering-Konfigurator für roboterzentrierte Automatisierungslösungen FAPS, xxiv u. 195 Seiten, 108 Bilder, 25 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-410-3.

Band 365: Daniel Gross

Untersuchungen zur kohlenstoffdioxidbasierten kryogenen Minimalmengenschmierung REP, xii u. 184 Seiten, 56 Bilder, 18 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-412-7.

Band 366: Daniel Junker

Qualifizierung laser-additiv gefertigter Komponenten für den Einsatz im Werkzeugbau der Massivumformung LFT, vii u. 142 Seiten, 62 Bilder, 5 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-416-5.

Band 367: Tallal Javied

Totally Integrated Ecology Management for Resource Efficient and Eco-Friendly Production FAPS, xv u. 160 Seiten, 60 Bilder, 13 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-418-9.

Band 368: David Marco Hochrein

Wälzlager im Beschleunigungsfeld – Eine Analysestrategie zur Bestimmung des Reibungs-, Axialschub- und Temperaturverhaltens von Nadelkränzen – KTmfk, xiii u. 279 Seiten, 108 Bilder, 39 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-420-2.

Band 369: Daniel Gräf

Funktionalisierung technischer Oberflächen mittels prozessüberwachter aerosolbasierter Drucktechnologie FAPS, xxii u. 175 Seiten, 97 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-433-2.

Band 370: Andreas Gröschl

Hochfrequent fokusabstandsmodulierte Konfokalsensoren für die Nanokoordinatenmesstechnik FMT, x u. 144 Seiten, 98 Bilder, 6 Tab. 2021.

ISBN 978-3-96147-435-6.

Band 371: Johann Tüchsen

Konzeption, Entwicklung und Einführung des Assistenzsystems D-DAS für die Produktentwicklung elektrischer Motoren KTmfk, xii u. 178 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-437-0.

Band 372: Max Marian

Numerische Auslegung von Oberflächenmikrotexturen für geschmierte tribologische Kontakte KTmfk, xviii u. 276 Seiten, 85 Bilder, 45 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-439-4.

Band 373: Johannes Strauß

Die akustooptische Strahlformung in der Lasermaterialbearbeitung LPT, xvi u. 113 Seiten, 48 Bilder. 2021. ISBN 978-3-96147-441-7.

Band 374: Martin Hohmann

Machine learning and hyper spectral imaging: Multi Spectral Endoscopy in the Gastro Intestinal Tract towards Hyper Spectral Endoscopy LPT, x u. 137 Seiten, 62 Bilder, 29 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-445-5.

Band 375: Timo Kordaß

Lasergestütztes Verfahren zur selektiven Metallisierung von epoxidharzbasierten Duromeren zur Steigerung der Integrationsdichte für dreidimensionale mechatronische Package-Baugruppen FAPS, xviii u. 198 Seiten, 92 Bilder, 24 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-443-1.

.

Band 376: Philipp Kestel Assistenzsystem für den wissensbasierten Aufbau konstruktionsbegleitender Finite-Elemente-Analysen

KTmfk, xviii u. 209 Seiten, 57 Bilder, 17 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-457-8.

Band 377: Martin Lerchen

Messverfahren für die pulverbettbasierte additive Fertigung zur Sicherstellung der Konformität mit geometrischen Produktspezifikationen FMT, x u. 150 Seiten, 60 Bilder, 9 Tab. 2021.

ISBN 978-3- 96147-463-9.

Band 378: Michael Schneider

Inline-Prüfung der Permeabilität in weichmagnetischen Komponenten

FAPS, xxii u. 189 Seiten, 79 Bilder, 14 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-465-3.

Band 379: Tobias Sprügel

Sphärische Detektorflächen als Unterstützung der Produktentwicklung zur Datenanalyse im Rahmen des Digital Engineering KTmfk, xiii u. 213 Seiten, 84 Bilder, 33 Tab. 2021.

ISBN 978-3-96147-475-2.

Band 380: Tom Häfner

Multipulseffekte beim Mikro-Materialabtrag von Stahllegierungen mit Pikosekunden-Laserpulsen LPT, xxviii u. 159 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-479-0.

Band 381: Björn Heling

Einsatz und Validierung virtueller Absicherungsmethoden für abweichungs-behaftete Mechanismen im Kontext des Robust Design KTmfk, xi u. 169 Seiten, 63 Bilder, 27 Tab. 2021.

ISBN 978-3-96147-487-5.

Band 382: Tobias Kolb

Laserstrahl-Schmelzen von Metallen mit einer Serienanlage – Prozesscharakterisierung und Erweiterung eines Überwachungssystems LPT, xv u. 170 Seiten, 128 Bilder, 16

Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-491-2.

Band 383: Mario Meinhardt

Widerstandselementschweißen mit gestauchten Hilfsfügeelementen - Umformtechnische Wirkzusammenhänge zur Beeinflussung der Verbindungsfestigkeit LFT, xii u. 189 Seiten, 87 Bilder, 4 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-473-8.

Band 384: Felix Bauer

Ein Beitrag zur digitalen Auslegung von Fügeprozessen im Karosseriebau mit Fokus auf das Remote-Laserstrahlschweißen unter Einsatz flexibler Spanntechnik LFT, xi u. 185 Seiten, 74 Bilder, 12 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-498-1.

Band 385: Jochen Zeitler

Konzeption eines rechnergestützten Konstruktionssystems für optomechatronische Baugruppen FAPS, xix u. 172 Seiten, 88 Bilder, 11 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-499-8.

Band 386: Vincent Mann

Einfluss von Strahloszillation auf das Laserstrahlschweißen hochfester Stähle LPT, xiii u. 172 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-503-2.

Band 387: Chen Chen

Skin-equivalent opto-/elastofluidic in-vitro microphysiological vascular models for translational studies of optical biopsies LPT, xx u. 126 Seiten, 60 Bilder, 10 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-505-6.

Band 388: Stefan Stein

Laser drop on demand joining as bonding method for electronics assembly and packaging with high thermal requirements LPT, x u. 112 Seiten, 54 Bilder, 10 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-507-0

Band 389: Nikolaus Urban

Untersuchung des Laserstrahlschmelzens von Neodym-Eisen-Bor zur additiven Herstellung von Permanentmagneten FAPS, x u. 174 Seiten, 88 Bilder, 18 Tab. 2022. ISBN: 978-3-96147-501-8.

Band 390: Yiting Wu

Großflächige Topographiemessungen mit einem Weißlichtinterferenzmikroskop und einem metrologischen Rasterkraftmikroskop FMT, xii u. 142 Seiten, 68 Bilder, 11 Tab. 2022. ISBN: 978-3-96147-513-1.

Band 391: Thomas Papke

Untersuchungen zur Umformbarkeit hybrider Bauteile aus Blechgrundkörper und additiv gefertigter Struktur LFT, xii u. 194 Seiten, 71 Bilder, 16 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-515-5.

Band 392: Bastian Zimmermann

Einfluss des Vormaterials auf die mehrstufige Kaltumformung vom Draht LFT, xi u. 182 Seiten, 36 Bilder, 6 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-519-3.

Band 393: Harald Völkl

Ein simulationsbasierter Ansatz zur Auslegung additiv gefertigter FLM-Faserverbundstrukturen KTmfk, xx u. 204 Seiten, 95 Bilder, 22 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-523-0.

Band 394: Robert Schulte

Auslegung und Anwendung prozessangepasster Halbzeuge für Verfahren der Blechmassivumformung

LFT, x u. 163 Seiten, 93 Bilder, 5 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-525-4.

10211 970 3 90147 525 4.

Band 395: Philipp Frey

Umformtechnische Strukturierung metallischer Einleger im Folgeverbund für mediendichte Kunststoff-Metall-Hybridbauteile LFT, ix u. 180 Seiten, 83 Bilder, 7 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-534-6.

Band 396: Thomas Johann Luft

Komplexitätsmanagement in der Produktentwicklung - Holistische Modellierung, Analyse, Visualisierung und Bewertung komplexer Systeme KTmfk, xiii u. 510 Seiten, 166 Bilder, 16 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-540-7.

Band 397: Li Wang

Evaluierung der Einsetzbarkeit des lasergestützten Verfahrens zur selektiven Metallisierung für die Verbesserung passiver Intermodulation in Hochfrequenzanwendungen FAPS, xxii u.151 Seiten, 72 Bilder, 22

Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-542-1.

Band 398: Sebastian Reitelshöfer

Der Aerosol-Jet-Druck Dielektrischer Elastomere als additives Fertigungsverfahren für elastische mechatronische Komponenten FAPS, xxv u. 206 Seiten, 87 Bilder, 13 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-547-6.

Band 399: Alexander Meyer

Selektive Magnetmontage zur Verringerung des Rastmomentes permanenterregter Synchronmotoren FAPS, xv u. 164 Seiten, 90 Bilder, 18 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-555-1.

Band 400: Rong Zhao

Design verschleißreduzierender amorpher Kohlenstoffschichtsysteme für trockene tribologische Gleitkontakte KTmfk, x u. 148 Seiten, 69 Bilder, 14 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-557-5.

Band 401: Christian P. J. Schwarzer

Kupfersintern als Fügetechnologie für Leistungselektronik FAPS, xxvii u. 234 Seiten, 125 Bilder, 24 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-566-7.

Band 402: Alexander Horn

Grundlegende Untersuchungen zur Gradierung der mechanischen Eigenschaften pressgehärteter Bauteile durch eine örtlich begrenzte Aufkohlung LFT, xii u. 204 Seiten, 58 Bilder, 6 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-568-1.

Band 403: Artur Klos

Werkstoff- und umformtechnische Bewertung von hochfesten Aluminiumblechwerkstoffen für den Karosseriebau LFT, x u. 192 Seiten, 73 Bilder, 12 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-572-8.

Band 404: Harald Schmid

Ganzheitliche Erarbeitung eines Prozessverständnisses von Tiefziehprozessen mit Ziehsicken auf Basis mechanischer und tribologischer Analysen

LFT, xiii u. 211 Seiten, 78 Bilder, 5 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-577-3.

Band 405: Johannes Henneberg Blechmassivumformung von Funktionsbauteilen aus Bandmaterial LFT, viii u. 176 Seiten, 101 Bilder, 2 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-579-7.

Band 406: Anton Schmailzl

Festigkeits- und zeitoptimierte Prozessführung beim quasi-simultanen Laser-Durchstrahlschweißen LPT, xiii u. 157 Seiten, 84 Bilder, 7 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-583-4.

Band 407: Alexander Wolf

Modellierung und Vorhersage menschlichen Interaktionsverhaltens zur Analyse der Mensch-Produkt Interaktion KTmfk, x u. 207 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-585-8.

Band 408: Tim Weikert

Modifikationen amorpher Kohlenstoffschichten zur Anpassung der Reibungsbedingungen und zur Erhöhung des Verschleißschutzes KTmfk, xvii u. 258 Seiten, 91 Bilder, 9 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-589-6.

Band 409: Stefan Götz

Frühzeitiges konstruktionsbegleitendes Toleranzmanagement KTmfk, ix u. 276 Seiten, 127 Bilder, 13 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-593-3.

Band 410: Markus Hubert

Einsatzpotenziale der Rotationsschneidtechnologie in der Verarbeitung von metallischen Funktionsfolien für mechatronische Produkte FAPS, xviii u. 139 Seiten, 86 Bilder, 7 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-603-9.

Band 411: Manfred Vogel

Grundlagenuntersuchungen und Erarbeitung einer Methodik zur Herstellung maßgeschneiderter Halbzeuge auf Basis eines neuartigen flexiblen Walzprozesses LFT, ix u. 176 Seiten, 61 Bilder, 11 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-605-3.

Band 412: Michael Weigelt

Multidimensionale Optionenanalyse alternativer Antriebskonzepte für die individuelle Langstreckenmobilität FAPS, xv u. 222 Seiten, 89 Bilder, 38 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-607-7.

Band 413: Frank Bodendorf

Machine Learning im Cost Engineering des Supply Managements FAPS, xiii u. 166 Seiten, 75 Bilder, 13 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-609-1.

Band 414: Maximilian Metzler

Planung und Simulation taktiler, intelligenter und kollaborativer Roboterfähigkeiten in der Montage FAPS, xix u. 174 Seiten, 72 Bilder, 3 Tab. 2023. ISBN 978-3-96147-611-4.

Band 415: Tina Buker

Ein Ansatz zur Reduktion produktinduzierter Nutzerstigmatisierung durch Förderung einer gleichermaßen gebrauchstauglichen wie emotionalen Produktgestalt KTmfk, x u. 236 Seiten, 54 Bilder, 44 Tab. 2022. ISBN: 978-3-96147-613-8.

Band 416: Marlene Kuhn

Model-based Traceability System Development for Complex Manufacturing Applying Blockchain and Graphs FAPS, xv u. 167 Seiten, 63 Bilder, 10 Tab. 2022. ISBN: 978-3-96147-615-2.

Band 417: Benjamin Lengenfelder

Remote photoacoustic sensing using speckle-analysis for biomedical imaging LPT, xv u. 124 Seiten, 86 Bilder, 10 Tab. 2023. ISBN: 978-3-96147-617-6.

Band 418: Benjamin Pohrer

Analyse des Zusammenhangs zwischen dem tribochemischen Aufbau von Grenzschichten und der Ausbildung von White Etching Crack-Schäden KTmfk, xv u. 258 Seiten, 103 Bilder, 10 Tab. 2023. ISBN: 978-3-96147- 621-3.

Band 419: Matthias Friedlein

Zuverlässigkeitsmethoden zur Beschleunigung von Qualifizierungsuntersuchungen für Steckkontakte FAPS, xxv u. 162 Seiten, 98 Bilder, 7 Tab. 2023. ISBN: 978-3-96147-625-1.

Abstract

This thesis developed and analytically evaluated three consecutive but independent methods for accelerating thermal qualification tests of automotive contacts.

First, introduction of micro movements in the contact zone at constant elevated temperatures via a specific test set-up, did not to cause statistically significant damage. This was due to the lack of passing the dew point and condensation of moisture in the contact zone.

Second, the car usage behavior in Europe was analyzed and transferred to more realistic load profiles. These were carried out in relative motion tests at constant elevated temperatures and as a load profile based on thermal cycles. Only the thermal cycling load-profile was able to cause significant damage in the contact zone faster than in regular thermal cycling tests.

Third, a methodology combined calibrated lifetime tests (CALT) with analytical methods for lifetime prediction. The modified Norris-Landzberg model provided a suitable and conservative lifetime prediction for the given connector application. In direct comparison with the conventional CALT-methodology, the combined method dramatically improved the prediction accuracy.

Therefore, the combination of the CALT methodology with acceleration models constitutes a promising way to assist life-time assessment during development of new contacting technologies. Especially research projects, benefit from the methodical way of estimating the lifetime at an early stage.

This work was funded by the European Union's European Regional Development Fund (ERDF).

In dieser Arbeit wurde ein dreigliedriges Lösungssystem für thermische Lebensdauertest an automobilen Steckkontakten entwickelt. Das System beruhte dabei auf drei evolutionär entwickelten, aber dennoch unabhängig einsetzbaren Methoden zur Beschleunigung der Qualifizierungstests.

Die Entkopplung der Einflüsse auf Steckverbinderkontakte durch einen Versuchsaufbau, bei dem Mikrobewegungen bei konstant erhöhter Temperatur eingebracht wurden, konnte keine statistisch signifikanten Beschädigungen auslösen. Hierfür wurde das Fehlen des Durchschreitens des Taupunktes als Ursache ausgemacht.

Auf Basis der Analyse des Pkw-Nutzungsverhalten in Europa wurden realitätsnahe Lastprofile entwickelt. Mithilfe eines auf thermischen Zyklen beruhenden Profils konnte eine Beschleunigung der Ausfälle im Vergleich zu regulären Temperaturwechseltests erzielt werden. Die abschließende Methodik beruhte auf der Kombination von kalibrierten Lebensdauertests mit Raffungsmodellen. Dabei erwies sich das modifizierte Norris-Landzberg-Modell als geeignet, die Lebensdauer von Steckverbinderkontakten vorherzusagen.

Der Einsatz der mit Raffungsmodellen kombinierten CALT-Methodik stellt daher eine vielversprechende Möglichkeit dar, um während der Entwicklung neuer Kontaktierungstechniken eine Hilfestellung bei der Beurteilung der Lebensdauer zu leisten.

