

Stefan Heitz

**Seriennahe  
Grundlagenuntersuchung  
des Hot-Staking-Prozesses**



**Cuvillier Verlag Göttingen**  
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag



# Seriennahe Grundlagenuntersuchung des Hot-Staking-Prozesses





Dissertation zur Erlangung des  
Doktorgrades der Technischen Fakultät der  
Albert-Ludwigs-Universität  
Freiburg im Breisgau

**Seriennahe**  
**Grundlagenuntersuchung des**  
**Hot-Staking-Prozesses**

Dipl.-Phys. Stefan Heitz

2017

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau  
Technische Fakultät  
Institut für Mikrosystemtechnik



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.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2017

Zugl.: Freiburg, Univ., Diss., 2017

## **Dekan**

Prof. Dr. Oliver Paul

## **Referenten**

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Wilde

Prof. Dr. Claas Müller

## **Datum der Promotion**

23.08.2017

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2017

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

[www.cuvillier.de](http://www.cuvillier.de)

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung  
des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile  
daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie)  
zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2017

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier  
aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-7369-9655-7

eISBN 978-3-7369-8655-8



# Inhaltsverzeichnis

---

<b>Kurzfassung</b>	<b>1</b>
<b>Abstract</b>	<b>3</b>
<b>1 Motivation</b>	<b>5</b>
<b>2 Stand der Technik</b>	<b>11</b>
2.1 Elektrokleinmotoren . . . . .	11
2.1.1 Aufbau und Funktionsweise eines DC-Motors . . .	13
2.2 Widerstandsschweißen . . . . .	16
2.3 Prozesskontrolle beim Widerstandsschweißen . . . . .	18
2.4 Mechanismen der Verbindungsbildung . . . . .	21
2.4.1 Diffusion . . . . .	21
2.4.2 Metallbindung . . . . .	23
<b>3 Das Hot-Staking-Verfahren</b>	<b>25</b>
3.1 Der allgemeine Prozessablauf . . . . .	26
3.2 Voruntersuchungen zum Hot-Staking-Prozess . . . . .	28
3.3 Materialien und Werkstoffe . . . . .	30
3.4 Widerstandsmodell . . . . .	32
<b>4 Zielsetzung und Vorgehensweise</b>	<b>37</b>
<b>5 Messtechnik und Messaufbau</b>	<b>39</b>
5.1 Versuchsaufbau an der Labormaschine . . . . .	39
5.2 Hakenverschiebekraft . . . . .	44
5.3 Temperaturmessung . . . . .	45



<b>6</b>	<b>Prozessphasenanalyse</b>	<b>47</b>
6.1	Die fünf Prozessphasen . . . . .	47
6.1.1	Prozessphase I . . . . .	48
6.1.2	Prozessphase II . . . . .	48
6.1.3	Prozessphase III . . . . .	50
6.1.4	Prozessphase IV . . . . .	50
6.1.5	Prozessphase V . . . . .	50
6.2	Prozessablauftabelle . . . . .	51
<b>7</b>	<b>Wirkzusammenhänge</b>	<b>53</b>
7.1	Einflussfaktoren auf die Festigkeit der Verbindung . . . . .	54
7.1.1	Einfluss der Stromflussdauer auf die Hakenverschiebekraft . . . . .	54
7.1.2	Einfluss einer Druckerhöhung innerhalb des Prozessablaufs . . . . .	59
7.1.3	Metallografische Analysen der vorherigen Versuchsreihen . . . . .	63
7.1.4	Härtemessungen der Kontaktierung unter Serienbedingungen . . . . .	73
7.1.5	Einfluss der Oberflächenstruktur . . . . .	75
7.2	Zusammenhang zwischen den Parametern Stromstärke und Druck . . . . .	79
7.3	Messung der Prozesstemperatur . . . . .	83
7.4	Verbindungsmechanismus . . . . .	88
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>101</b>
<b>A</b>	<b>Anhang: Datenblätter der Sensoren</b>	<b>105</b>
A.1	Wegmessung . . . . .	105
A.2	Strom- und Spannungsmessung . . . . .	107
A.3	Druckmessung . . . . .	107
<b>B</b>	<b>Anhang: Python-Skript zur Auswertung der Analogsignale</b>	<b>109</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>111</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>113</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>117</b>
	<b>Literatur</b>	<b>119</b>



# Kurzfassung

---

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist der Aufbau eines grundlegenden Prozessverständnisses des Hot-Staking-Prozesses an Hakenkommutatoren in der Elektrokleinmotorenfertigung. Auf diesem Gebiet sind trotz vieljähriger Anwendung in unterschiedlichen Bereichen noch einige wissenschaftliche Lücken vorhanden, die es zu schließen gilt. So werden in dieser Arbeit grundlegende Prozesselemente und Wirkzusammenhänge dargestellt, deren Kern eine sequentielle Prozessphasenanalyse darstellt. Ein Messaufbau ermöglicht die zeitsynchrone Erfassung und Analyse prozessrelevanter Kenngrößen. Dies erlaubt es, Aussagen über charakteristische Abschnitte im Gesamtprozessablauf zu treffen. Der Hot-Staking-Prozess ist ein sehr komplexer Prozess aufgrund seiner mechanischen, elektrischen und thermischen Komponenten. Die Kenntnis über verschiedene Prozessphasen in Kombination mit den Signalverläufen und den Vorgängen in Bezug auf die drei Komponenten ermöglicht es, Aussagen zu treffen, wie der Prozessablauf überwacht, geregelt oder auch verbessert werden kann.

Hierbei wurden fünf Phasen im Prozessablauf charakterisiert. Beginnend mit der Phase des Anfahrens der Schweißelektrode auf den Haken mit damit verbundenem Vorbiegen parallel zur Lamelle, schließen sich drei Phasen unter Stromfluss an. Bedingt durch die zunehmende Erwärmung der Komponenten und dem anhaltenden Druck verformt sich der Haken und schmiegt sich an die Lamelle an, verdampft die Lackisolation des Drahtes und bildet sich letztlich eine Verbindung zwischen dem Haken und der Lamelle aus. In der abschließenden stromlosen Phase werden den Komponenten die Wärme entzogen und die Elektroden heben ab.

Des Weiteren wird diese Analyse einzelner Phasen durch die Messung auftretender Temperaturen an prozessrelevanter Messstelle ergänzt. In früheren Veröffentlichungen hierzu wurden, aus messtechnischen Gründen sowie aus Gründen der Zugänglichkeit, ausschließlich Temperaturen





außerhalb der Verbindungsstelle zwischen Haken und Lamelle gemessen. In diesem Fall wird die Temperatur jedoch im Prozess und zeitsynchron zu anderen Messgrößen bestimmt. Somit wird neben dem eigentlichen Temperaturwert ein Überblick ermöglicht, wie sich die Temperatur in Relation zu anderen Kenngrößen verhält und wie diese sich gegenseitig beeinflussen.

Ebenfalls unbekannt ist, welchen Einfluss die Oberfläche des Kommutators auf die Verbindungsbildung zwischen dem Haken und der Lamelle hat. Zur Schließung dieser Lücke werden präparierte Kommutatoren in die Serienfertigungslinie eingespeist. Im Anschluss daran werden die Verschiebekräfte der jeweiligen Haken der Kommutatoren gemessen und miteinander verglichen.

# Abstract

---

The objective of this thesis is the development of a basic understanding of the hot-staking process at commutators in the production of small electric motors. In the field of this process there are still many scientific gaps existing although this process has been applied since many years. Therefore fundamental process elements and interactions will be presented in this thesis. Core of these elements is a sequential process analysis. A measurement setup allows the time-synchronized capture and analysis of process-relevant characteristic values. This allows making predictions about characteristic sections within the entire process sequence. Because of the combination of mechanical, electrical and thermal components, the hot-staking process is very complex. The knowledge of different process sequences combined with their signal characteristics allows to make predictions about process monitoring, regulation and improvement.

Five separate phases can be identified during the process. Starting with the phase of the tang's movement towards the lamella and the resulting deformation of the tang, three phases under current flow follow. Caused by the temperature increase of the components and the persistent pressure, the tang deforms and clings to the lamella, the insulation of the wire vaporizes and finally a connection between tang and lamella is formed. During the last phase without current flow, the temperature is deprived and the electrodes raise up.

This analysis of single phases is extended by the measurement of occurring temperatures at relevant position. Because of metrological reasons, the temperature measurement took only place outside of the junction of tang and lamella in former publications. In this study the temperature is measured within the process and time synchronized to other measurands. Thus, an overview is given how the temperature behaves in comparison to other measurands and how they affect each other.



The affect of the commutator surface on the connection formation between tang and lamella is also unknown. To close this gap, prepared commutators are injected into series production line. Thereafter the displacement forces of the tangs are measured and compared.

# 1

## Motivation

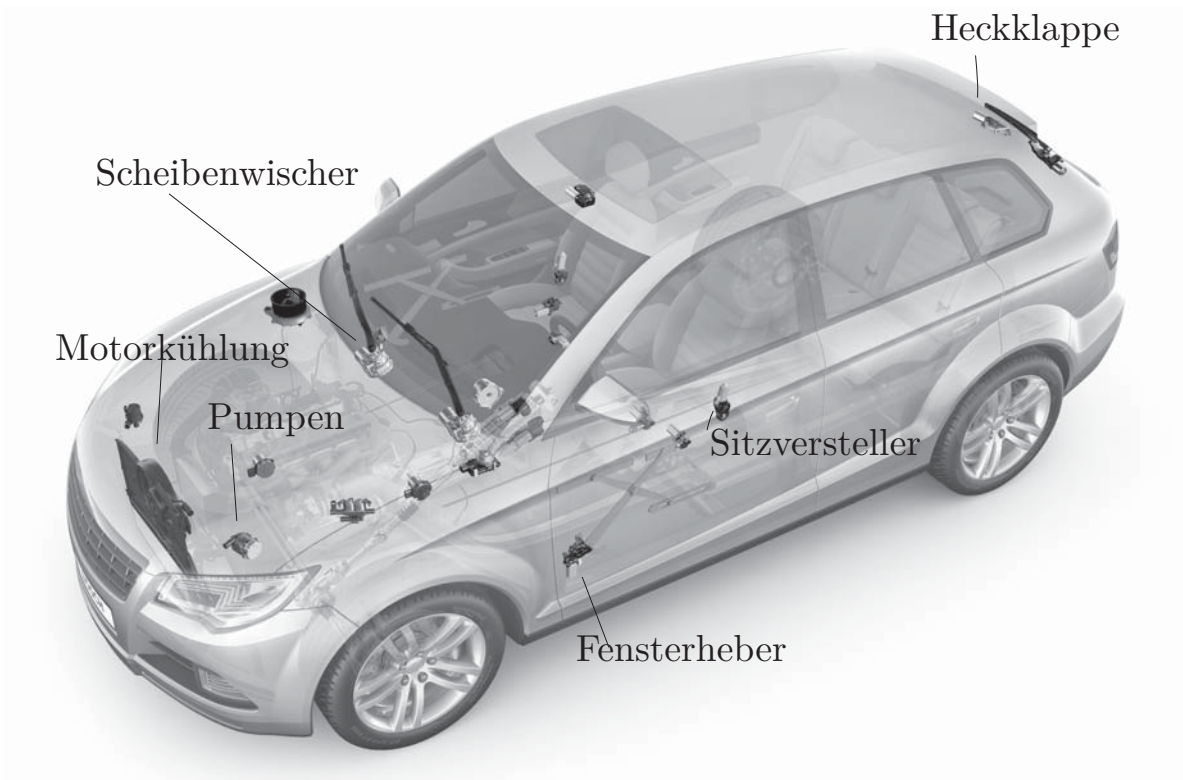
---

Elektromotoren finden seit mehreren Jahrzehnten in den verschiedensten Bereichen Anwendung, von der Medizintechnik bis zu Gartengeräten. Eines der Haupteinsatzgebiete ist jedoch nach wie vor die Automobilindustrie, wo sie beispielsweise als Stellsysteme für Sitze, Fenster oder Heckklappen oder als Antrieb für Wischersysteme eingesetzt werden. Abbildung 1.1 gibt einen Überblick über die Einsatzbereiche der unterschiedlichen Motortypen im Kraftfahrzeug (Kfz). Auf dem europäischen Markt finden sich heutzutage im Durchschnitt 53 Elektromotoren pro Fahrzeug, im Premiumsegment können es bis zu 115 Stück sein [Rob16]. Dies zeigt die Bedeutung von Elektromotoren, speziell der Elektrokleinmotoren.

Im Zuge der Elektrifizierung ist mit einer weiteren starken Zunahme an Elektrokleinmotoren in den nächsten Jahren zu rechnen, da auch zusätzliche Sicherheitsfunktionen wie etwa Bremsassistenten und Lenkunterstützung zunehmend an Bedeutung gewinnen. Auch die steigende Nachfrage nach Komfortlösungen sowie eine strengere Gesetzgebung im Bereich der Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs wirken sich positiv auf die Bedeutung von Elektromotoren aus [Sch03].

Als sogenannte Hilfsmotoren kommen im Kfz meist Gleichstrom- bzw. direct current (DC)-Motoren zum Einsatz. Hierbei sorgen die mit der Drahtwicklung elektrisch leitend verbundenen Lamellen eines auf eine Welle aufgedruckten Kommutators für die notwendige Kommutierung.

Gründe für die Dominanz der DC-Motoren sind vorwiegend die geringen Herstellkosten durch den vergleichsweise einfachen Aufbau. Weitere Vorteile der mechanisch kommutierten DC-Motoren gegenüber Motoren mit elektrischer Kommutierung, den electrically commutated (EC)-Motoren,



**Abbildung 1.1:** Elektrokleinmotoren kommen im gesamten Kraftfahrzeug zum Einsatz. Bild: Robert Bosch GmbH, Electrical Drives

sind zudem die Qualität sowie die Produkteinführungszeit [Sch03]. Dies ist hauptsächlich in der langjährigen Erfahrung begründet und die Lücke zwischen beiden Motortypen wird sich in den nächsten Jahren kontinuierlich schließen.

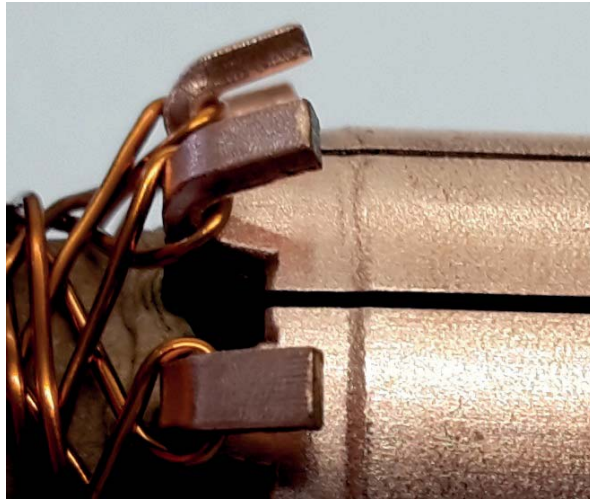
Der Markt stellt unterschiedliche Anforderungen an die Motoren, wie Effizienz, Gewicht, Bauraum und Preis. Wichtiges Merkmal in der Auslegung der Motoren ist zum Beispiel die Umgebungstemperatur des Motors oder auch der Einbauort, an dem sich der Motor befindet. So befindet sich der Großteil der Elektromotoren im Einsatz im Medium Luft bei unterschiedlicher Temperatur. Jedoch sind beispielsweise Pumpen direkt im Kraftstoff tätig, sogenannte Nassläufer. Sämtlichen unterschiedlichen Anforderungen wird man durch Variation einzelner Komponenten gerecht. Die Dicke des Blechpaketes ist ebenso entscheidend wie die Anzahl der Haken des Kommutators, die Kommutatorgröße, der Drahtdurchmesser oder das Wickelschema. Ein Motor für das Motorkühlgebläse muss beispielsweise leistungsstark sein. Geringe Größe des Motors und steigende Effizienz bzw. Leistungsfähigkeit des Motors stehen grundsätzlich im Gegensatz zueinander. Diese Herausforderung erfordert ein detailliertes Verständnis

aller Prozessschritte und eingesetzten Verfahren um die konstruktive Aufgabe der Entwicklung zu unterstützen. Sind sowohl der Ablauf als auch die Wirkzusammenhänge der Prozesse in ihrer Vollständigkeit verstanden, lassen sich die steigenden Anforderungen bewältigen. Produkte können optimiert ausgelegt und überwacht und mögliche Problematiken in den Anforderungen frühzeitig erkannt werden. Probleme zu kennen und erkennen bevor sie auftreten, ist der große Nutzen eines tiefgehenden Prozessverständnisses. Dies resultiert zuerst in einer Einsparung an Entwicklungszeit einer optimierten Auslegung der Motorkonstruktion und im späteren Fertigungsumfeld in einer Ausschussminderung und folglich in einer Reduzierung der gesamten Herstellkosten.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der seriennahen Grundlagenuntersuchung eines Prozessschrittes der Elektrokleinmotorenfertigung. Die Kommutatoren werden mit Hilfe einer Variante des Widerstandsschweißens, dem so genannten Hot-Staking oder Warmverpressen, kontaktiert. Der Kommutator besteht aus mehreren einzelnen Lamellen, an deren Ende sich eine Hakengeometrie anschließt, in welche die Drahtwicklung eingehängt ist, Abbildung 1.2. Der Hot-Staking-Prozess dient der Herstellung eines elektrischen und mechanischen Kontaktes zwischen der Drahtwicklung und den Kommutatorlamellen und ist der kritischste Prozess in der Kleinmotorenfertigung, bedingt durch die mechanischen, elektrischen und thermischen Einflüsse des Prozessablaufs [Yea01]. Jedoch ist das Hot-Staking zugleich ein Prozess, welcher in der bisherigen Forschung noch unzureichend Beachtung gefunden hat und es am Verständnis grundlegender Zusammenhänge fehlt.

Ziel der Arbeit ist ein erweitertes Prozessverständnis zu erlangen, basierend auf dem Ansatz einer sequentiellen Prozessphasenanalyse. Kern dieser Analyse ist die zeitsynchrone Aufzeichnung aller elektrisch zugänglichen Prozessparameter mit hoher zeitlicher Auflösung. Nur so ist es möglich, die Physik sowie die Metallurgie des Prozesses nachzubilden und neue Informationen über den Prozess zu erhalten.

Zu Beginn dieser Arbeit wird nach dieser Motivation auf den aktuellen Stand der Technik auf den Gebieten der Elektromotoren sowie des Widerstandsschweißens eingegangen, Kapitel 2. Hierbei wird neben den Grundlagen der Elektromotoren auch das allgemeine Verfahren des Widerstandsschweißens erläutert, da das Hot-Staking-Verfahren dem Widerstandsschweißens zugeordnet ist. Abschließend werden in diesem Kapitel gängige Methoden der Prozessüberwachung und Prozesskontrolle beim Widerstandsschweißen vorgestellt. Einige Möglichkeiten hierbei erweisen sich als hilfreich für das Hot-Staking.



**Abbildung 1.2:** Der lackisolierte Wicklungsdraht ist in die Haken des Kommutators eingehängt und wird durch das Hot-Staking-Verfahren elektrisch und mechanisch mit dem Kommutator verbunden.

In Kapitel 3 wird das untersuchte Hot-Staking-Verfahren im Detail vorgestellt. Der bisher bekannte Prozessablauf, vorhergehende Untersuchungen sowie die eingesetzten Materialien und Werkstoffe stehen dabei im Vordergrund. Das Kapitel schließt mit einer Übersicht über das auftretende Widerstandsnetzwerk, dessen Bedeutung in den Untersuchungen deutlich wird.

Kapitel 4 zeigt im Anschluss an die Grundlagenkapitel die Ziele und die grundlegende Vorgehensweise auf. Wesentliches Ziel ist hierbei die Prozessregelung und Prozessüberwachung. Hierzu ist ein grundlegendes Verständnis des Prozesses notwendig, das es aufzubauen gilt.

Bevor auf die Messungen eingegangen wird, behandelt Kapitel 5 den verwendeten Messaufbau inklusive der Sensorik zur Messung relevanter Prozesskenngrößen. Weiterhin wird das Programm zur Messdatenerfassung erläutert.

Hieran schließt sich Kapitel 6, in dem die einzelnen Phasen innerhalb des Prozessablaufs vorgestellt werden. Die Kenntnis dieser Phasen hat große Bedeutung für die Deutung späterer Ergebnisse.

Kapitel 7 bildet den eigentlichen Kern dieser Arbeit, denn hier werden die getätigten Untersuchungen aufgezeigt und deren Bedeutung für ein grundlegendes Prozessverständnis erläutert. Besondere Geltung erlangt hierbei die Untersuchung zum Einfluss der Oberflächenstruktur auf die Hakenfestigkeit sowie die Messung der Prozesstemperatur zeitsynchron zur Messung der übrigen relevanten Prozesskenngrößen.

In diesem Kapitel werden zudem metallografische Untersuchungen sowie die Art des Verbindungsmechanismus aufgezeigt, verdeutlicht durch Rasterelektronenmikroskop (REM)-Aufnahmen von Hakenunterseiten bei unterschiedlichen Stromflussdauern.

In Kapitel 8 werden die essentiellen Untersuchungsergebnisse zusammengefasst und es wird ein Ausblick über aufbauende Untersuchungsreihen gegeben.





# 2

## Stand der Technik

---

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den Grundlagen sowie dem aktuellen Stand der Technik auf den Gebieten der Elektrokleinmotoren und dem Widerstandsschweißen im Allgemeinen. Einführend gibt es einen Überblick über die Einsatzgebiete und Grundtypen der Elektrokleinmotoren. Anschließend wird detaillierter auf die Gleichstrommotoren eingegangen. Auf dem Gebiet des Widerstandsschweißen wird, neben den Grundlagen, eine Übersicht der Verfahren und die Einordnung des in dieser Arbeit verwendeten Verfahrens gegeben. Zudem werden ausgewählte Verfahren der Prozesskontrolle beim Widerstandsschweißen aufgezeigt, bevor das Kapitel mit Grundlagen auf dem Gebiet der Verbindungsbildung abschließt.

### 2.1 Elektrokleinmotoren

Elektrokleinmotoren finden in den unterschiedlichsten Bereichen Anwendung. Einige hiervon sind [Stö06]

- Messtechnik,
- Automatisierungstechnik,
- Haushaltsgeräte,
- Handwerkzeuge,
- Gartengeräte,
- Medizintechnik,



- Bürogeräte,
- oder Hilfsantriebe im Kfz.

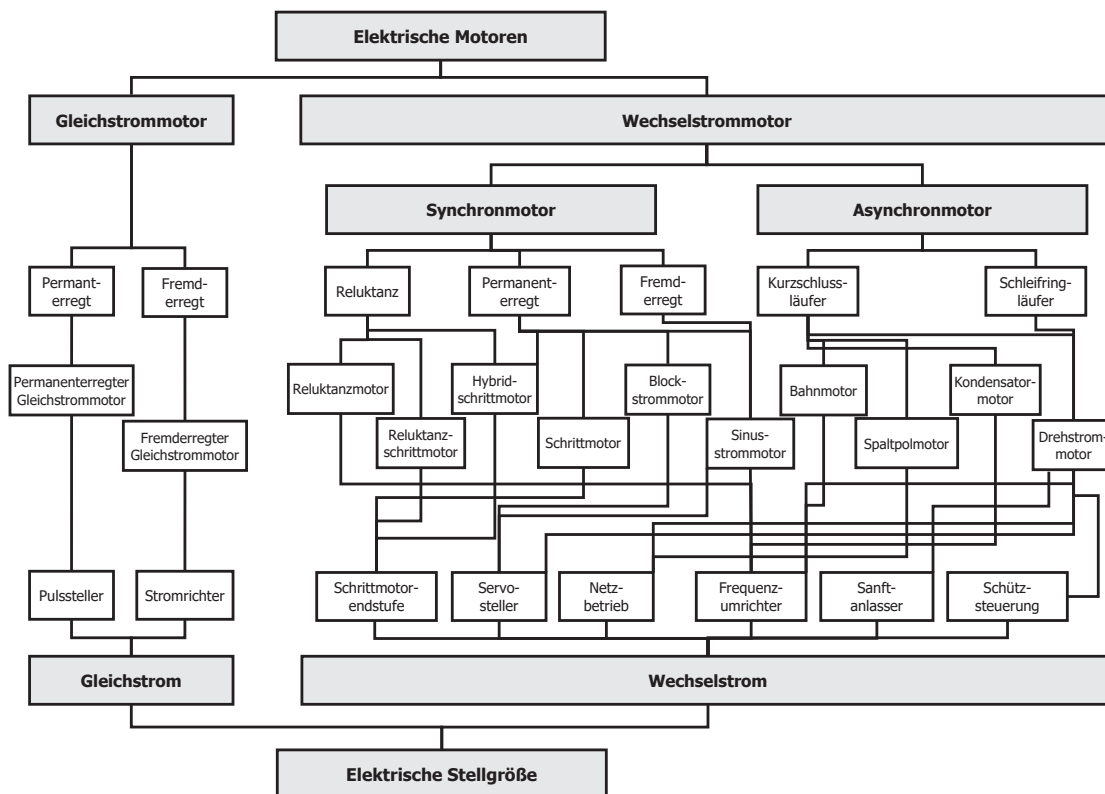
Auf dem Gebiet der Elektrokleinmotoren gibt es drei Grundtypen [Bin12], die sich in Funktionsweise, Einsatzgebiet und Leistungsspektrum unterscheiden:

- Gleichstrommotoren
- Asynchronmotoren
- Synchronmotoren

Bei Asynchron- und Synchronmotoren handelt es sich übergeordnet um Wechselstrommotoren, so dass allgemein zwei Grundtypen unterschieden werden können: Gleichstrom- und Wechselstrommotoren. Abbildung 2.1 stellt die Grundtypen in Verbindung mit ihren möglichen elektrischen Stellgrößen dar. Im Bereich der Wechselstrommotoren ist die Bandbreite an Motortypen größer als im Bereich der Gleichstrommotoren, wo nur zwischen permanenterregt und fremderregt unterschieden wird. Die in dieser Arbeit betrachteten Motoren sind permanenterregten Gleichstrommotoren zuzuordnen.

Eine zunehmende Bedeutung erlangen die bürstenlosen Gleichstrommotoren (EC-Motoren), deren Aufbau permanenterregten Synchronmotoren entspricht [Mül14]. Vorteile gegenüber den DC-Motoren sind die erhöhten Laufzeiten, da beide Komponenten mit der größten Neigung zu Verschleiß nicht benötigt werden: Kommutator und Kohlebürsten. Ebenso erhöht sich die Zahl der Freiheitsgrade in der Gestaltung der Motoren, was neue Felder, vor allem im Bereich der Gesamtsysteme aus Motor und Elektronik erschließen lässt. Vereinfacht dargestellt ist der Rotor permanent erregt, die Spulen befinden sich im Stator. Die Spulen werden mittels elektronischer Schaltung zeitlich versetzt angesteuert und sorgen für den Aufbau eines Drehfeldes, welches in einem Drehmoment am Rotor resultiert. Im Vergleich zu DC-Motoren sind EC-Motoren in vielen Bereichen kostenintensiver, „sofern die Kernfunktionen des Antriebs durch beide Systeme gleichermaßen erfüllt werden können“ [Sch03].

In dieser Arbeit werden ausschließlich DC-Motoren betrachtet, da hier überall Hakenkommutatoren eingesetzt werden und diese Motortypen in hoher Stückzahl gefertigt werden, so dass die Verfügbarkeit an Versuchsteilen gegeben ist.

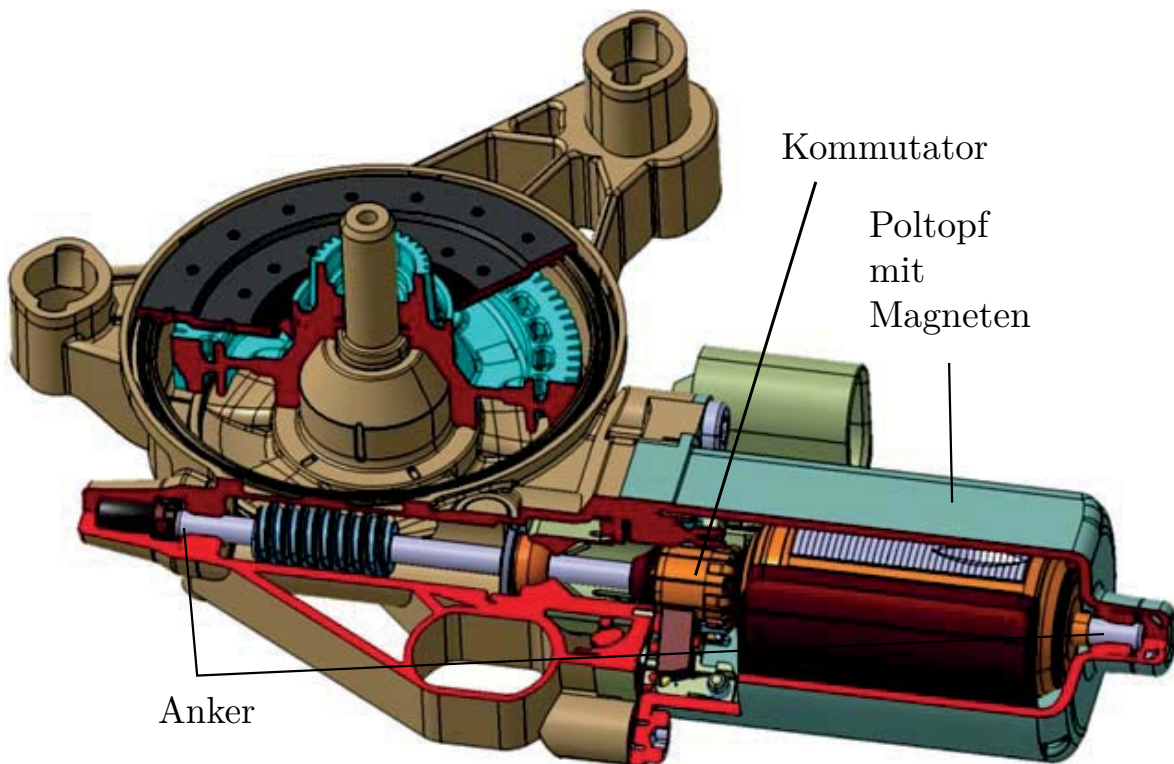


**Abbildung 2.1:** Klassifizierung der Elektromotorgrundtypen in Verbindung mit ihren möglichen elektrischen Stellgrößen (nach [Wei13]).

### 2.1.1 Aufbau und Funktionsweise eines DC-Motors

Im Aufbau eines DC-Motors (Abbildung 2.2) wird unterschieden zwischen dem sich drehenden Teil (Anker) und dem feststehenden Teil (Stator) des Motors, welcher den Anker umgibt. Der Anker besteht unter anderem aus dem Blechpaket mit Wicklung, dem Kommutator und der Schnecke. Die Drehbewegung des Ankers wird über die Welle an das Getriebe weitergegeben. Eine separate Aufbauskitze des Ankers zeigt Abbildung 2.3.

Das Blechpaket und der Kommutator werden auf eine Welle aufgedrückt. Die Nuten des Blechpaketes beinhalten die in sich geschlossene Drahtwicklung, wobei eine isolierende Schicht die Drahtwicklung elektrisch von Blechpaket und Welle trennt. Die Wicklung, die selbst mit einer Isolationsschicht überzogen ist, wird durch die Haken des Kommutators durchgeführt und anschließend elektrisch und mechanisch verbunden (siehe Kapitel 3). Im Stator hingegen befinden sich ein magnetischer Nord- und Südpol, deren Feld auf zwei unterschiedliche Weisen erzeugt werden



**Abbildung 2.2:** Aufbau eines DC-Motors mit Permanentmagneten im Stator, welche den Anker umschließen. Dieser ist aufgebaut aus einem Blechpaket mit Wicklung und Kommutator.

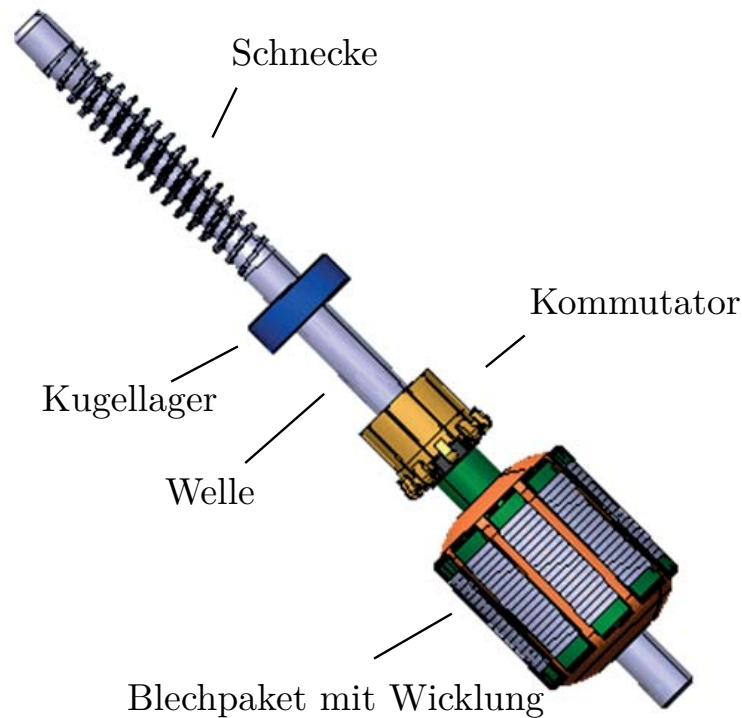
Bild: Robert Bosch GmbH, Electrical Drives

kann: mittels Permanentmagneten oder elektrischer Gleichstrom-Erregung (der Motortyp aus Abbildung 2.2 beinhaltet zwei Permanentmagnete im Innern des Stators). Damit es zu einer Drehung des Ankers kommt, sind im Stator Kohlebürsten angebracht, welche auf dem Kommutator schleifen und den Strom in den Anker leiten.

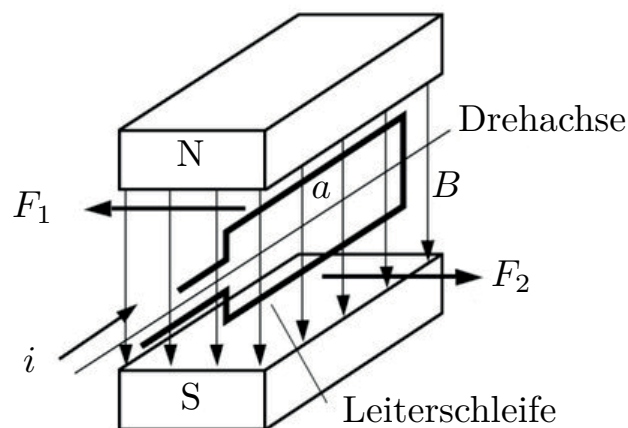
„Das Arbeitsprinzip im Motorbetrieb<sup>1</sup> beruht auf der Krafteinwirkung eines stromdurchflossenen Leiters im Magnetfeld“ [Hab14]. Zu sehen ist dies in Abbildung 2.4. Die Leiterschleife der Kantlänge  $a$ , senkrecht zum Magnetfeld, befindet sich in einem Magnetfeld  $B$  und wird von dem Strom  $I$  durchflossen. Der Normalenvektor<sup>2</sup>  $\hat{n}$  der Leiterschleife schließt hierbei den Winkel  $\Theta$  mit dem Magnetfeld  $\vec{B}$  ein. Die Stromrichtung ist im oberen Teil der Leiterschleife entgegengesetzt zur Richtung im unteren Teil. Somit wirken die beiden Komponenten der Lorentzkraft  $F_1$  und

<sup>1</sup>Motorbetrieb bedeutet, dass elektrische Leistung in mechanische Antriebsleistung umgewandelt wird.

<sup>2</sup>Der Normalenvektor  $\hat{n}$  steht senkrecht auf der Fläche der Leiterschleife.



**Abbildung 2.3:** Aufbau eines Ankers. Der Kommutator und das Blechpaket sind auf eine Welle aufgespresst. In den Nuten des Blechpakets befindet sich die Wicklung, die durch jeden Haken des Kommutators durchgeschlauft wird, um eine elektrische Verbindung herzustellen.  
Bild: Robert Bosch GmbH, Electrical Drives



**Abbildung 2.4:** Kräfte auf eine Leiterschleife im Magnetfeld [Wei13].  
Der Stromfluss im Innern der Leiterschleife induziert die Lorentzkraft.



$F_2$  in unterschiedliche Richtungen, sind jedoch betragsmäßig identisch [Tip15]:

$$|\vec{F}_1| = |\vec{F}_2| = I|\vec{a}||\vec{B}| \quad (2.1)$$

Bei  $n$  Windungen gilt für den Betrag des Drehmoments auf eine rechteckige Leiterschleife der Fläche  $A$

$$|\vec{M}| = nI|\vec{A}||\vec{B}|\sin\Theta. \quad (2.2)$$

Mit dem magnetischen Moment  $\mu = nIA$  [Tip15] vereinfacht sich die Formel des Drehmoments zu

$$\vec{M} = \mu \times \vec{B} \quad (2.3)$$

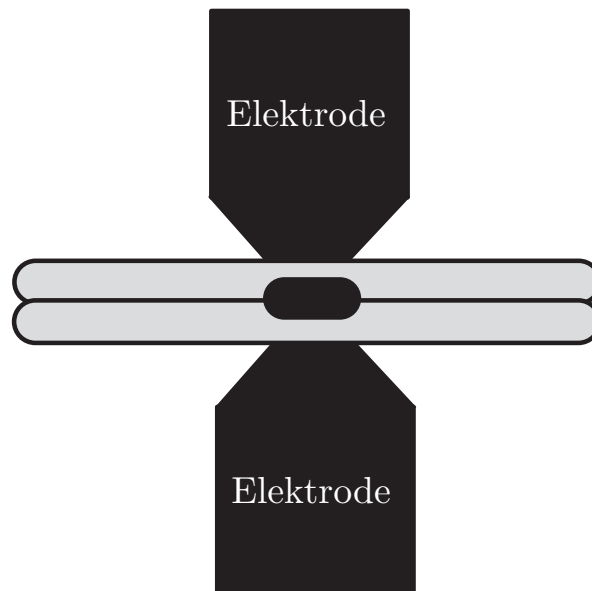
Dieses resultierende Drehmoment ist bestrebt, die Leiterschleife in eine Position zu bringen, so dass der Normalenvektor  $\hat{n}$  in die Richtung des Magnetfelds  $\vec{B}$  zeigt. Ist diese Position erreicht, wird die Kraft auf die Leiterschleife null. Aus diesem Grund gibt es im Gleichstrommotor mehrere Leiterschleifen, welche zudem gegeneinander verdreht sind.

## 2.2 Widerstandsschweißen

Nach [Deu03] unterteilt sich die vierte Hauptgruppe der Fertigungsverfahren, das Fügen, in mehrere Untergruppen. Untergruppe 4.6 ist das „Fügen durch Schweißen“, wobei unterschieden wird zwischen Pressverbindungsschweißen und Schmelzverbindungsschweißen.

Das Widerstandsschweißen ist der Gruppe der Pressverbindungsschweißverfahren zugeordnet [DVS10]. Für die Verbindung verantwortlich ist die Kombination aus Wärme und Druck. Während die Druckeinbringung direkt durch die Elektroden erfolgt, resultiert die Wärmeeinbringung aus der Joule'schen Wärme, bedingt durch den Stromfluss durch das Bauteil. Eine Verfahrensskizze des Widerstandspunktschweißens zur Verdeutlichung kann Abbildung 2.5 entnommen werden. Ursache dieser Erwärmung sind Elektronenstöße mit dem Kristallgitter. Für die elektrische Arbeit  $W$  im Widerstand  $R$  gilt makroskopisch folgender Zusammenhang [Czi12]:

$$dW = uiddt = \frac{u^2}{R}dt = i^2Rdt. \quad (2.4)$$



**Abbildung 2.5:** Verfahrensskizze Widerstandspunktschweißen. Die beiden zu fügenden Bauteile werden beidseitig mit einer Elektrode unter definiertem Druck kontaktiert. Der Strom fließt durch die Bauteile und verbindet sie stoffschlüssig durch eine Schweißlinse.

Für den Spezialfall konstanter Spannung  $U$  und Ströme  $I$  vereinfacht sich 2.4 nach [Czi12] zu

$$W = UIt = \frac{U^2}{R}t = I^2Rt, \quad (2.5)$$

mit Wärmemenge  $W$  in J, Effektivwert  $I$  des Stroms in A, dem Widerstand  $R$  zwischen den beiden Elektroden in  $\Omega$  und der Zeit  $t$  in s.

Der Widerstand  $R$  ist jedoch abhängig vom Werkstoff, sowie dessen Geometrie und Temperatur. Mikroskopisch ist die Annahme der allgemeinen Wärmeleitungsgleichung nach [Her14] mit einem Zusatzterm für die elektrischen Einflussgrößen korrekt:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \nabla^2 T + \rho_{el} \cdot j^2 \quad (2.6)$$

In Gleichung 2.6 bezeichnet  $T$  die Temperatur,  $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$  die sogenannte Temperaturleitfähigkeit<sup>3</sup>, der Laplace-Operator  $\nabla^2$  die zweite Ableitung nach dem Ort,  $\rho_{el}$  den spezifischen elektrischen Widerstand und  $j$  die Stromdichte. Diese Gleichung beschreibt die Änderung der Temperatur

<sup>3</sup>mit Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , spez. Wärmekapazität  $c$  und spezifischem Widerstand  $\rho$ .





an einem Punkt in einem instationären Temperaturfeld bei überlagerter Joule'scher Wärmeentstehung.

Der Strom ist eine zeitabhängige Größe und hat direkten Einfluss auf den Widerstand, da der Stromfluss eine Erwärmung der Bauteile zur Folge hat. Sowohl Material- als auch Kontaktwiderstände sind linear temperaturabhängig und folglich gilt

$$R = R(T(t)). \quad (2.7)$$

Diese Zeitabhängigkeiten führen dazu, dass Gleichung 2.5 zu einem Integral über die Zeit  $t$  wird [Car99].

## 2.3 Prozesskontrolle beim Widerstandsschweißen

In diesem Abschnitt werden aktuell gängige Methoden erläutert, welche zur Prozesskontrolle beim Widerstandsschweißen eingesetzt werden.

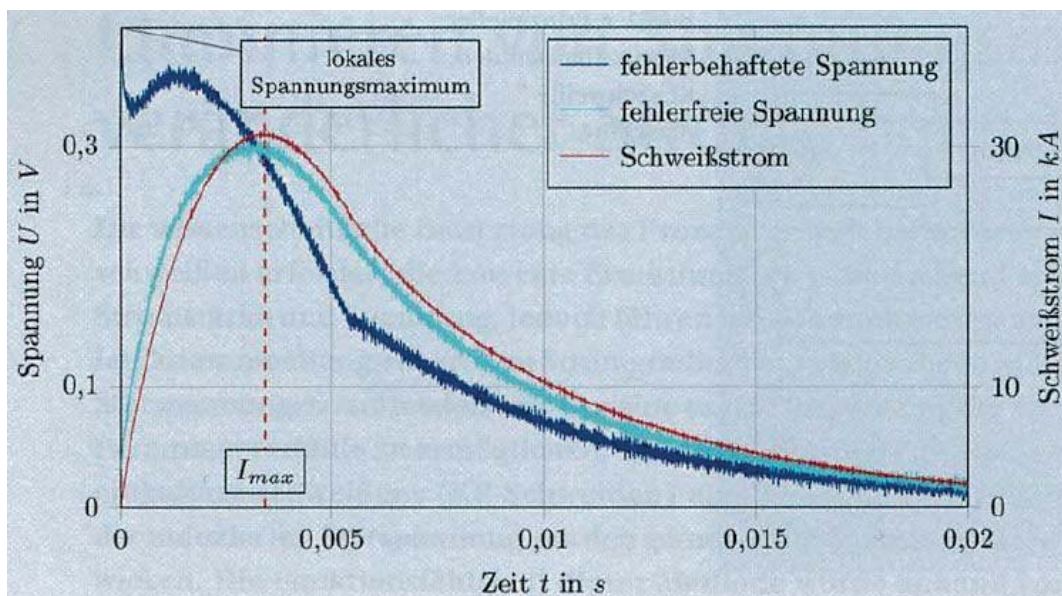
Beim Widerstandsschweißen wird auf makroskopische Prozessparameter zurückgegriffen. Dazu zählen die elektrischen Kennwerte Stromstärke, Spannung, Widerstand sowie die Größen Weg, Kraft oder Temperatur [Sub04]. Es gibt unterschiedliche Ansätze, um verlässliche Informationen über den Prozessablauf zu generieren. Der am häufigsten genutzte ist die Analyse des dynamischen Widerstandsverlaufs [Dic80; Met98; Ged87; Aso97; Cho03]. Der Widerstand kann relativ einfach erfasst werden und liefert viele Informationen, die den Prozessablauf charakterisieren.

Notwendig für den Erhalt des dynamischen Widerstandsverlaufs ist neben der Strommessung auch die Spannungsmessung. Hierbei gibt es eine messtechnische Hürde, die bei Bedarf überwunden werden muss. Treten große Stromgradienten auf kommt es zu Fehlern in der Spannungsmessung. Ursache hierfür sind entstehende induktive Störspannungen. [Ket16] beschreibt am Beispiel des Kondensatorentladungsschweißens eine Methode, diese Störspannungen zu eliminieren. Zu Beginn des Prozessablaufs kommt es bei diesem Schweißverfahren zu Spannungsmaxima, welche nicht mit ohmschen Widerständen erklärbar sind. Ursache sind vielmehr Störungen durch induzierte Spannungen, die entstehen, da eine bestimmte Fläche zwischen beiden Kabeln des Spannungsabgriffs vorhanden ist. Diese Fläche verhält sich wie eine Luftspule mit einer Wicklung und in dieser kommt es zur Induktion durch ein sich änderndes Magnetfeld in Folge des

Stromflusses. Zu Prozessbeginn tritt bei der Entladung des Kondensators die größte Stromänderung auf, weshalb die gemessene Spannung größtenteils auf Induktion zurückzuführen ist und somit Fehlinterpretationen des dynamischen Widerstandsverlauf zur Folge hat.

Für den Erhalt eines Korrekturwertes beim Kondensatorentladungsschweißen werden Spannungsmessungen ohne Bauteil durchgeführt unter der Annahme einer sehr geringen Erwärmung im Sekundärstromkreis. Hierbei werden zwei verschiedene Spannungen gemessen (Abbildung 2.6), deren Unterschied in der Anordnung der Spannungsabgriffe begründet ist. Einmal werden sie „so angeordnet, dass die eine Spannungsmessleitung bei geschlossenen Elektroden nahezu keine Fläche (fehlerfreie Spannungmessung  $u_{frei}(t)$ ) und die andere eine Fläche von etwa  $90 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  (fehlerbehaftete Spannungsmessung  $u_{behaft}(t)$ ) einschließt“ [Ket16]. Erkennbar ist der abweichende Verlauf der fehlerbehafteten Messung.

Die Induktivität  $L$  der Leiterschleife muss zur Berechnung des auftretenden Messfehlers bekannt sein und kann entweder geometrisch bestimmt werden oder über die Ermittlung der Induktionsspannung zu einem diskreten Messzeitpunkt. Letztgenannte Methode ist die wesentlich genauere Möglichkeit und sollte Verwendung finden. Für die detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise bezüglich Messaufbau, Berechnung der induzierten Spannung und praktische Anwendung sei auf [Ket16] verwiesen.



**Abbildung 2.6:** Spannungsmessungen beim KE-Schweißen bei geschlossenen Elektroden ohne Bauteil [Ket16].



Es gibt jedoch auch den Ansatz, die direkt messbaren Größen Strom und Spannung in einem U-I-Diagramm gegeneinander aufzutragen und aus der resultierenden elliptischen Kurve relevante Prozessinformationen herauszufiltern [RuX12]. Direkt erkennbar sind auftretende Schweißspritzer aufgrund des Einflusses auf den Spannungsverlauf sowie der Energieeintrag jeder Halbwelle von Strom und Spannung. Dies erlaubt eine Beurteilung der Qualität der Schweißverbindung. Diese Methode empfiehlt sich für Prozesse, bei denen keine oder nur geringe mechanische Umformung stattfindet, da die sonst entstehenden Widerstandsänderungen starken Einfluss auf den Verlauf des U-I-Diagramms haben. Der Verlauf lässt in diesen Fällen keine ausreichenden Rückschlüsse auf Prozessmerkmale zu.

Eine weitere Möglichkeit der Prozess- und Qualitätskontrolle beschreiben [Che], [Off03] und [Per14]. Die Reflexion und Transmission akustischer Wellen kann zur Prozesskontrolle beim Widerstandspunktschweißen im laufenden Serienbetrieb herangezogen werden. Zur Realisierung dieser Methodik wird in eine der beiden Elektroden (Anordnung analog zu Abbildung 2.5) ein Ultraschallsender eingebaut. Je nach angewandtem Verfahren wird der Empfänger in der identischen Elektrode (Analyse der reflektierten Wellen) oder der gegenüberliegenden Elektrode (Analyse der transmittierten Welle) angebracht. Die Schallwellen werden beim Durchlaufen von Fügepartnern und Fügezone, durch Änderungen der Materialeigenschaften in Folge der Erwärmung, beeinflusst und beinhalten somit relevante Prozessinformationen. Somit unterschieden sich auch die Schallwellen, welche zu unterschiedlichen Zeitpunkten die Fügepartner passieren. Haupteinflussgröße hierbei ist die Abnahme der Schallgeschwindigkeit bei zunehmender Temperatur. Ebenso fluktuieren die akustische Transparenz sowie das akustische Reflexionsvermögen der Anordnung im Laufe des Schweißvorgangs, was Amplitude und Magnitude des Signals beeinflusst. Daraus resultierende Differenzen in der Flugdauer der Signale korrelieren mit dem Durchmesser der Schweißlinse [Mae01]. Während die Schallwellen beim Prozess der Transmission die Fügepartner nur einmal durchdringen, erfolgt dies im Falle der Reflexion zweimal. Dies hat eine Zunahme der Genauigkeit zur Folge, wobei die Wellen an drei unterschiedlichen Punkten reflektiert werden: beim Auftreffen auf den ersten Fügepartner, an der Kontaktfläche zwischen den Fügepartnern und an der unteren Oberfläche des zweiten Fügepartners. Diese Art der Prozesskontrolle findet beim Widerstandspunktschweißen Einsatzmöglichkeiten, da hier Elektroden und zu fügende Bauteile in einer Vertikalen vorliegen.

Allgemein gibt es für Widerstandsschweißprozesse zwei Kriterien nach denen der Prozess gestoppt bzw. abgeschaltet werden kann: Die Zeit und

der Weg. Sämtliche weiteren Prozessgrößen dienen der Prozessregelung, können jedoch nicht als Abschaltkriterium herangezogen werden.

Moderne Schweißeinrichtungen und Schweißsteuerungen verfügen über eine Vielzahl an Regelungsgrößen. Neben den elektrischen Parametern Strom, Spannung, Widerstand und Leistung meist auch die mechanischen Parameter Kraft und Weg.

## 2.4 Mechanismen der Verbindungsbildung

Jedem Fügeverfahren liegt ein Mechanismus der Verbindungsbildung zu Grunde. Beim Widerstandsschweißen erfolgt die Verbindung durch Erstarren einer generierten schmelzflüssigen Phase zwischen beiden Fügepartnern, die sogenannte Schweißlinse (Abbildung 2.5). Es wird eine stoffschlüssige Verbindung ausgebildet, welche sich nur durch zerstörende Verfahren lösen lässt. Daneben sind beim Fügen auch die formschlüssige und die kraftschlüssige Verbindung von Bedeutung, die ohne Zerstörung lösbar sind. Zu einem Formschluss kommt es durch das Ineinandergreifen entsprechend geformter Füge Teile durch deren korrespondierende Form. Hierdurch ist eine Bewegung der beiden Teile gegeneinander nicht möglich. Im Gegensatz hierzu liegt eine kraftschlüssige Verbindung vor, wenn beide Füge Teile durch eine äußere Kraft, meist eine Reibungskraft, in ihrer Lage gehalten werden.

Handelt es sich hingegen um Prozesse des Warmverpressens, also Prozesse unterhalb der jeweiligen Schmelztemperaturen, so kommt es zu keiner schmelzflüssigen Phase. Für das Hot-Staking ist neben dem Prozess der Verbindungsbildung durch Diffusion auch die metallische Bindung als direkte Bindungsart von Bedeutung. Beides wird im Folgenden kurz erläutert.

### 2.4.1 Diffusion

Der Begriff *Diffusion* bezeichnet die Wanderung von Atomen oder Ionen [Sch10b]. Dieser Vorgang ist stark temperaturabhängig. Es muss unterschieden werden zwischen Diffusionsvorgängen in homogenen und inhomogenen Werkstoffen. Im ersten Fall ist die Diffusion richtungslos und wird als Selbstdiffusion bezeichnet. In inhomogenen Werkstoffen hingegen sind Unterschiede in der Stoffkonzentration Ursache der Diffusion.



Diese ist folglich gerichtet. Dieser Unterschied wird durch Materietransport ausgeglichen. Grundlage der Diffusion sind die nach Adolf Fick benannten Gleichungen. Die erste Fick'sche Gleichung beschreibt den Massentransport quantitativ und lautet nach [Heu13]

$$j_i = -D_i \frac{\partial c_i}{\partial x} \quad (2.8)$$

Hierbei gibt  $j_i$  die Teilchenanzahl der Atomsorte  $i$  an, die pro Sekunde durch eine Einheitsfläche von  $1 \text{ m}^2$  in  $x$ -Richtung strömen. Die Teilchenkonzentration wird durch  $c_i$  aufgezeigt und  $D_i$  bezeichnet den Diffusionskoeffizienten. Dieser Proportionalitätsfaktor muss bekannt sein und wird experimentell bestimmt. Gleichung 2.8 in Kombination mit

$$J_i(x_1) - J_i(x_2) = -\frac{\partial J_i}{\partial x} \Delta x = \frac{\partial c_i}{\partial t} \Delta x \quad (2.9)$$

ergibt die zweite Fick'sche Gleichung

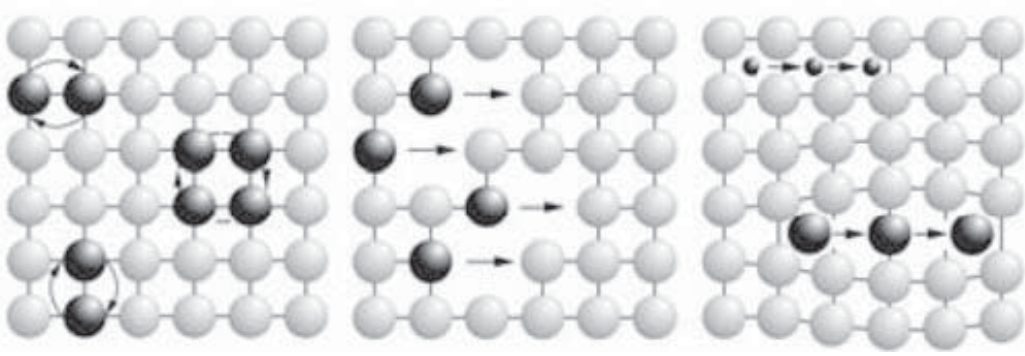
$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_i \frac{\partial c_i}{\partial x} \right). \quad (2.10)$$

Es gibt verschiedene Platzwechselmechanismen in Festkörpern, welche in Abbildung 2.7 aufgezeigt sind. Der direkte Platzwechsel ist von den drei aufgezeigten Mechanismen der unwahrscheinlichste Vorgang aufgrund der sehr großen Aktivierungsenergie, die hierfür aufgebracht werden muss.

Der Zwischengittermechanismus verlangt eingelagerte Fremdatome von größerem oder kleinerem Atomdurchmesser. Leerstellendiffusion bedeutet, dass es für benachbarte Atome einen energetisch äquivalenten und freien Platz gibt, der durch eine Potenzialbarriere getrennt ist [Hun07]. Die Leerstellendiffusion wird durch zunehmende Temperatur durch zwei Effekte stark erleichtert. Zum einen nimmt die Anzahl an Leerstellen mit steigender Temperatur zu, zum anderen sind die Atome aufgrund der thermischen Aktivierung stärker in Bewegung. Beides erleichtert das Überwinden der Potenzialbarriere, welches mit einer Wahrscheinlichkeit von

$$e^{-\frac{E_D}{k_B T}} \quad (2.11)$$

stattfindet.  $E_D$  bezeichnet die Aktivierungsenergie,  $k_B$  die Boltzmann-Konstante und  $T$  die Temperatur. Bei dem statistischen Prozess der Diffusion wird der Anschein erweckt, dass sich die Leerstellen durch das Atomgitter bewegen, weshalb häufig von Leerstellenwanderung gesprochen wird.



**Abbildung 2.7:** Platzwechselmechanismen in Festkörpern [Sch10b]. Die linke Abbildung zeigt den direkten Platzwechsel, in der Mitte ist die Leerstellendiffusion abgebildet und rechts der Zwischengittermechanismus.

## 2.4.2 Metallbindung

Grundlage der metallischen Bindung ist die Delokalisierung von Valenzelektronen<sup>4</sup>. Hierdurch kommt es bei ausreichend geringem Abstand zu einem Überlappen der Elektronenwolken und es entsteht ein Elektronengas [Hun07]. Die Elektronen sind nicht weiter an ein bestimmtes Atom gebunden, sondern stehen quasi allen Atomen zur Verfügung. Die Metallbindung ist aufgrund dieses Elektronengases eine ungerichtete Bindungskraft und kann durch Diffusionsvorgänge begünstigt werden.

<sup>4</sup>Elektronen der äußeren Elektronenschale



# 3

## Das Hot-Staking-Verfahren

---

Das Hot-Staking-Verfahren gehört zur Gruppe der Widerstandspressschweißverfahren [Sch90] und hat zum Ziel, elektrisch hochleitende Metalle und Legierungen mechanisch stabil und elektrisch leitend zu fügen. Dieses Kapitel gibt einen Überblick über den allgemeinen Prozessablauf, die eingesetzten Materialien sowie das zu Grunde liegende Widerstandsmodell. Dies dient als Grundlage für die Versuche, die in den folgenden Kapiteln aufgezeigt werden.

Das Hot-Staking-Verfahren kommt überwiegend in der Fertigung von DC-Motoren zum Einsatz und dient dem Verbinden der Wicklungen des lackisolierten Drahtes des Ankers mit den Lamellen des Hakenkommutators. Hierbei ist der isolierte Wicklungsdraht in die Hakengeometrie des Kommutators eingehängt (Abbildung 1.2).

Anschließend muss der Draht im Auflagebereich des Hakens abisoliert und mechanisch verbunden werden. Das Hot-Staking-Verfahren eignet sich hierbei besonders, da es die Kombination aus geringer Taktzeit und hoher Prozessrobustheit in einem Prozessschritt erfüllt.

Physikalische Grundlage dieses Verfahrens ist, analog zu Kapitel 2.2, die Erwärmung eines stromdurchflossenen Widerstandes unter Einwirkung von Kraft und Temperatur, jedoch ohne den Einsatz eines Schweißzusatzwerkstoffs [Jeg14].





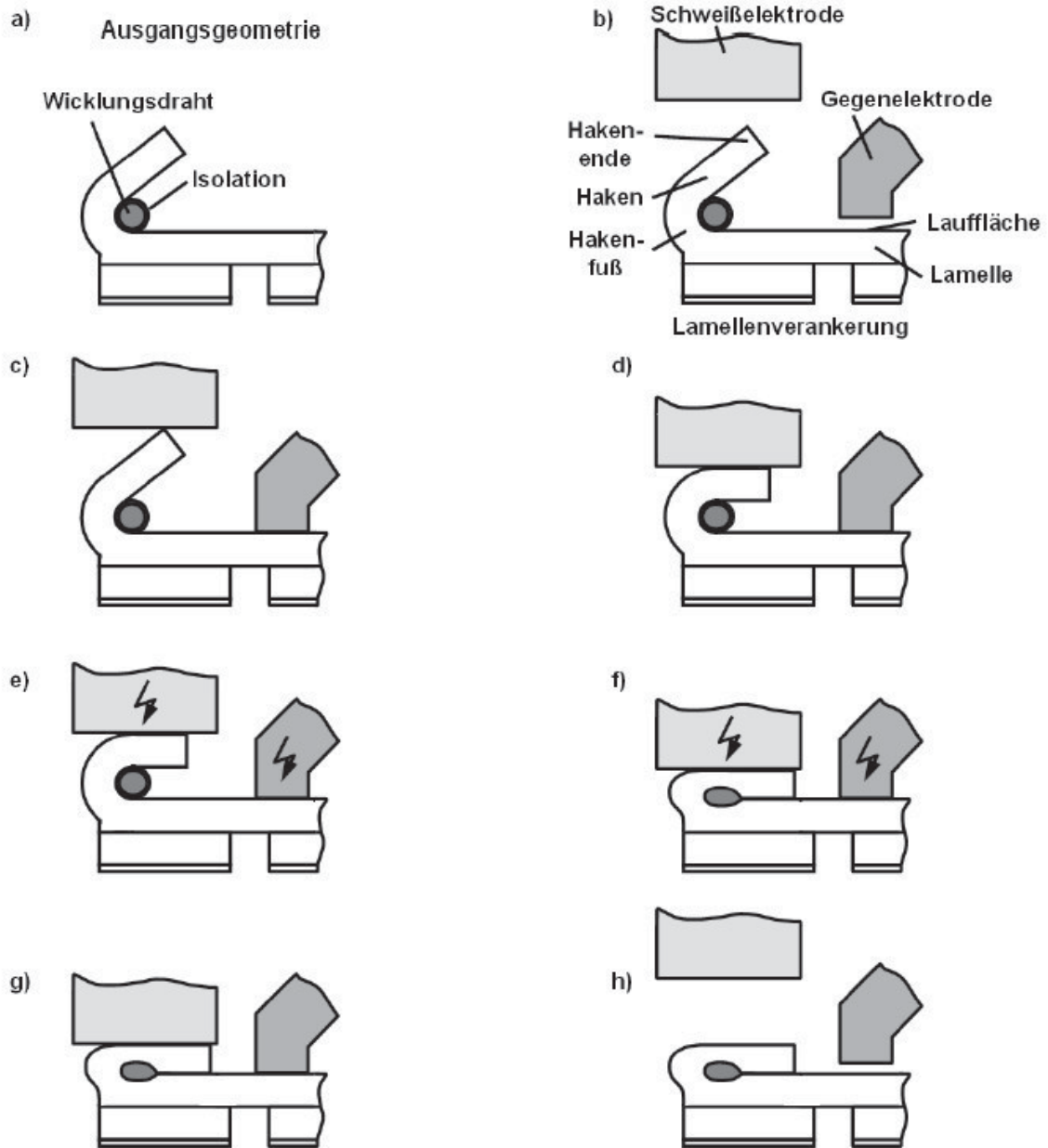
## 3.1 Der allgemeine Prozessablauf

Der Prozessablauf des Hot-Staking-Verfahrens gliedert sich in mehrere Schritte, welche in Abbildung 3.1 aufgezeigt sind.

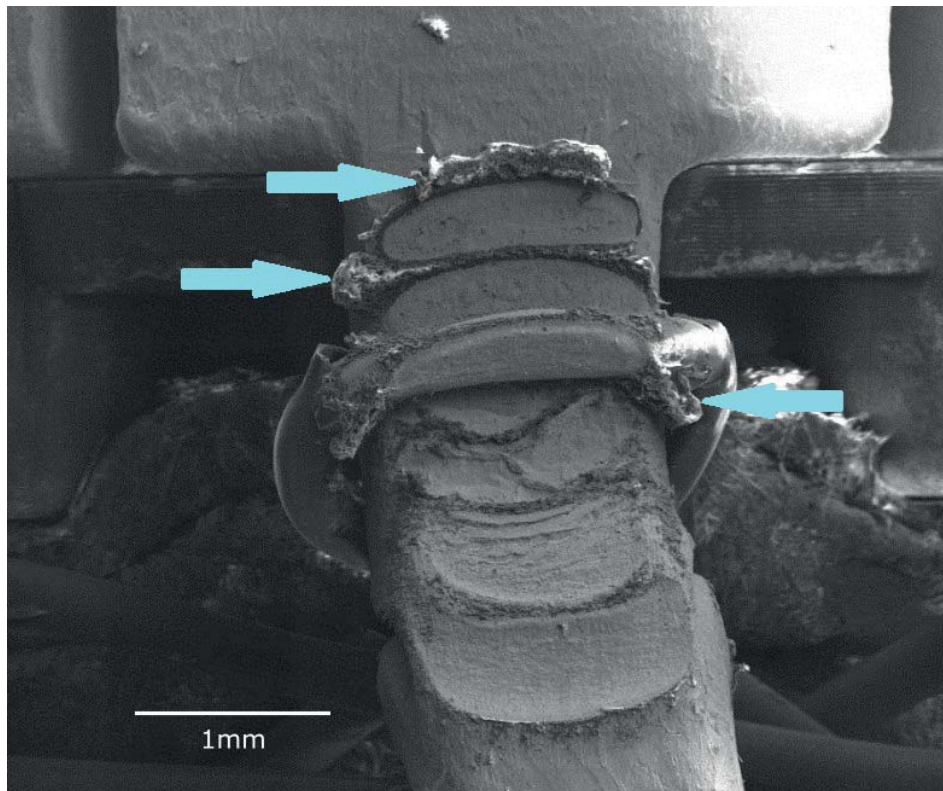
In der Ausgangsgeometrie liegt der lackisolierte Wicklungsdraht im offenen Kommutatorhaken, die Elektroden liegen noch nicht auf dem Hakenende und der Lauffläche auf. Abbildung 3.1(a) zeigt eine idealisierte und vereinfachte Darstellung hiervon. Der Draht liegt im Prozessablauf aus Gründen des Wicklungsprozesses und des Drahtdurchmessers nicht ideal im Hakenradius (in Abbildung 3.1(b) als Hakenfuß bezeichnet). Im ersten Prozessschritt (c) → (d) wird der Haken durch die Schweißelektrode stromlos parallel zur Lamelle kaltverformt und das System verharret in dieser Position für die empirisch festgelegte Dauer der Vorhaltezeit (VHZ). Die Länge dieser Zeitspanne ist erfahrungsbasiert und dient dem vollständigen Aufbau des Druckes, da dieser einer gewissen Trägheit unterliegt. Anschließend setzt der Stromfluss für eine definierte Dauer (Stromzeit (STZ)) ein (e), wohingegen sich der Druck durchgehend auf gleichbleibendem Niveau befindet. Anfangs fließt der Strom durch den Hakenradius, wo die entstehende Wärme ausreichend ist, um die Lackisolation der Drahtwicklung zu zersetzen. Der Lack verdampft nicht vollständig, sondern nur ein Teil hiervon, der aus der Prozessstelle entweicht. Der Großteil der Isolation bleibt als verkohlter Rückstand in der Verbindungszone und in Hohlräumen zurück. Abbildung 3.2 zeigt hierzu eine REM-Aufnahme, in der die verkohlten Rückstände der Isolationsschicht gut sichtbar sind. Sie lagern sich sowohl auf dem Draht als auch in Hohlräumen ab, haben in diesem Maße aber keinen negativen Einfluss auf den Prozessablauf. Im Aufbau der Maschine befindet sich außerdem eine Blasdüse an der Schweißelektrode, wodurch die entstehenden Isolationsdämpfe aus der Verbindung geblasen und gegenüberliegend durch eine angebrachte Absaugung entfernt werden.

Bedingt durch die zunehmende Erwärmung erweicht der Haken und schließt sich unter Einwirkung des Druckes (f). In diesem Prozessschritt wird der Draht mechanisch geklemmt. Nach dem Abschalten des Stromes (g) übt die Elektrode weiterhin Druck auf den Haken aus, um ein Abkühlen in diesem definierten Zustand zu gewährleisten (Nachhaltezeit (NHZ)). Der Prozessablauf endet mit dem Abheben der Elektroden (h), der Anker wird zum nächsten Haken gedreht und der Prozess wiederholt sich, bis sämtliche Haken eines Ankers kontaktiert sind.

Wirtschaftliche und verfahrenstechnische Aspekte fordern kurze Prozesszeiten der Fertigungsschritte. Dies gilt ebenso für das Hot-Staking-



**Abbildung 3.1:** Schematischer Prozessablauf des Hot-Staking-Verfahrens [DVS07].



**Abbildung 3.2:** Isolationsreste zwischen Haken und Lamelle sowie auf dem Draht. Die Isolationsschicht verdampft nicht vollständig sondern verbleibt großteils als verkohlte Reste, hier mit Pfeilen markiert.

Verfahren. Eine zu hohe thermische Belastung gilt es zu vermeiden, dennoch ist eine definierte Wärmemenge für den Prozessablauf erforderlich. Kürzere Schweißzeiten können zwar durch erhöhte Stromstärken kompensiert werden [Fah11], allerdings innerhalb sehr enger Prozessfenster. Der hohen thermischen Beanspruchung der Elektroden wird durch eine Wasserkühlung entgegengewirkt.

## 3.2 Voruntersuchungen zum Hot-Staking-Prozess

Es gibt einige Untersuchungen, die Teilbereiche des Hot-Staking-Prozesses analysiert haben. So hat sich Schäfer [Sch90] damit beschäftigt, zu untersuchen, ob der Einsatz von Gleichstrom im Hot-Staking-Prozess in Bezug auf Prozesssicherheit und Qualität besser geeignet ist als Wechselstrom. Ziel ist es, durch den Wegfall von stromlosen Zeiten „eine konzentrierte und kontinuierliche Energieeinbringung in die Fügestelle“ [Sch90] zu er-

halten. Der Fokus liegt dabei auf dem Einsatz von Schlitzkommutatoren anstelle von Hakenkommutatoren. Ergebnis der Untersuchung war, dass die Elektrodenstandzeit durch den Einsatz von Gleichstrom erheblich gesteigert werden konnte. Ebenso wurde die Prozesssicherheit und folglich die Qualität der Kontaktierung erhöht, auch bedingt durch eine geringere thermische Belastung der Bauteile im Vergleich zur Verwendung von Wechselstrom. Dies wirkt sich positiv auf den Verschleiß der Schweißelektrode aus.

Weiterhin zeigt Schäfer einige typische Fehlerbilder des Hot-Staking-Verfahrens auf, etwa die Neigung der Elektrode, zumeist bei fortgeschrittener Schädigung, am Haken anzuhafte und diesen mit dem Abheben der Elektrode wieder mitzuziehen. Dieses Fehlerbild ist im Prozessablauf nur schwer erkennbar, kann jedoch zum Ausfall des Motors führen, bedingt durch eine mögliche Unterbrechung der elektrischen Verbindung. Untersuchungen hierzu führen Rissbildung an der Elektrodenstirnfläche als Hauptursache auf. Diesem Effekt kann durch Optimierung von Parametern und Werkstoffen entgegengewirkt werden.

Ebenso wird das Auftreten von Schweißspritzern beschrieben. Da dieser Fehler durch ungünstige Maschineneinstellungen hervorgerufen wird, tritt er heutzutage nur noch sehr selten auf.

Eine weitere beschriebene Fehlerquelle sind an der Schweißelektrode anheftende Kupferreste, die sich im Laufe des Prozesses auf dem Haken oder Lamelle niederschlagen können und eine Brückenbildung zur Folge haben und hierdurch einen Kurzschluss verursachen.

Lanier [Lan12] untersuchte eine Variante des Hot-Staking-Verfahrens mit sogenannter Doppelelektrode mittels Prozesssimulationen. Bei dieser Verfahrensvariation setzen beide Elektroden auf dem Haken auf. Die Beschreibung des Verfahrens sowie dessen Geometrie zeigt [Her08]. Ursache für diese Anpassungen der Prozessgeometrie sind hauptsächlich Miniaturisierungsmaßnahmen des gesamten Motors. In diesem Fall durch Verkürzen der Lamelle, was eine geringere Fläche zur Positionierung der Gegenelektrode folgert. Ziel war die Beschreibung der auftretenden Kontaktwiderstände, bzw. der Erhalt des spezifischen Kontaktwiderstands zwischen Elektroden und Hakenoberfläche in Abhängigkeit von Flächenpressung und Temperatur. Experimentelle Versuche liefern die Grundlage zur Bestimmung der Widerstandswerte, welche anschließend in ein Finite-Elemente-Modell (FE-Modell) implementiert wurden.

Sämtliche Schriften auf dem Gebiet des Hot-Staking-Prozesses beinhalten überwiegend allgemeine Prozessinformationen. Tiefergehende Untersu-



chungen der Grundlagen, wie z. B. Wirkzusammenhänge, Prozesstemperaturen oder eine hochaufgelöste Prozessanalyse, haben bisher nicht stattgefunden. Lediglich Schwab [Sch84] beschreibt erstmals grundlegende Zusammenhänge am Beispiel von Schlitzkommutatoren. Weiterhin sind keine Untersuchungen bekannt, welche den Einfluss der Kommutatoroberfläche sowie die auftretenden Prozesstemperaturen eingehend analysieren und beschreiben. Schwab zeigt weiterhin ein Programm zur Berechnung von Temperaturfeldern beim Widerstandsschweißen für den Spezialfall von Schlitzkommutatoren auf [Sch84; Sch86a; Sch86b]. Dieses Programm nutzt die numerische Lösung der zweidimensionalen Wärmeleitungsgleichung (Kapitel 2.2). Die berechneten Prozesstemperaturen in diesem Modell belaufen sich auf 600 bis 700 °C. Dieser Wertebereich stimmt mit dem getätigten experimentellen Abgleich gut überein, wobei die Temperaturmessung nicht im Prozess direkt stattfinden konnte, sondern mittels Pyrometer auf der Lamellenauflfläche im Bereich zwischen beiden Elektroden durchgeführt wurde.

### 3.3 Materialien und Werkstoffe

Die Wärmeeinbringung in den Gesamtkomplex aus Elektrode, Haken und Lamelle muss im Haken am größten sein, da dies die relevante Stelle im Prozess darstellt. Der Lackdraht im Hakenradius muss abisoliert werden und das Kupfermaterial im Haken muss soweit erweichen, dass dieser dem Elektrodendruck nachgibt und eine mechanische Verbindung von Haken und Lamelle ausgebildet wird. Gleichzeitig müssen verschleißanfällige Bauteile wie die Elektroden eine gewisse Standzeit<sup>1</sup> vorweisen. Beide Kriterien müssen durch geeignete Werkstoffwahl erfüllt sein.

Der Kommutator besteht aus sauerstofffreiem Kupfer Cu-OF (Werkstoffbezeichnung CW008A) mit einem geringen Silberanteil von mindestens 0,008 %. Die einzelnen Lamellen des Kommutators werden von einer glasfaserverstärkten Pressmasse zusammengehalten. Eine angebrachte Geometrie auf der Rückseite der Lamellen dient hierbei der Verkrallung.

Im Unterschied dazu besteht der Draht aus geglühtem, blanken Kupfer Cu-ETP1 (Werkstoffbezeichnung CW003A) mit einem Nennwiderstand von  $0,1167 \frac{\Omega}{m}$ . Er ist von einer isolierenden Schicht umgeben, welche in den meisten Anwendungsfällen als Zweifachbeschichtung vorliegt. Die Grundlackschicht besteht aus Polyester oder Polyesterimid, während die

<sup>1</sup>Anzahl der Kontaktierungen bis zum Elektrodenwechsel

Decklackschicht aus Polyamidimid besteht. Die Isolationsschicht bei dem in dieser Arbeit verwendeten Ankertyp hat eine Mindestdicke von 11  $\mu\text{m}$  bei einem Nenndurchmesser des Leiters von 425  $\mu\text{m}$  [Rob01].

Eine weitere Komponente im Hot-Staking-Prozess sind die beiden Elektroden. Von Bedeutung ist hierbei die hohe thermische und mechanische Belastung der Elektroden, da ihre Hauptaufgabe die Übertragung der Kraft und des Stroms auf das Werkstück ist [DVS98], wobei dies vorrangig auf die Schweißelektrode zutrifft. Die Elektroden bestehen aus unterschiedlichen Metallen, da sie unterschiedlichen Anforderungen unterliegen: Die Gegenelektrode dient der Strom- und Wärmeabfuhr, wohingegen der Schweißelektrode die Aufgabe der Erwärmung zukommt. Erwünschte Eigenschaften der Schweißelektrode sind [DVS10]:

- hohe elektrische Leitfähigkeit zur Verringerung von elektrischen Leistungsverlusten
- hohe thermische Leitfähigkeit bei Anwendung an niedrigleitenden Fügeteilen
- niedrige thermische Leitfähigkeit bei Anwendung an hochleitenden Fügeteilen
- hohe Härte bei Raum- und Schweißtemperatur zur Formbeständigkeit und Vermeidung von Mikrorissen
- geringe Legierungsneigung an Werkstück oder Elektrode.

Die Gegenelektrode besteht analog zur Kommutatorlamelle aus einer Kupferlegierung, hier Kupfer-Chrom-Zirkon (CuCrZr) der Werkstoffnummer 2.1293. Somit ist ein minimaler elektrischer und thermischer Übergangswiderstand gegeben und es kommt zu minimaler Wärmeentwicklung auf der Kommutatorlamelle. Über die Standzeit hinweg ist es von Bedeutung, dass die Schweißelektrode eine ausreichende Robustheit sowie einen großen elektrischen Übergangswiderstand zum Kommutatorhaken aufweist. Ein hoher elektrischer Übergangswiderstand resultiert in einer hohen thermischen Beanspruchung der Schweißelektrode, jedoch ist der Widerstand Grundlage der Wärmeentwicklung und somit wichtig für den Prozessablauf. Aus diesen Gründen kommt der Werkstoff Wolfram zum Einsatz. Jedoch lässt sich der Verschleiß der Elektrode nicht verhindern, so dass hier nur eine begrenzte Standzeit gegeben ist, nach der die Elektrode ausgetauscht werden muss. Als Indikator für den Elektrodenverschleiß kann die Oberflächenbeschaffenheit des Hakens nach dem Prozess herangezogen werden [Sba99]. Weist die Oberfläche kleine Risse, Erhebungen oder sonstige Auffälligkeiten auf, so ist dies ein Zeichen für



fortgeschrittenen Elektrodenverschleiß. Die Vielzahl an thermischer und mechanischer Belastung der Elektrode ist Ursache dieser Verschleißerscheinungen. Hinzu kommen minimale Kupferablagerungen der Haken, welche sich in den Mikrorissen absetzen und somit direkten Einfluss auf die thermischen und elektrischen Eigenschaften der Elektrode haben. Neben den Verschleißerscheinungen durch die hohe Beanspruchung muss auch die Oxidbildung der Elektrodenoberfläche betrachtet werden. Hier sind jedoch keine negativen Einflüsse bekannt, da die entstehenden Oxidschichten durch den Stromfluss und die generierte Wärme aufgebrochen werden und somit einen vernachlässigbaren Einfluss darstellen.

### 3.4 Widerstandsmodell

Entscheidend für die eingebrachte bzw. generierte Wärmemenge sind hauptsächlich zwei Effekte: Einerseits der Übergangswiderstand zwischen der Schweißelektrode und der Hakenoberfläche, andererseits auch die Geometrie des Hakens. Der Hakenradius hat eine hohe Stromdichte im Innern des Hakengrunds zur Folge, wodurch ebenfalls viel Wärme frei wird. Die Stromdichte  $j$  setzt allgemein den Strom  $I$  in Zusammenhang mit der durchströmten Fläche  $A$ . Es gilt nach [Bus15]:

$$I = \int_A \vec{j} \cdot d\vec{A}. \quad (3.1)$$

Diese Gleichung definiert den Strom als Flächenintegral der Stromdichte. Die vereinfachte Darstellung

$$j = \frac{I}{A} \quad (3.2)$$

gilt ausschließlich für den Spezialfall eines senkrecht zur Fläche fließenden Stromes sowie einer homogenen Verteilung der Stromdichte.

Jedoch hat die gesamte Widerstandskette, bestehend aus mehreren Material- und Kontaktwiderständen, Einfluss auf den Prozessablauf. Bei den spezifischen elektrischen Materialwiderständen handelt es sich um werkstoffspezifische, temperaturabhängige Größen, wobei die Bauteilgeometrie zudem einen Einfluss besitzt. Kontaktwiderstände hingegen hängen von verschiedenen Faktoren ab, beispielsweise von der Sauberkeit der Oberflächen, von der Form und Größe der Kontaktfläche oder von der

Kontaktkraft [Fah11]. Jeder Kontaktwiderstand  $R_K$  setzt sich zusammen aus Engewiderstand  $R_E$  und Fremdschichtwiderstand  $R_F$  [Brü80]:

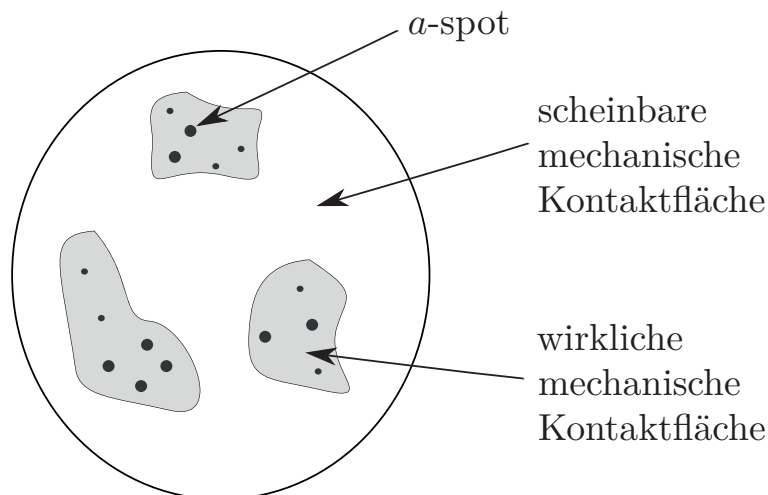
$$R_K = R_E + R_F. \quad (3.3)$$

Holm und Slade [Hol67; Sla99] haben sich mit der Thematik der elektrischen Kontaktwiderstände beschäftigt. Von großer Bedeutung ist die Tatsache, dass jede makroskopisch glatte Oberfläche mikroskopische Unebenheiten aufweist, die im Bildungsvorgang der Oberfläche entstehen. Werden zwei Objekte in Kontakt zueinander gebracht, kommt es zu einer Berührung der Oberflächenunebenheiten beider Objekte und nicht zu einer vollflächigen Kontaktzone. An diesen Kontaktstellen bilden sich Stromengen, die den Engewiderstand  $R_E$  zur Folge haben, da der Stromfluss nur in den von Slade benannten „ $a$ -spots“ stattfindet (Abbildung 3.3).

Diese Einschränkung im stromdurchflossenen Materialvolumen resultiert in einer Erhöhung des Kontakt- bzw. Übergangswiderstands.

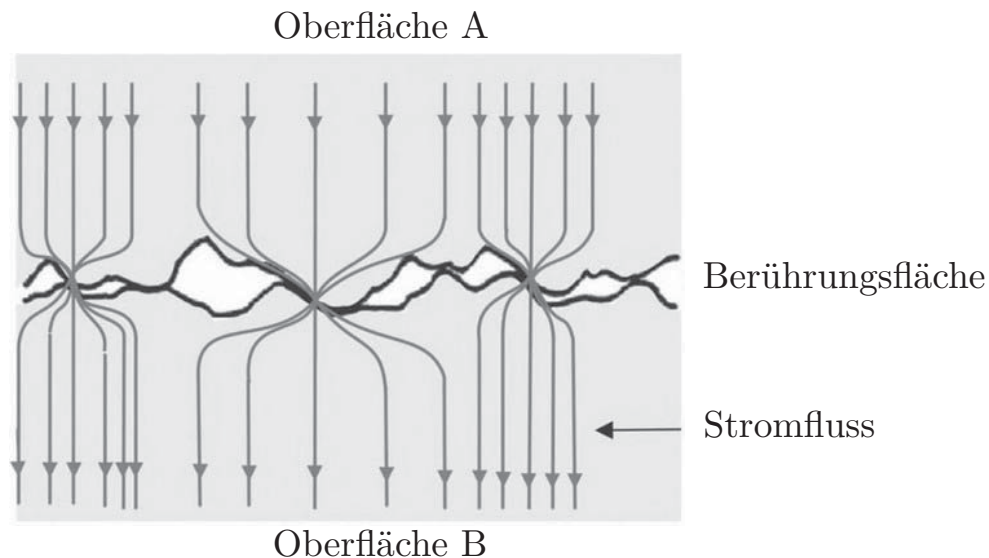
Für den resultierenden Engewiderstand  $R_E$  gilt, ausgehend von zirkularen Engstellen, Abbildung 3.4,

$$R_E = \frac{\rho}{2a} \quad (3.4)$$



**Abbildung 3.3:** Scheinbare und wirkliche Kontaktfläche zweier Kontaktpartner. Bedingt durch Oberflächenrauheiten kommt es nicht zu einer vollflächigen Kontaktfläche, sondern es bildet sich eine wesentlich geringere wirkliche Kontaktfläche aus. Innerhalb metallisch leitender Punkte ( $a$ -spots) kommt es zum Stromfluss (nach [MPA11]).





**Abbildung 3.4:** Schematische Darstellung von Engstellen bei Kontaktwiderständen. Beide Oberflächen stehen nur an den Unebenheiten in Kontakt und nicht vollflächig. An diesen Stellen kommt es zu Engstellen und somit zu Einschnürungen im Stromfluss, die im makroskopischen Engwiderstand  $R_E$  resultieren (nach [Hol67]).

mit dem spezifischen Widerstand  $\rho$  und dem Radius  $a$  der zirkularen Engstelle [Sla99]. Unterscheiden sich die spezifischen Widerstände der beiden Kontaktpartner, wird 3.4 zu

$$R_E = \frac{(\rho_1 + \rho_2)}{4a}. \quad (3.5)$$

Einfluss auf die Größe der Kontaktfläche hat die Kraft, mit der beide Fügepartner zusammengebracht werden sowie indirekt auch die Temperatur an der Kontaktstelle. Der Elastizitätsmodul (E-Modul) nimmt hierbei ab und stellt den übergeordneten Effekt dar. Durch ansteigende Anpresskraft beider Kontaktflächen entstehen neue Kontaktstellen und die Vorhandenen vergrößern sich. Vorteilhaft ist ebenfalls eine zunehmende Temperatur. Bedingt durch plastische Verformung sowie dem temperaturabhängigen E-Modul verringern sich die Kontaktwiderstände und es entstehen größere Kontaktflächen.

Neben der Oberflächenbeschaffenheit der in Kontakt gebrachten Materialien gibt es einen weiteren Faktor, welcher den Kontaktwiderstand maßgeblich beeinflusst: Oberflächenbeschichtungen. Sie haben die Ausbildung des Fremdschichtwiderstands  $R_F$  zur Folge. Oberflächenbeschichtungen können sowohl gezielt aufgebracht werden, als auch unbeabsichtigt als Verunreinigungen auftreten. Hauptursache für die Existenz ungewollter

Fremdschichten sind chemische Reaktionen mit dem Luftsauerstoff an der Oberfläche der Fügepartner. Hierdurch kann der Kontaktwiderstand eines  $a$ -spots sowohl erhöht als auch verringert werden, abhängig vom spezifischen Widerstand der Beschichtung in Bezug auf den des Trägermaterials.

Im Folgenden wird speziell auf die Widerstände beim Hot-Staking-Verfahren eingegangen. Neben prozessrelevanten Ersatzschaltbildern werden die einzelnen Widerstandswerte sowie deren Einfluss auf den Prozessablauf durch Veränderung der Widerstandswerte erläutert.

Abbildung 3.5 zeigt den eigenen Ansatz zweier Widerstandsreihenschaltungen. Sie bilden den prozessrelevanten Bereich der Widerstände zu unterschiedlichen Prozesszeiten ab. Innerhalb der Widerstandsketten wird unterschieden zwischen folgenden Kontakt- und Materialwiderständen:

$R_1$ : Kontaktwiderstand zwischen Elektrodenhalter und Schweißelektrode

$R_2$ : Materialwiderstand der Schweißelektrode

$R_3$ : Kontaktwiderstand zwischen Schweißelektrode und Kommutatorhaken

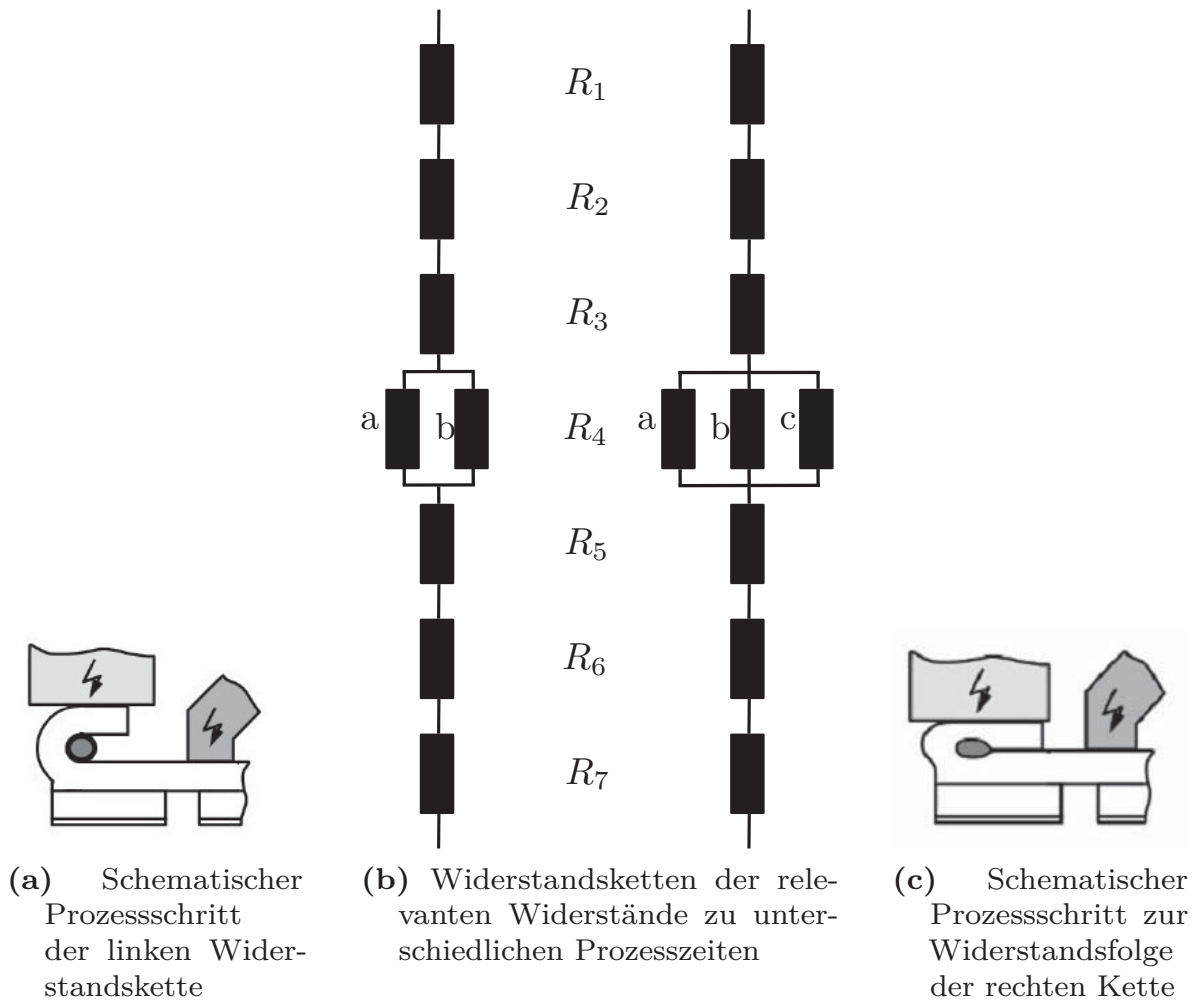
$R_4$ : Materialwiderstand Kommutator

$R_5$ : Kontaktwiderstand zwischen Kommutatorlamelle und Gegenelektrode

$R_6$ : Materialwiderstand der Gegenelektrode

$R_7$ : Kontaktwiderstand zwischen Gegenelektrode und Elektrodenhalter

Der Materialwiderstand des Kommutators ( $R_4$ ) unterscheidet sich je nach Prozessphase in der Anzahl der parallelen Einzelwiderstände ( $R_{4a}$ ,  $R_{4b}$ ,  $R_{4c}$ ). Zu Beginn des Stromflusses (Abbildung 3.5 (a)) gibt es zwei mögliche Strompfade: Durch den Hakenradius ( $R_{4a}$ ) oder durch den Wicklungsdraht ( $R_{4b}$ ). Letzterer nimmt erst dann einen endlichen Wert an, nachdem die Isolation verdampft ist. Aufgrund der wesentlich größeren geometrischen Abmessungen des Hakens, ist der Stromfluss durch den Draht vernachlässigbar. Der Kontakt der Hakenspitze mit der Kommutatorlamelle (Abbildung 3.5 (c)) verursacht einen Nebenschluss und eröffnet somit einen dritten, kürzeren Strompfad. Dieser Teilwiderstand  $R_{4c}$  ist zu Prozessbeginn unendlich, bedingt durch den Abstand von Hakenspitze und Lamelle, wird jedoch ab dem Kontaktzeitpunkt endlich groß und erreicht seinen Endwert erst mit abgeschlossener mechanischer Umformung des Hakens.



**Abbildung 3.5:** Widerstandsketten beim Hot-Staking-Prozess.

# 4

## Zielsetzung und Vorgehensweise

---

Die beiden vorherigen Kapitel haben den aktuellen Stand der Technik aufgezeigt, wobei Kapitel 3 speziell auf das Hot-Staking-Verfahren einging. Es wurde deutlich, dass in diesem Bereich bereits einige Untersuchungen unterschiedlicher Art durchgeführt wurden. Jedoch fehlt ein grundlegendes Prozessverständnis im Falle eines Hakenkommutators.

Neben einigen wichtigen Untersuchungen liegt der Fokus dieser Arbeit auf der Analyse und Charakterisierung einzelner Phasen im gesamten Prozessablauf vom Anfahren bis zum Abheben der Elektroden. Diese Phasen unterteilen den Prozess in verschiedene Bereiche und dienen als Informations- und Diskussionsgrundlage bei Prozessauslegungen und beim Auftreten von Fertigungsproblemen.

Die Vorgehensweise zur Analyse der einzelnen Prozessphasen basiert auf der zeitlich hochaufgelösten Aufnahme relevanter Prozessparameter. Zur Realisierung der Aufnahme wird ein externer, autark von der Schweißsteuerung arbeitender Sensorikaufbau verwendet, der eigens hierfür zusammengestellt wird. Analoge Spannungssignale der einzelnen Sensoren in Kombination mit einer Auswerteeinheit basierend auf LabVIEW ermöglichen die hohe zeitliche Auflösung der Messungen. Die Analyse dieser zeitabhängigen Kenngrößen liefert wichtige Erkenntnisse zum Prozess als Ganzes.

Die Oberflächenbeschaffenheit des Kommutators hat einen direkten Einfluss auf das Ergebnis der Kontaktierung und ist eng verknüpft mit dem Verbindungsmechanismus zwischen Haken und Lamelle. Es gibt hierzu keine bekannten Untersuchungen. Aus diesem Grund wird die Oberfläche von Kommutatoren gezielt bearbeitet und nach dem Hot-Staking-Prozess auf Festigkeit der Verbindung überprüft.



Auch über die Temperaturen im Prozessablauf gibt es kaum Untersuchungen, jedoch ist die generierte Temperatur durch ihre Auswirkungen auf Materialeigenschaften und Widerstände einer der Haupteinflussfaktoren des gesamten Prozesses. Die Herausforderung liegt dabei auf der Evaluation einer geeigneten Messmethodik sowie die Verknüpfung der Temperatur mit den weiteren Prozesskenngrößen über eine zeitsynchrone Messung der Temperatur und den elektrischen Parametern.

Eigentliche Zielsetzung ist die Prozessüberwachung und die Prozessregelung beim Hot-Staking-Verfahren. Hierzu ist jedoch ein Verständnis der grundlegenden Zusammenhänge und Prozessabläufe notwendig. Diese Arbeit trägt einen wesentlichen Teil zur Ermittlung relevanter Prozesskenngrößen bei. Wie bereits in Kapitel 3 erläutert, kommt es bei diesem Verfahren zum Zusammenspiel zwischen elektrischer, mechanischer und thermischer Einflüsse. Jede dieser Komponenten, meist jedoch Kombinationen hiervon, hat einen Einfluss auf die Qualität des resultierenden Produktes. Dies zeigt die Bedeutung, Informationen über die prozessrelevanten Kenngrößen aus allen drei Komponenten zu erhalten. Grundlage hierfür bildet der verwendete Messaufbau, welcher in Kapitel 5 aufgezeigt wird. Aus der Prozessmaschine können ausschließlich elektrische Kenngrößen herausgezogen werden, welche teilweise gefiltert vorliegen. Wichtig ist jedoch die zusätzliche Abbildung mechanischer und thermischer Kenngrößen und dies ganzheitlich synchron mit den elektrischen Kenngrößen.

# 5

## Messtechnik und Messaufbau

---

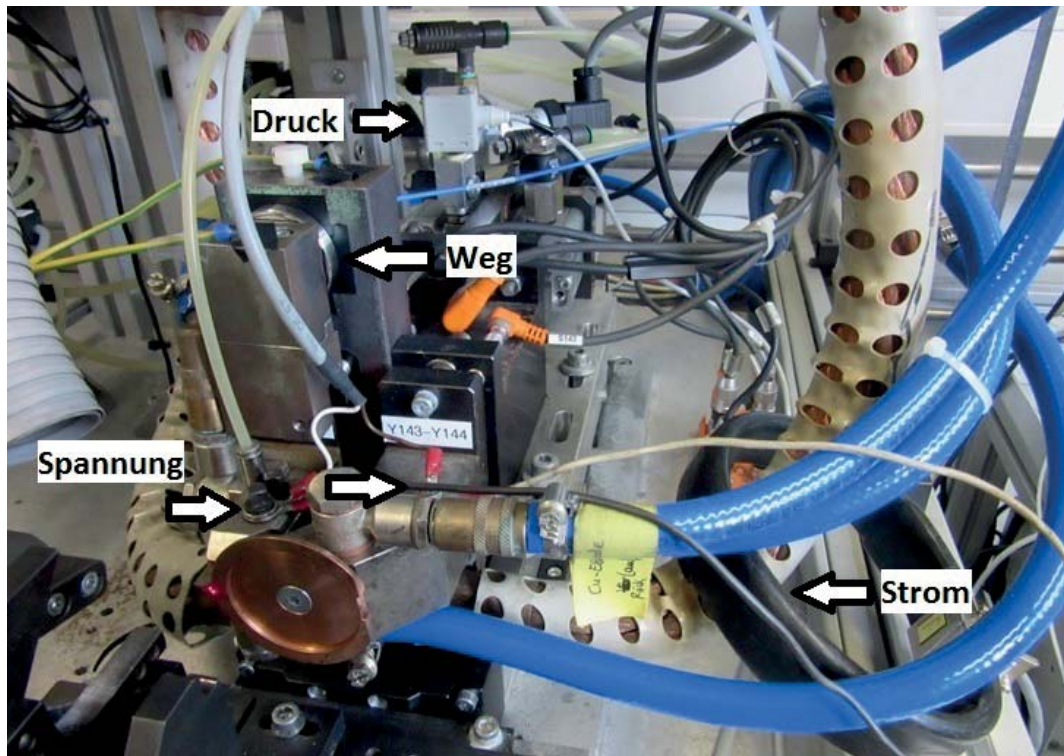
In diesem Kapitel werden die unterschiedlichen Messtechniken und Messaufbauten erklärt, die im Laufe der Versuchsreihen Verwendung finden. So wird das Konzept der Messung der Hakenverschiebekraft sowie der Versuchsaufbau zur Erfassung relevanter Prozesssignale aufgezeigt. Hierbei wird auf die verwendeten Sensoren, die Signalerfassung und deren Speicherung sowie die Weiterverarbeitung der generierten Daten eingegangen. Weiterhin wird die Vorgehensweise zur Messung der Prozesstemperatur vorgestellt.

Dieses Kapitel dient dem Überblick über die eingesetzten Messtechniken und Messaufbauten.

### 5.1 Versuchsaufbau an der Labormaschine

Eine zeitlich hochaufgelöste Darstellung aller erfassbaren elektrischen Parameter ist von Bedeutung, um auf einzelne Phasen schließen zu können und sie erkennbar zu machen. Hierzu wird die Versuchsanlage mit der notwendigen Sensorik ausgestattet, um folgende Parameter extern aufzuzeichnen:

- Stromstärke,
- Spannungsabfall zwischen den Elektrodenhaltern,
- Weg der Schweißelektrode,
- Vorschub- sowie Rückschubdruck des Pneumatikzylinders der Schweißelektrode.



**Abbildung 5.1:** Aufbau und Anordnung der Sensoren zur Messung prozessrelevanter Parameter.

Aus den Messgrößen Stromstärke und Spannung wird zusätzlich der Widerstand berechnet, dessen zeitlicher Verlauf für das Prozessverständnis von großer Bedeutung ist.

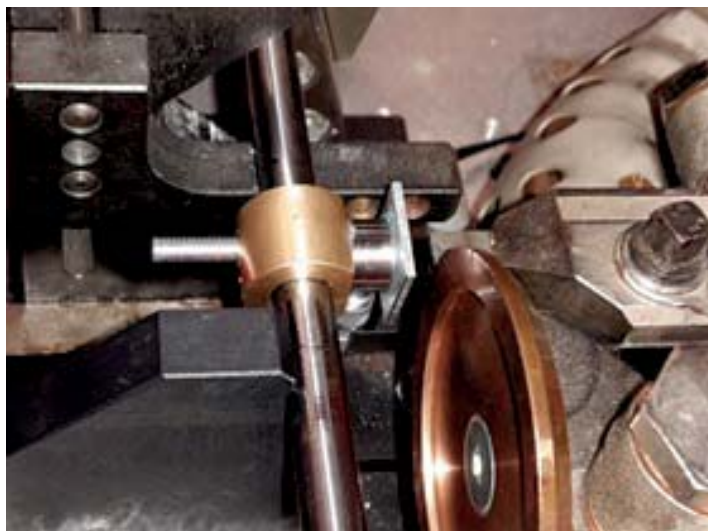
Abbildung 5.1 zeigt die Anordnung der Sensoren an der Versuchsanlage. Die Datenblätter und technischen Kenngrößen der eingesetzten Sensoren können Anhang A entnommen werden. Die Stromstärke wird mit einer Rogowski-Spule<sup>1</sup> am Sekundärkabel gemessen. Sekundärkabel sind die stromführenden Verbindungskabel zwischen Transformator und Elektrodenhalter. Die Spannungsabgriffe befinden sich an den Elektrodenhaltern, da sie auf diese Weise keinen Elektrodenwechsel behindern. Nach dem Erreichen einer definierten Standzeit müssen die Elektroden ausgetauscht werden, da sie zu starken Verschleiß ausweisen. Diese Elektrodenwechsel finden im Serienbetrieb der Anlagen mehrmals täglich statt, weshalb die Spannungsabgriffe an den Elektrodenhaltern befestigt sind. An dieser Position können sie durchgehend verharren, ohne bei den Elektrodenwechseln entfernt und neu angebracht werden zu müssen.

<sup>1</sup>Funktionsweise siehe [Sch10a].

In dieser Arbeit kommt es beim Hot-Staking-Prozess ähnlich dem Kondensatorentladungsschweißen zu einem hohen Stromgradienten zu Beginn des Prozesses. Da der Fokus jedoch auf der Verbindungsbildung und dem allgemeinen Verständnis des Prozessablaufes liegt, wird bei der Spannungsmessung auf eine Analyse der induzierten Störspannung analog zu Kapitel 2.3 und [Ket16] verzichtet.

Sowohl die Schweiß- als auch die Gegenelektrode werden pneumatisch betrieben, der Zylinderdruck der Schweißelektrode sensorisch gemessen. Die Kraft der Gegenelektrode spielt keine Rolle in der Betrachtung. Diese Elektrode wird über den gesamten Prozessablauf mit konstantem Druck von 2,5 bar betrieben. Geeigneter Prozessparameter ist die Kraft, welche die Schweißelektrode auf den Kommutatorhaken ausübt. Diese Kraft ist jedoch im Serienbetrieb schwer erfassbar, weshalb auf die Druckmessung zurückgegriffen wird. Eine gesonderte Messreihe setzt jedoch die ausgeübte Kraft in Verbindung mit dem eingestellten Druck. Hierzu wird ein piezoelektrischer Sensor auf einer Vorrichtung montiert, so dass die Möglichkeit gegeben ist, die Kraft zu messen, welche von der Elektrode im stationären Zustand ausgeübt wird, Abbildung 5.2 [Som15].

Zur Eliminierung zufälliger Messabweichungen sowie von hochfrequentem Rauschen, wird jeder Druckwert über einen Zeitraum von 150 bis 350 ms



**Abbildung 5.2:** Messaufbau zur Korrelation der Elektrodenkraft mit dem eingestellten Druck des Pneumatikzylinders. Ein piezoelektrischer Kraftaufnehmer auf einem Dummy-Anker zeichnet die Kraft auf, die von der Elektrode im stationären Zustand ausgeübt wird.





gemittelt. Druck  $p$  und Kraft  $F$  sind proportional verknüpft über die Zylinderfläche  $A_{Zyl}$ :

$$p = \frac{F}{A_{Zyl}} \quad (5.1)$$

Die einfache Darstellung von 5.1 gilt für den reibungsfreien Idealfall. Unter Berücksichtigung der Haftreibung  $F_R$  wird 5.1 zu

$$F = c_{korrr} \cdot A_{Zyl} \cdot p - F_R \quad (5.2)$$

mit dem Korrekturfaktor  $c_{korrr}$  der Zylinderfläche. Der Pneumatikzylinder hat einen Radius von 20 mm und somit eine Fläche von

$$A_{Zyl} = \pi \cdot r^2 = 1257 \text{ mm}^2 \quad (5.3)$$

Aus der Messreihe resultiert der erwartete lineare Zusammenhang zwischen Druckeinstellung und ausgeübter Kraft auf den Haken. Dieser gemessene Zusammenhang ist in Abbildung 5.3 zu sehen. Die Regressionsgerade der Gleichung  $y = 124,876 \cdot x - 5,677$  folgert eine gemessene Zylinderfläche von  $A_{Zyl,gem} = 1249 \text{ mm}^2$ . Hieraus ergibt sich für den Korrekturfaktor

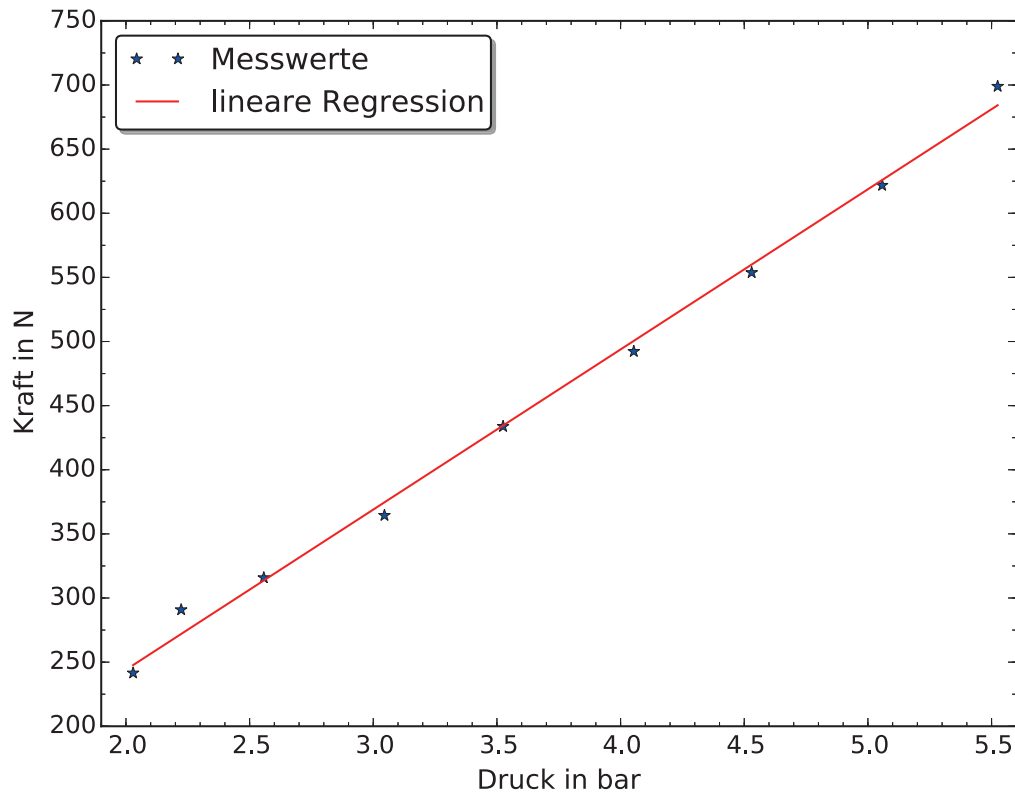
$$c_{korrr} = \frac{A_{Zyl,gem}}{A_{Zyl}} = \frac{1249}{1257} = 0,9936. \quad (5.4)$$

Dies unterstreicht die Plausibilität der Messung und schließt unberücksichtigte Störgrößen aus.

Letzter sensorisch erfasster Prozessparameter ist der Weg der Schweißelektrode. Diese Messgröße wird über einen berührungslosen Sensor gemessen, welcher auf dem kapazitiven Messprinzip beruht. Grundlage dieses Messprinzips ist der ideale Plattenkondensator, wobei der Sensor selbst eine Platte ausbildet und ein elektrisch leitendes Gegenstück als zweite Platte vorhanden sein muss. Für die Kapazität  $C$  eines Plattenkondensator gilt unter Verwendung der elektrischen Feldkonstante  $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$ , der relativen Permittivität  $\varepsilon_r$  des Mediums zwischen beiden Platten der Fläche  $A$  und Abstand  $d$  [Wol16]:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{A}{d}. \quad (5.5)$$

Ein Wechselstrom konstanter Amplitude wird angelegt. Nun gilt, dass die Amplitude proportional zum Abstand der Platten ist und dies ermöglicht eine sehr genaue Abstandsmessung (Anhang A).



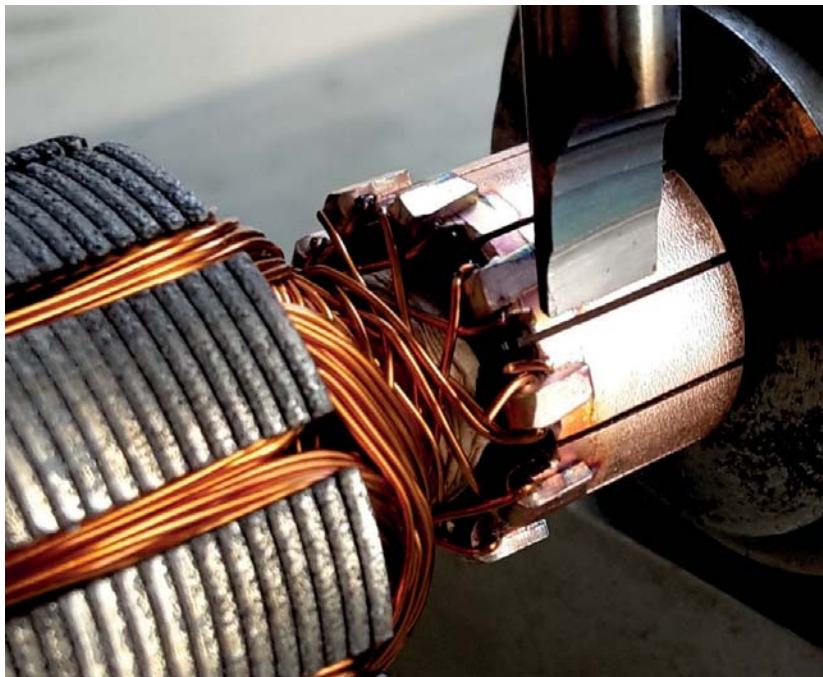
**Abbildung 5.3:** Gemessener Zusammenhang zwischen Druck des Pneumatikzylinders und der ausgeübten Kraft der Elektrode. Es ist im relevanten Druckbereich ein linearer Zusammenhang ersichtlich.

Die aufgezeigten Sensoren werden zur Datenerfassung mit einem Messrechner verbunden. Jeder Sensor wird über eine Bayonet-Neill-Concelmann (BNC) -Steckverbindung mit einer BNC-Messbox verbunden, welche mit einer Messkarte im Computer verbunden ist. Die Sensoren liefern jeweils ein analoges Spannungssignal im Bereich von 0 bis 10 V. Zur weiteren Verarbeitung dieses Signals wird eine Messdatenerfassung, basierend auf National Instruments Systemdesignsoftware LabVIEW, verwendet. Aufgabe der Auswertesoftware ist es, die Analogsignale zeitsynchron zu erfassen und in einem definierten Dateiformat abzulegen [Som15]. Als Triggersignal dient der Weg der Elektrode, da dies der erste Sensor ist, von dem ein Signal ausgeht. Die Weiterverarbeitung der Messdaten erfolgt entkoppelt von der Erfassungssoftware über ein Python-Skript, Anhang B.

## 5.2 Hakenverschiebekraft

Hierbei handelt es sich um eine Art Scherprüfung des Hakens nach dem Kontaktvorgang, Abbildung 5.4. Der Anker wird bei dieser Prüfung horizontal in eine Messvorrichtung eingespannt. Ein Messdorn drückt den kontaktierten Haken über eine definierte Wegstrecke seitlich nach unten. In diesem Fall sind dies 2 mm. Hierbei gilt es zuerst, die nötige Kraft aufzubringen, um die Verbindung zwischen Haken und Lamelle zu lösen. Ist diese Kraft erreicht, kommt es zu einem abrupten Kraftabfall. Anschließend wird der Haken weiter gedrückt bis zum Ende der Wegstrecke. Es resultiert ein Kraft-Weg-Diagramm mit einem Maximalwert der Kraft beim Lösen bzw. Aufbrechen der Kontaktierung.

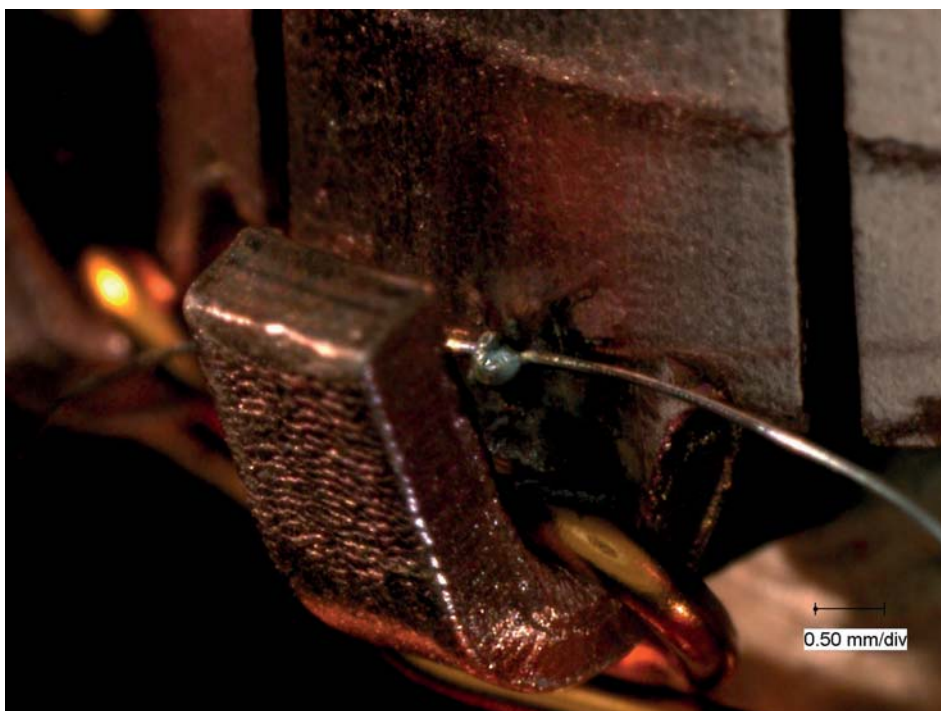
Der Kurvenverlauf unterliegt bei diesen Messungen Streuungen, deren Ursachen unterschiedlich sein können. Einerseits hat das Aufsetzen des Messdorns einen Einfluss, da der Kommutator nach jeder Messung weiter gedreht wird und es hierdurch zu Abweichungen durch die manuelle Ausrichtung kommen kann. Andererseits kann es beim Verschieben des Hakens zu Verzahnungen der Oberflächenrauigkeiten kommen, die sich von Kommutator zu Kommutator unterscheiden.



**Abbildung 5.4:** Versuchsaufbau zur Messung der Hakenverschiebekraft.

## 5.3 Temperaturmessung

Der Messaufbau zur Bestimmung der entstehenden Temperaturen im Prozessablauf ist identisch zu Kapitel 5.1, mit der Ausnahme, dass ein weiterer Sensor hinzugeschaltet wird. Die Messstelle des Thermoelementes befindet sich im Hakenradius, siehe Abbildung 5.5. Die beiden offenen Ende des Thermoelementes werden über Bananenstecker an die BNC-Steckverbindung geklemmt und bilden somit ein zusätzliches analoges Eingangssignal. Auf eine Kaltstellenkompensation wird bewusst verzichtet, um den Messaufbau so einfach wie möglich zu halten. Dies hat zudem keine negativen Auswirkungen auf die Messung, da die Umgebungstemperatur nicht relevant ist. Der lineare Zusammenhang zwischen der entstehenden Thermospannung eines Thermoelementes Typ K und der auftretenden Temperatur ist in Abbildung 5.6 aufgezeigt und wird anschließend über das erwähnte Python-Skript ausgenutzt und dort umgerechnet.



**Abbildung 5.5:** Anordnung des Thermoelementes auf der Lamelle. Die beiden Thermoeinzeldrähte (Durchmesser  $80\ \mu\text{m}$ ) wurden mittels Laserschweißung kontaktiert und mit der Lamelle verbunden.

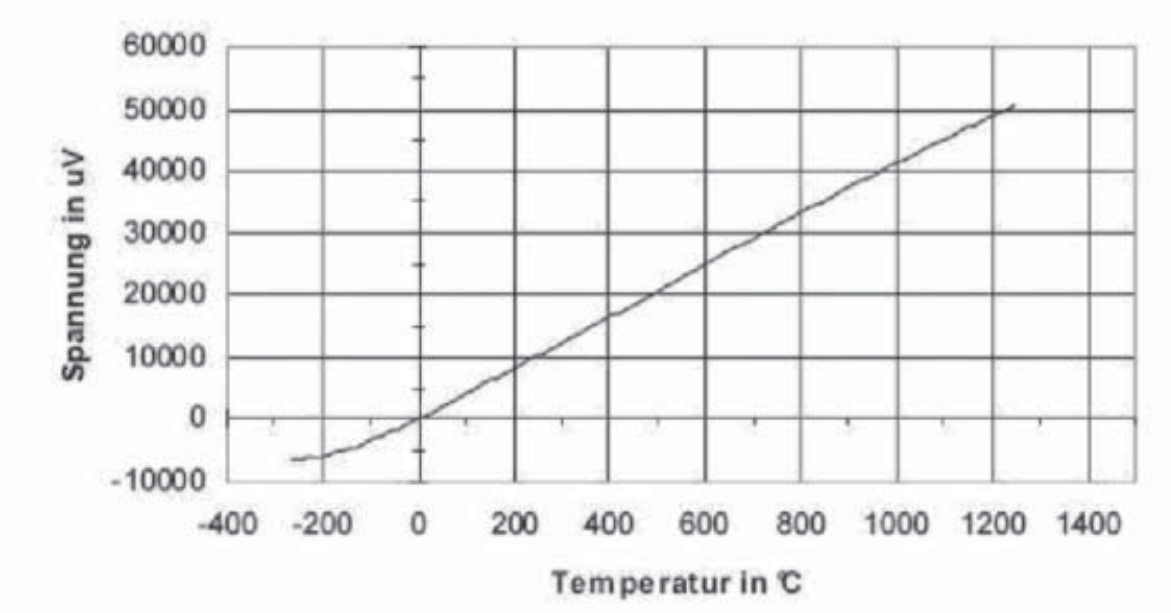


Abbildung 5.6: Kennlinie von Thermoelementen Typ K [Laz16].

# 6

## Prozessphasenanalyse

---

Ein erweitertes Verständnis des Prozesses als Ganzes erfordert eine ausreichende Kenntnis der auftretenden Prozessphasen. Als Prozessphasen werden sämtliche Zeitintervalle im Prozessablauf bezeichnet, in denen unterschiedliche charakteristische Merkmale beobachtet werden können. Mit dem Wissen über die physikalischen und materialwissenschaftlichen Vorgänge innerhalb der Phasen können einerseits Rückschlüsse über Abweichungen vom Soll-Zustand gezogen werden, andererseits ist dieses Wissen hilfreich bei Neuanwendungen des Verfahrens, gerade im Hinblick auf Taktzeitreduzierungen.

Es wird auf die einzelnen Prozessphasen eingegangen und die prozessrelevanten Eigenschaften der jeweiligen Phasen werden erläutert. Der in diesem Kapitel verwendete Versuchsaufbau ist in Kapitel 5.1 und [Som15] detailliert erläutert.

### 6.1 Die fünf Prozessphasen

Der in Kapitel 5.1 aufgezeigte Versuchsaufbau erlaubt es, sämtliche elektrischen Prozesskenngrößen zeitsynchron aufzuzeichnen. Dies ermöglicht, den gesamten Prozessablauf zu charakterisieren, um unterschiedliche Phasen im Ablauf zu definieren, zu analysieren und Rückschlüsse auf Einflussfaktoren zu ziehen. Abbildung 6.1 zeigt den Prozessablauf einer Kontaktierung unter Serienbedingungen. Hierbei sind die Signalverläufe der Prozessgrößen Stromstärke, Spannung, Widerstand, Druck und Weg abgebildet. Zu Beginn des Prozesses steigt das Drucksignal an und impliziert das Vorfahren der Schweißelektrode, wobei das Wegsignal nicht bei



0 mm beginnt. Ursache hierfür ist der platzbedingte Einbau des Sensors, so dass dieser nicht auf der Gegenplatte aufliegt, sondern einen Abstand aufweist. Ebenfalls ersichtlich ist die Reaktionszeit des Drucksignals. Dieses benötigt eine gewisse Zeit, um den Endwert zu erreichen. Sobald die Differenz aus Vorschub- und Rückschubdruck jedoch positiv ist, setzt das Verfahren der Elektrode in Richtung Haken ein. Das konstante, rechteckige Stromprofil ist auf eine Konstantstromregelung zurückzuführen. Hierbei wird die eingestellte Stromstärke über den gesamten Zeitraum konstant gehalten.

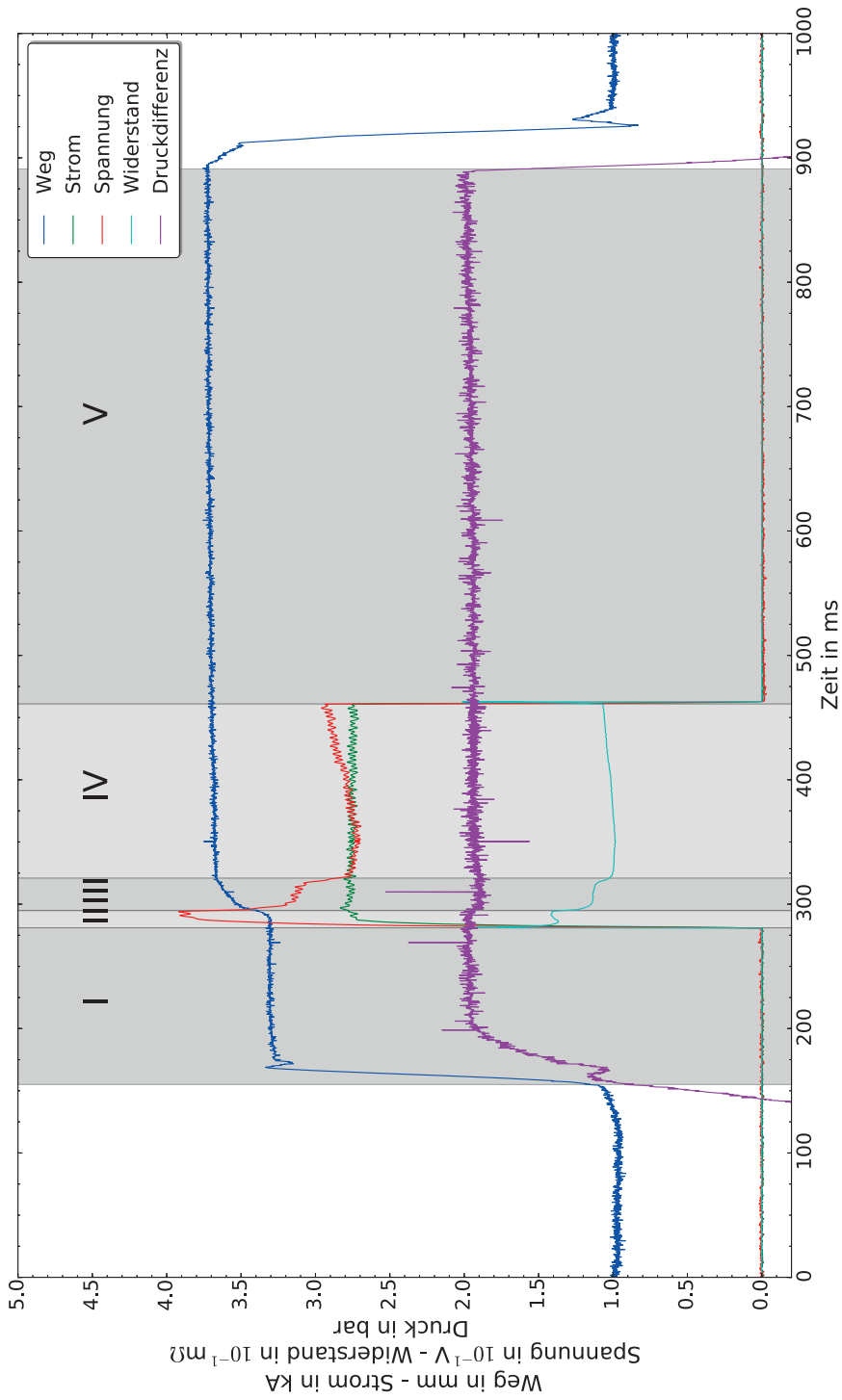
Anhand des Signalverlaufs im Serienzustand und dem schematischen Prozessablauf aus Kapitel 3.1 können insgesamt fünf Prozessphasen definiert werden, die im Folgenden genauer erläutert werden. Abgebildet sind diese charakterisierten Phasen ebenfalls in Abbildung 6.1. Zur besseren Darstellung sind sämtliche Signalverläufe auf einer Ordinate aufgetragen. Zu beachten sind die teilweise untypischen Angaben der jeweiligen Einheiten.

### 6.1.1 Prozessphase I

Die erste Phase beschreibt den Zeitraum des Anfahrens der Schweißelektrode auf den Haken. Das Drucksignal baut sich auf, was in einem Verfahren der Elektrode resultiert. Beim Auftreffen der Elektrode auf den Haken wird diese kurz abgebremst, was sich in einem Schwinger des Drucksignals widerspiegelt. In diesem Schritt wird der Haken parallel zur Lamelle kaltverformt und anschließend wird diese Position eine definierte Vorhaltezeit gehalten. In dieser Phase findet noch kein Stromfluss statt.

### 6.1.2 Prozessphase II

Diese kurze Phase schließt an die Vorhaltezeit an und beginnt mit Einsetzen des Stroms. Bedingt durch den großen Stromgradienten zu Beginn dieser Phase kommt es zusätzlich zum ohmschen Widerstand zu induzierter Störspannung (Kapitel 2.3), welche das Spannungssignal verfälschen und den charakteristischen Peak im Spannungsverlauf verursachen können. Zu Beginn fließt der Strom ausschließlich über den Hakenradius und sorgt für das partielle Verdampfen der Lackisolation. Weiterhin erweicht der Haken durch die Temperaturzunahme und gibt dem anliegenden Druck der Elektrode nach, bis die Hakenspitze die Lamelle berührt und ein Nebenschluss entsteht. Dieser Nebenschluss hat einen zusätzlichen, kürzeren Strompfad zu Folge, weshalb der Widerstand abrupt abfällt.



**Abbildung 6.1:** Signalverlauf unter Serienbedingungen mit eingezeichneten Prozessphasen. Es werden fünf Phasen charakterisiert und in Kapitel 6.1 erläutert.





### 6.1.3 Prozessphase III

Nach dem Nebenschluss durch den Kontakt zwischen der Hakenspitze und der Lamelle folgt die weitere mechanische Umformung des Hakens. Folglich sinkt der Druckverlauf in dieser Phase kurz ab aufgrund der Verformung. Der Haken schmiegt sich nach und nach an die Lamelle an. In dieser Zeit ändert sich der Widerstand kaum und sinkt erst abschließend auf das Minimum ab, wenn der Haken vollständig an der Lamelle anliegt. Eine Hochgeschwindigkeitsaufnahme des Hot-Staking-Prozesses belegt diese Hypothese durch Vergleich des Zeitsignals der abgeschlossenen Umformung und des Widerstandstiefpunkts. Die Umformung des Hakens bzw. das Umschließen des Drahtes durch den Haken zeigt sich ebenfalls im Signalverlauf des Elektrodenwegs. Hier ist das Einsinken der Elektrode zu ihrem Maximalweg ersichtlich.

### 6.1.4 Prozessphase IV

In dieser Phase findet weiterhin ein Stromfluss statt, jedoch ist die mechanische Umformung des Hakens abgeschlossen. Der Widerstand steigt leicht linear an, bedingt durch die Materialerwärmung, da es zu diesem Zeitpunkt zu keinen anderen Prozessen kommt, die Einfluss auf den Widerstandsverlauf haben. Wichtigstes Merkmal dieser Phase ist die Ausbildung der Verbindung zwischen Haken und Lamelle. Hierauf wird in Kapitel 7.4 detailliert eingegangen. Weiterhin zeigen Hochgeschwindigkeitsaufnahmen, dass die Temperatur in dieser Phase ausreicht, um für einen Lackabbrand außerhalb des Hakens zu sorgen. Dieses Merkmal ist ein Indiz einer guten elektrischen Kontaktierung, da der Draht auch unter dem Haken abisoliert sein muss, wenn die Temperatur ausreicht, um die Isolation außerhalb des Drahtes für kurze Distanzen zu entfernen. Phase vier endet mit dem Abschalten des Stroms.

### 6.1.5 Prozessphase V

Abschließend ist in Abbildung 6.1 die fünfte Phase aufgezeigt. Sie ist definiert durch das stromlose Nachhalten zur Wärmeabfuhr aus der Verbindung. Die Temperatur klingt in dieser Phase exponentiell ab (vgl. Kapitel 7.3), weshalb diese Phase den größten Zeitabschnitt abdeckt. Mit dem Absinken des Drucks endet die fünfte Prozessphase und die Elektroden heben ab.

## 6.2 Prozessablauftabelle

Die fünf aufgezeigten Phasen lassen sich einer Gesamtablauftabelle darstellen (Tabelle 6.1). Diese kombiniert charakteristische Prozessmerkmale mit den zugehörigen Signalen und stellt diese direkt gegenüber. Bei den auftretenden Zahlenwerten handelt es sich um gerundete Werte, da diese Tabelle eine Übersicht darstellen soll und nicht den Prozess exakt darlegen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist die elektrische Kenngröße Spannung in der Tabelle nicht aufgeführt, da sie mit den Größen Stromstärke und Widerstand korreliert.

Phase	t in ms	t <sub>r</sub> in ms	x in mm	I in kA	R in mΩ	p in bar	Prozessmerkmale
I	0-150 150-280	-	1 1 → 3,3	-	-	-5 -5 → 2	Prozess noch nicht gestartet Anfahren der Elektrode mit Kaltverformung des Hakens und Vorhaltezeit
II	280-290	0-10	3,3	2,8	0,14	2	Beginn Stromfluss mit Hakenerweichung und Kontakt Hakenspitze-Lamelle
III	290-320	10-40	3,3 → 3,7	2,8	0,11	1,9	mechanische Umformung des Hakens in Endposition
IV	320-470	40-180	3,7	2,8	0,1	2	Verbindungsbildung zwischen Haken und Lamelle und Ende des Stromflusses
V	470-890 890-1000	-	3,7 3,7 → 1	-	-	2 2 → -5	Nachhaltezeit zur Wärmeabfuhr Abheben der Elektrode

Tabelle 6.1: Prozessablaufabelle

# 7

## Wirkzusammenhänge

---

In diesem Kapitel werden einige Wirkzusammenhänge sowie weitergehende Prozessanalysen erläutert, die zum Prozessverständnis beitragen. Verschiedene Qualitätsmerkmale werden zur Beurteilung herangezogen. Beginnend wird der Zusammenhang zwischen unterschiedlichen Parametern und der Hakenverschiebekraft aufgezeigt. Unterstützt wird dies durch Kraft-Weg-Verläufe, die während der Kraftmessung aufgezeichnet werden. Neben metallografischen Schliffen und Mikroskopbildern werden zudem Härtemessungen durchgeführt, um den Einfluss der Temperatur auf das Kupfermaterial deutlich zu machen. Anschließend werden die Ergebnisse einer Versuchsreihe zur Ermittlung des Einflusses der Oberflächenstruktur auf die Verbindung zwischen Haken und Lamelle vorgestellt. Zwei wichtige Parameter des Gesamtprozesses sind die Stromstärke sowie die Kraft, mit der die Elektrode auf den Haken drückt. Auf das Zusammenspiel dieser beiden Kenngrößen wird in einem Abschnitt dieses Kapitels genauer eingegangen. Einen großen und wichtigen Teil dieses Kapitels nimmt die zeitsynchrone Messung der auftretenden Prozesstemperatur in der Verbindungsstelle zwischen dem Haken und der Lamelle ein. Dieses Kapitel schließt mit der Diskussion der Art der Verbindungsbildung ab. Unterstützt wird dies durch REM-Aufnahmen von Hakenunterseiten nach Kontaktierungen bei unterschiedlichen Stromflussdauern.

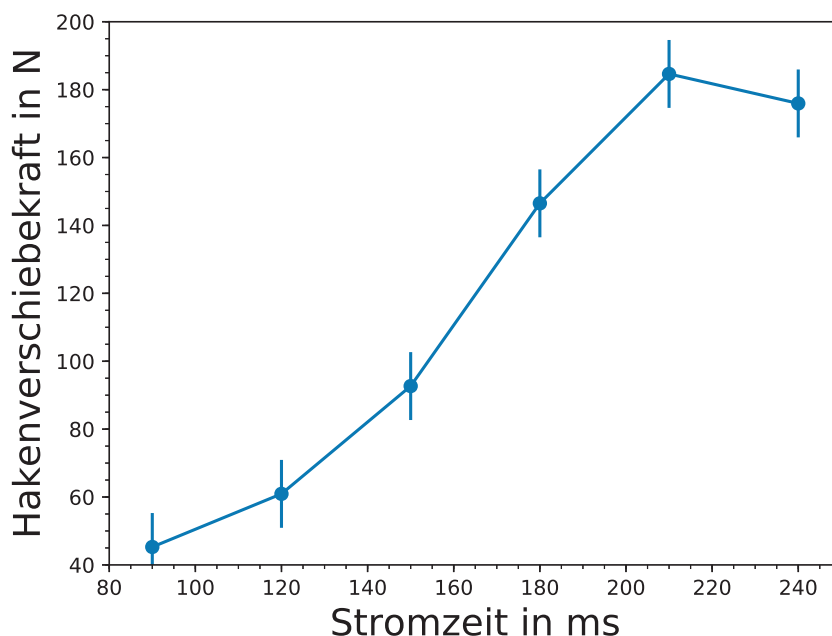


## 7.1 Einflussfaktoren auf die Festigkeit der Verbindung

Ein Qualitätsmerkmal der Kontaktierung ist die Festigkeit des Hakens auf der Lamelle. Gemessen wird die Stärke der Verbindung wie in Kapitel 5.2 beschrieben. In den folgenden Abschnitten werden verschiedene Versuchsreihen mit Modifikationen des Prozessablaufs aufgezeigt und deren Einfluss auf die Hakenverschiebekraft bestimmt. Anschließend werden zusätzlich metallografische Analysen dieser Komponenten durchgeführt, um die Messungen zu bestätigen.

### 7.1.1 Einfluss der Stromflussdauer auf die Hakenverschiebekraft

Die benötigte Kraft zum Abscheren ist hauptsächlich abhängig vom Druck, mit dem Haken und Lamelle zusammengedrückt werden, von der Stromstärke und von der Zeit, in der der Strom fließt. Die Abhängigkeit von der Stromzeit zeigt Abbildung 7.1. Hierbei werden alle Prozessgrößen konstant



**Abbildung 7.1:** Zusammenhang zwischen Dauer des Stromflusses und Hakenverschiebekraft bei 50 Messungen pro Stromzeit.

gelassen und ausschließlich die Dauer des Stromflusses im Bereich von 90 bis 210 ms in Schritten von 30 ms variiert. Diese Versuchsreihe wird für fünf Kommutatoren pro Stromflussdauer wiederholt und die Mittelwerte gebildet. Die Streuung der Messwerte ist nur in geringen Maße vorhanden und größtenteils durch die Positionierung des Messdorns begründet. Aus diesem Grunde werden die Streuungen in Abbildung 7.1 nicht aufgezeigt, um eine bessere Lesbarkeit des Diagramms zu gewährleisten.

Unterhalb einer Bestromungszeit von 90 ms ist keine Hakenverschiebekraft messbar. Die reine mechanische Umformung des Hakens dauert rund 60 ms. Somit ist hier keine ausreichende Zeit gegeben, in der sich eine Verbindung zwischen Haken und Lamelle ausbilden kann.

Die Kraft-Weg-Verläufe, auf die später eingegangen wird, zeigen eine benötigte Kraft zum Verschieben des Hakens von etwa 50 N. Somit macht sich die Dauer des Stromflusses in Abbildung 7.1 erst ab über 100 ms bemerkbar in Korrelation mit einer Verbindungsbildung, da erst dann Kraftmaxima größer 50 N aufgebracht werden. In Folge einer ansteigenden Dauer der Phase des Stromflusses nimmt auch die Festigkeit der Verbindung zu. Diese erreicht ein Plateau um 210 ms. Höhere Schweißzeiten erhöhen die Wahrscheinlichkeit eines Durchschmelzens im Hakenradius und können hierdurch eine zerstörende Auswirkung auf den Kommutator haben. Durch den zu hohen Wärmeeintrag sind die einzelnen Haken zudem stark geplättet (Abbildung 7.2), weshalb es nicht möglich ist, das Scherwerkzeug aufzubringen. Auch der zu starke Lackabbrand außerhalb des Hakens sowie die Verformung der Lamelle können zu Kurzschlüssen und somit zum Ausfall des Motors führen.

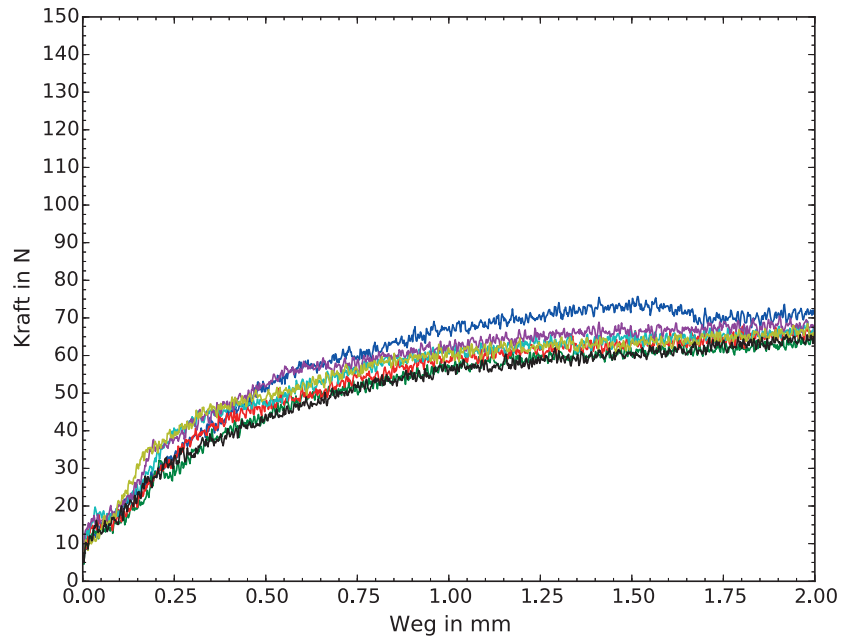
Einen weiteren Beleg für die Korrelation von Dauer des Stromflusses und der Hakenverschiebekraft liefert die Analyse zugehöriger Kraft-Weg-Verläufe des Prüfverfahrens. Bei der Messung der Hakenverschiebekraft werden diese Diagramme aufgezeichnet, die ebenfalls wichtige Informationen über den Prozess liefern.

Die resultierenden Verläufe können Abbildung 7.3, Abbildung 7.4 und Abbildung 7.5 entnommen werden.

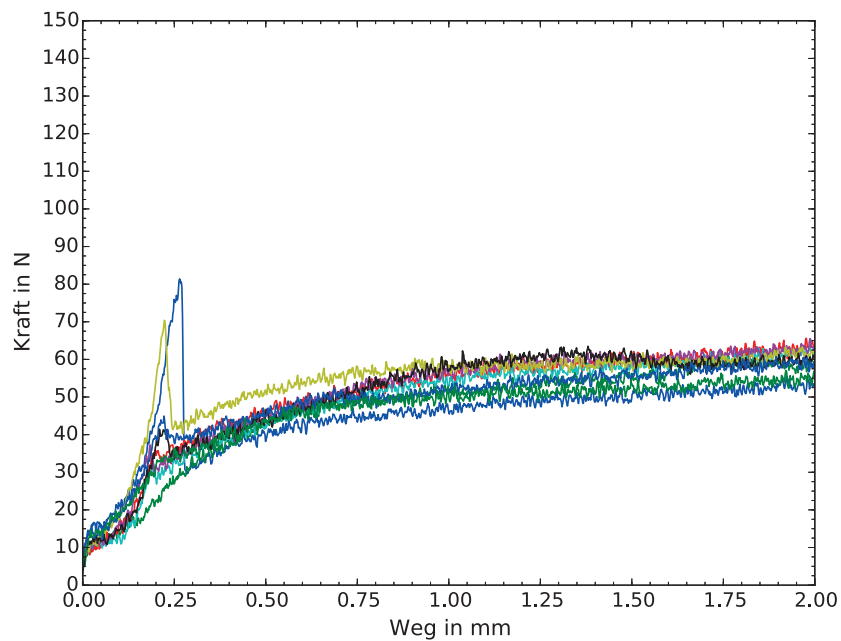
Ein Merkmal im Verlauf charakterisiert den Prozess: Der Maximalwert der Kraft. Bei einer Stromzeit von 90 ms ist kein Maximalwert auszumachen. Es handelt sich lediglich um das nahezu gleichmäßige Verschieben des Hakens. Wird die Stromzeit erhöht, so kommt es allmählich zur vereinzelnden Ausbildung einer Kraftspitze. Dieser Spitzenwert mit dem steilen Abfall der Kraft direkt anschließend zeigt, dass eine Verbindung zwischen Haken und Lamelle aufgebrochen wird. Erst bei dem Verlauf



**Abbildung 7.2:** Haken bei einer Stromflusszeit von 240 ms. Der Haken ist zu stark geplättet, so dass das Scherwerkzeug nicht aufgebracht werden kann. Weiterhin ist der deutliche Lackabbrand außerhalb des Hakens zu sehen sowie die seitliche Verformung der Lamelle, welche zu Kurzschlüssen führen kann.



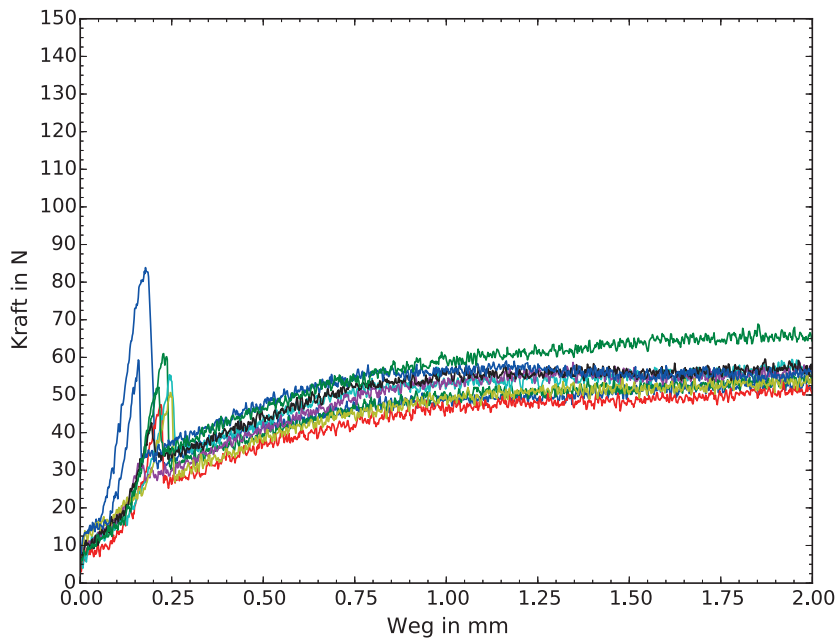
(a) Stromzeit: 90 ms. Es ist kein Maximalwert und somit keine Verbindung vorhanden. Der Haken wird über den gesamten Weg lediglich verschoben.



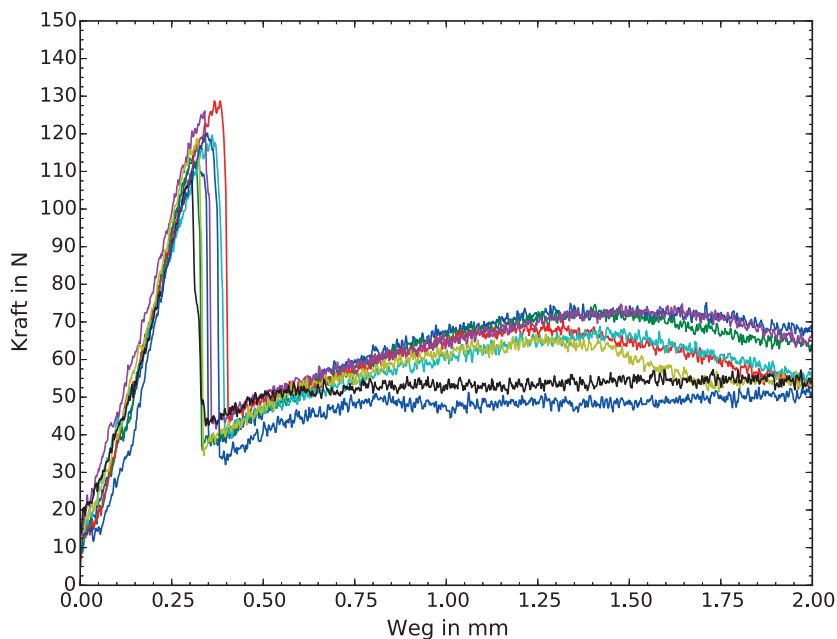
(b) Stromzeit: 120 ms. Vereinzelt kommt es nun zu geringen Maximalwerten. Der Großteil verfügt jedoch weiterhin über keine Verbindung.

**Abbildung 7.3:** Vergleich der Kraft-Weg-Verläufe bei Stromzeiten von 90 ms und 120 ms.



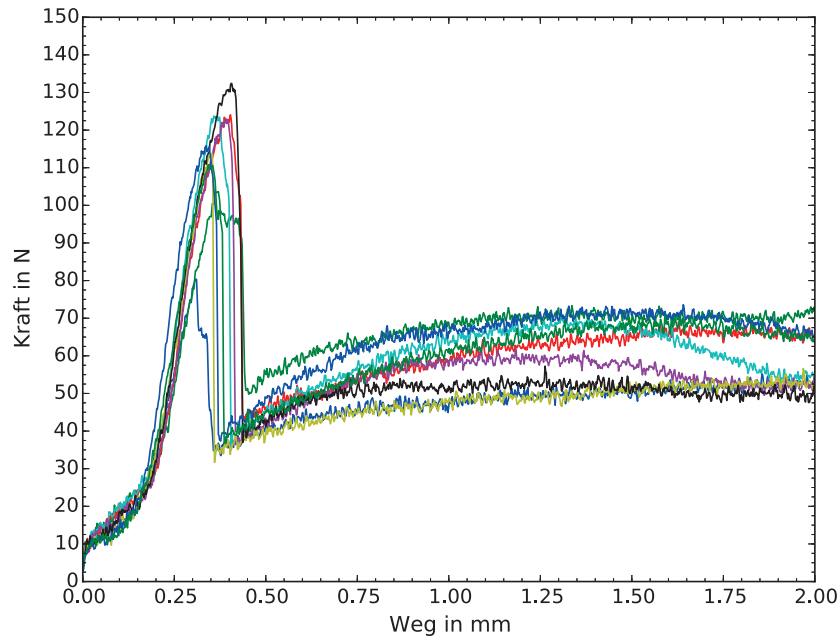


(a) Stromzeit: 150 ms. Die Anzahl der Messreihen mit vorhandenem Kraftpeak nimmt zu. Die Werte selbst sind jedoch niedrig.



(b) Stromzeit: 180 ms. Hier ist bei jeder Messung ein deutlich ausgeprägter Kraftpeak ersichtlich, d.h. jeder Haken war ausreichend fest mit der Lamelle verbunden.

**Abbildung 7.4:** Vergleich der Kraft-Weg-Verläufe bei Stromzeiten von 150 ms und 180 ms.



**Abbildung 7.5:** Stromzeit: 210 ms. Der Kurvenverlauf ist ähnlich dem bei 180 ms.

der Stromzeit von 180 ms zeigen sich ausgeprägte Maximalwerte bei allen Messungen (Abbildung 7.4(b)). Eine Verlängerung der Stromzeit darüber hinaus bringt keine nennenswerte Steigerung der Maximalkraft, gegenteilig bewirkt sich einen zu starken Lackabbrand außerhalb des Hakens und somit eine erhöhte Kurzschlussgefahr. Tabelle 7.1 fasst die gemittelten Maximalwerte und deren Standardabweichung ( $\sigma$ ) zusammen. Bei der Stromdauer von 210 ms sind jeweils zwei Werte angegeben. In der zweiten Spalte wurde ein Ausreißer manuell eliminiert, um zu verdeutlichen, dass sich diese Werte nicht stark unterscheiden im Vergleich zu denen bei 180 ms Stromflussdauer. Bei 90 ms sind keine Werte eingetragen, da kein eindeutiges Maximum vorhanden ist.

### 7.1.2 Einfluss einer Druckerhöhung innerhalb des Prozessablaufs

Ein weiterer Einflussparameter auf die Qualität bzw. Festigkeit der Verbindung ist eine Druckerhöhung innerhalb des Prozessablaufs. Beide in Kapitel 2.4 aufgezeigten Mechanismen der Verbindungsbildung verlangen einen möglichst atomaren Abstand beider Kontaktflächen. Insgesamt kommen zwei Zeitpunkte in Frage, in denen sich eine Erhöhung des Druckes



**Tabelle 7.1:** Gemittelte Maximalwerte der Hakenverschiebekraft und Standardabweichungen bei unterschiedlichen Stromflussdauern

Stromzeit in ms	Maximum in N	$\sigma$ in N
90	-	-
120	58,38	17,95
150	58,57	11,27
180	119,04	5,88
210	113,96	14,30
210 (ein Ausreißer eliminiert)	118,15	8,47

positiv auf diesen Abstand und somit auf die Verbindungsbildung auswirken kann:

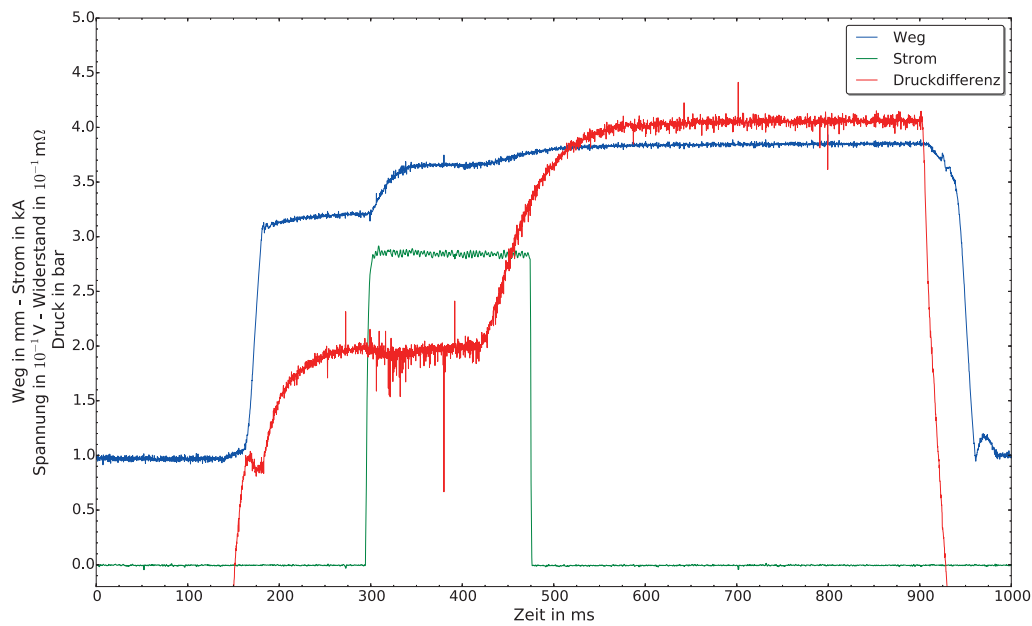
1. innerhalb der Stromzeit (STZ) (Phase IV)
2. innerhalb der NHZ (Phase V)

Zuverlässige Aussagen können nur getroffen werden, wenn der Einfluss systematischer Fehler eliminiert wird. Damit dies gewährleistet ist, werden die beiden unterschiedlichen Zeitpunkte der Druckerhöhung auf mehreren Kommutatoren unterschiedlicher Chargen alternierend abgefahren. Hierbei wird der Druck jeweils verdoppelt im Vergleich zum eingestellten Sollwert.

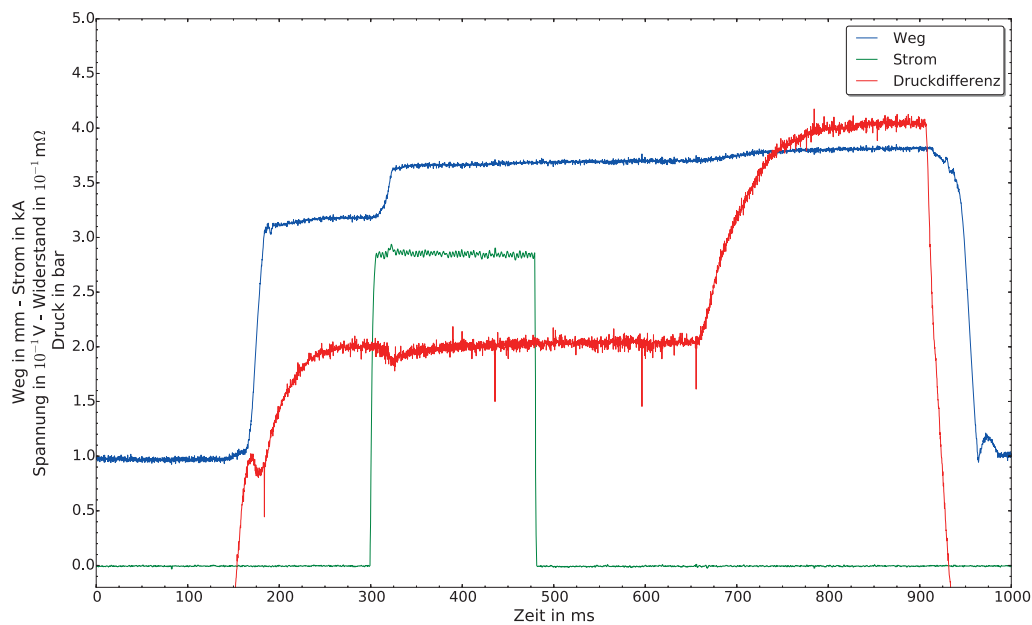
Zur Verdeutlichung der Zeitpunkte der Druckerhöhung zeigt Abbildung 7.6 die resultierenden Signalverläufe, wobei aus Gründen der Übersicht einige Signalverläufe nicht abgebildet sind.

Tabelle 7.2 gibt die Mittelwerte der Maximalkräfte für das Aufbrechen der Verbindung sowie deren Standardabweichung ( $\sigma$ ) an, verglichen mit den Werten einer Serienkontaktierung.

Der Mittelwert der benötigten Kraft als Indiz für die Verbindungsstärke liegt bei einer Druckerhöhung innerhalb der Stromzeit höher. Dies war zu erwarten, da sich der Haken innerhalb der Stromflussphase auf einer höheren Temperatur befindet und somit eine Druckerhöhung in Bezug auf die Verbindungsbildung größere Vorteile bringt (vgl. Kapitel 2.4). Das Hakenmaterial ist durch die höhere Temperatur weicher und dies folgert ein besseres Annähern von Haken an Lamelle unter erhöhtem Druck.



(a) Druckverdopplung innerhalb der Stromzeit



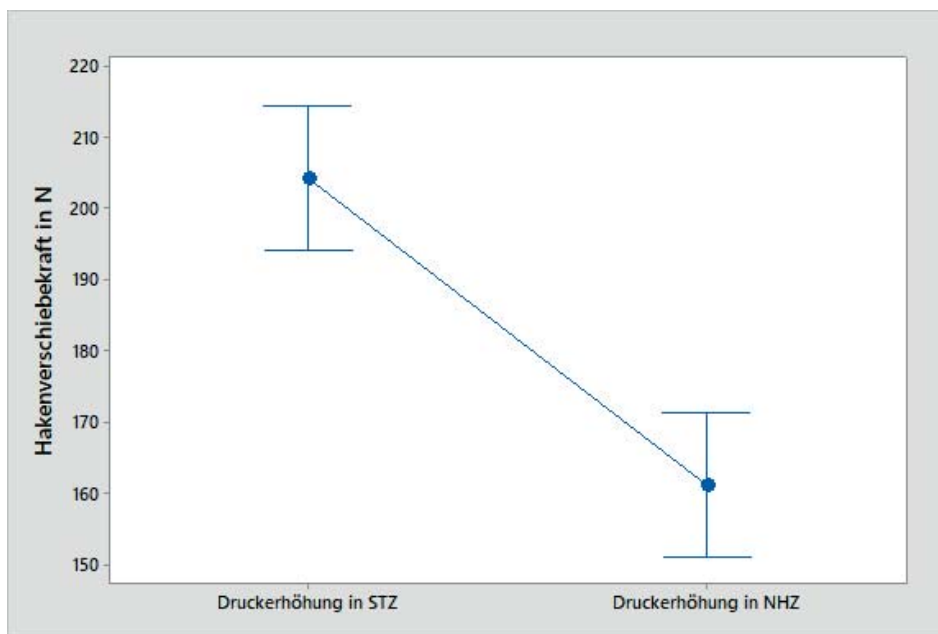
(b) Druckverdopplung innerhalb der Nachhaltezeit

**Abbildung 7.6:** Signalverläufe mit Druckerhöhung zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Erkennbar ist jeweils ein weiteres leichtes Einsinken der Elektrode durch diese Verdopplung des Druckes.



**Tabelle 7.2:** Ergebnisse der Auswertung der Hakenverschiebekräfte in N bei n Messungen

	n	Mittelwert	$\sigma$
STZ	56	204,3	40,1
NHZ	56	161,2	36,2
Serie	19	114,4	13,8



**Abbildung 7.7:** Fehlerbalkendiagramm der Druckerhöhung zu unterschiedlichen Zeitpunkten bei einem Konfidenzintervall von 95 % basierend auf einer ANOVA-Auswertung.

Abbildung 7.7 zeigt das Ergebnis einer ANOVA<sup>1</sup>-Analyse der Software *Minitab*. Aufgetragen ist ein Fehlerbalkendiagramm mit einem Konfidenzintervall<sup>2</sup> von 95 %. Der p-Wert (auch Überschreitungswahrscheinlichkeit) dieser Varianzanalyse hat den Wert 0,000 und liegt somit unterhalb dem Grenzwert von 0,05. Dies widerlegt die Ausgangshypothese, dass alle Mittelwerte gleich sind und belegt die Vermutung, dass eine Druckerhöhung dann sinnvoll ist, wenn der Haken leichter mechanisch verformbar ist. Dies ist während der Stromzeit der Fall, da hier die Temperatur des Hakens am größten ist.

<sup>1</sup>Varianzanalyse, engl.: ANalysis Of VAriance

<sup>2</sup>Ein Konfidenzintervall ist ein statistisch abgeleiteter Wertebereich, welcher wahrscheinlich den Wert eines unbekanntem Parameters der Grundgesamtheit umfasst.

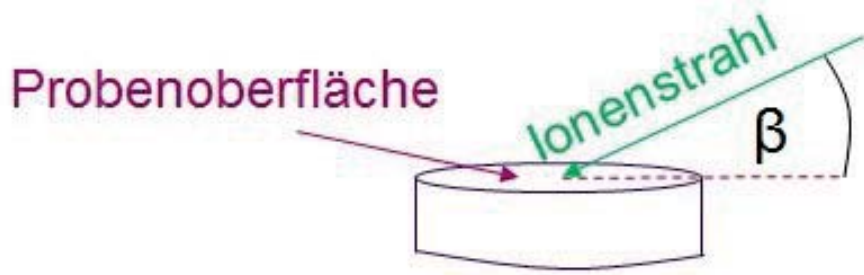
### 7.1.3 Metallografische Analysen der vorherigen Versuchsreihen

Die beiden vorherigen Abschnitte haben sich mit der Analyse von Kraft-Weg-Verläufen beschäftigt. Zusätzliche Informationen über die Qualität einer Verbindung und den Einfluss unterschiedlicher Stromzeiten liefern Mikroskopbilder an metallografischen Schliffen. Anhand der Kornstruktur des Gefüges lassen sich zudem Aussagen über den Wärmeeintrag treffen. Interessant ist neben dem Kontaktbereich von Haken und Lamelle auch der Bereich, in dem sich der Draht befindet. Hieraus werden Informationen über die Einbettung des Drahtes, seine Lage sowie eine auftretende Drahtquetschung generiert. Die folgenden Unterkapitel zeigen Aufnahmen zu unterschiedlichen Stromzeiten sowie zu den beiden unterschiedlichen Zeitpunkten einer möglichen Druckerhöhung. Sämtliche Schliffe wurden abschließend mit einer Siliziumoxid-Politur-Suspension der Körnung  $0,04\ \mu\text{m}$  poliert, so dass kein separater Ätzvorgang notwendig ist, um genügend Informationen aus den Bildern zu erhalten. Nachträglich wurde der metallografische Schliff der Kontaktierung unter Serienbedingungen noch einer weiteren Prozedur unterzogen. Die Oberfläche wird erneut poliert, um die oxidierte Kupferschicht zu entfernen. Zum Einsatz kommt eine Politur aus  $0,05\ \mu\text{m}$  Diamantpartikeln. Anschließend wird die Probe mittels des Ionenpolierers gesäubert, poliert und abschließend einer Kontrastierung unterzogen, wobei die Parameter Tabelle 7.3 und die Darstellung des Einstrahlwinkels  $\beta$  Abbildung 7.8 entnommen werden können. Nach diesen Bearbeitungsschritten wurde die Probe noch für 2 s chemisch geätzt in Eisen(III)-chlorid ( $\text{FeCl}_3$ ) und mit deionisiertem Wasser ab gespült.

Reines Kupfer besitzt eine Schmelztemperatur  $T_S$  von  $1083\ ^\circ\text{C}$ . Das Verhältnis  $\frac{T_R}{T_S}$  von Rekristallisationstemperatur  $T_R$  und Schmelztemperatur  $T_S$  ist bei Metallen nahezu konstant zwischen 0,3 und 0,4. Es ergibt sich eine Rekristallisationstemperatur von etwa  $200\ ^\circ\text{C}$  [Roo14]. Dies bestätigen die durchgeführten Härtemessungen, welche in diesem Kapitel ebenfalls

**Tabelle 7.3:** Parameter des Ionenpolierers

	Spannung	$\beta$	Dauer
Säuberung	4 kV	$10,5^\circ$	10 min
Politur	6 kV	$3^\circ$	30 min
Kontrastierung	3 kV	$27^\circ$	60 min



**Abbildung 7.8:** Erläuterung des Einfallswinkels beim Ionenpolierers.

gezeigt werden. Im vorliegenden Prozess findet eine Rekristallisation mit Kornwachstum statt. Schliffbilder durch den Querschnitt von Haken und Lamelle nach dem Prozess zeigen allesamt eine Kornvergrößerung im Bereich großer Temperatureinwirkung.

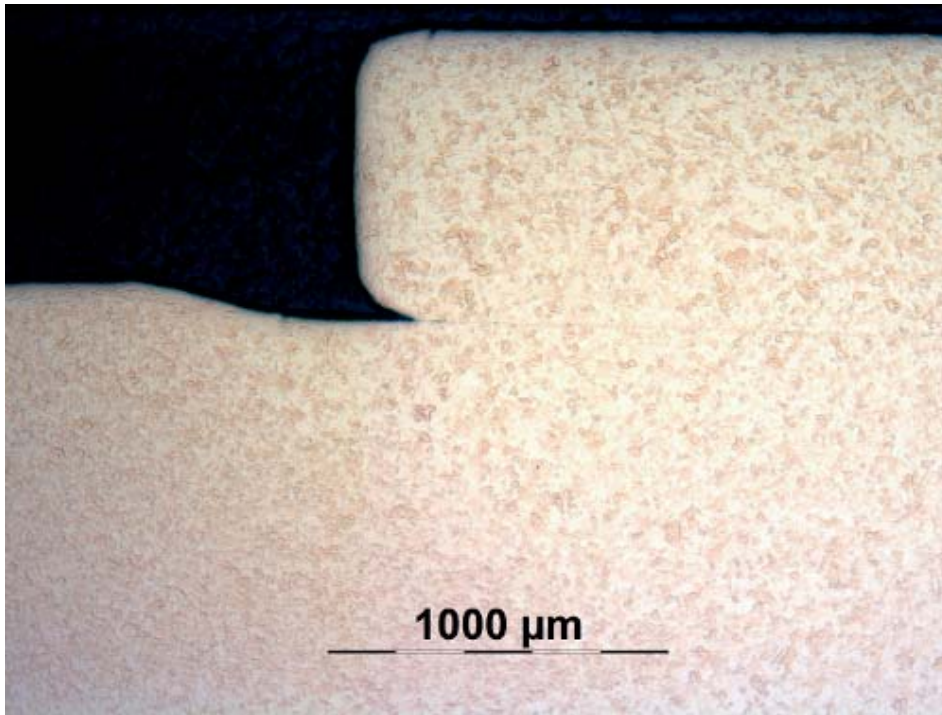
#### **Serienzustand - Stromzeit 180 ms:**

Zu Beginn zeigt Abbildung 7.9 je ein Bild der Verbindung sowie der Draht-einbettung unter Serienbedingung mit einer Stromzeit von 180 ms. Die Stoffschlüssigkeit der Verbindung ist nicht gegeben, da über die gesamte Länge der Verbindung die Kontaktfläche zwischen Haken und Lamelle erkennbar ist. Es ist somit höchstens eine Fügezone in der Mikroebene vorhanden. Der linke Rand von Abbildung 7.9(a) zeigt den Auflagepunkt der Gegenelektrode. Hier kommt es zu einer deutlich reduzierten Wärmegenerierung, da diese Elektrode mit geringen Übergangswiderstand den Strom und somit die Wärme abführt, was sich an der Kornstruktur niederschlägt.

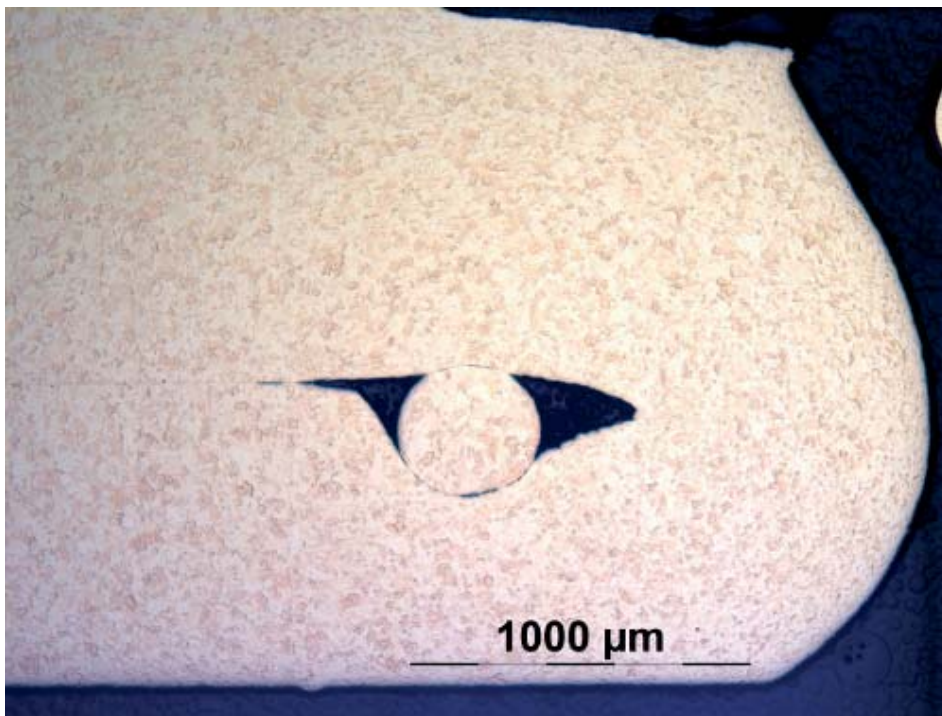
Abbildung 7.10 zeigt den Vergleich des Korngefüges noch deutlicher, da hier noch mit  $\text{FeCl}_3$  chemisch geätzt wurde. Im Bereich des Hakens kommt es zu einem deutlich höheren Wärmeeintrag im Vergleich zum Bereich der Lamelle. Dies ist auch in der Korngröße klar ersichtlich, da im Hakenbereich bedingt durch Rekristallisation ein größeres Korn vorliegt.

#### **Stromzeit 90 ms:**

Abbildung 7.11 stellt identische Aufnahmen dar. Das auffallendste Merkmal hierbei ist, dass keinerlei Kontakt zwischen Haken und Lamelle stattfindet. Diese Tatsache erklärt das Zustandekommen des Weg-Kraft-Verlaufes von Abbildung 7.3(a). Es kommt zu einem reinen Verschieben des Hakens, da keine Kraft zum Lösen der Verbindung aufgebracht werden muss. Prozessphase III (Kapitel 6.1) endet mit dem Tiefpunkt des Widerstandsverlaufes, was dem Ende der mechanischen Umformung entspricht. Nach 90 ms ist diese Umformung noch nicht lange genug beendet,



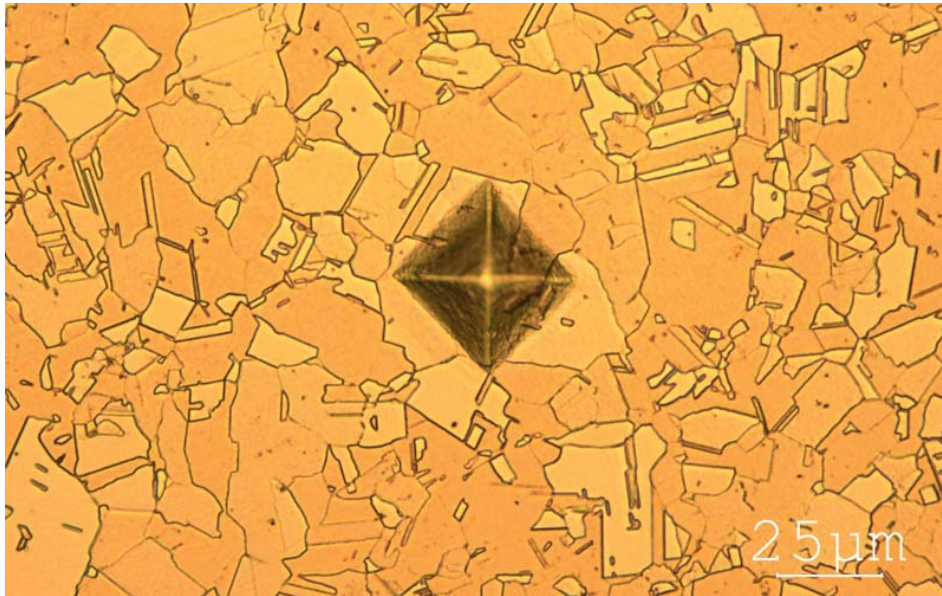
(a) Verbindungsstelle zwischen Haken (oben) und Lamelle (unten) im Bereich des Hakenendes.



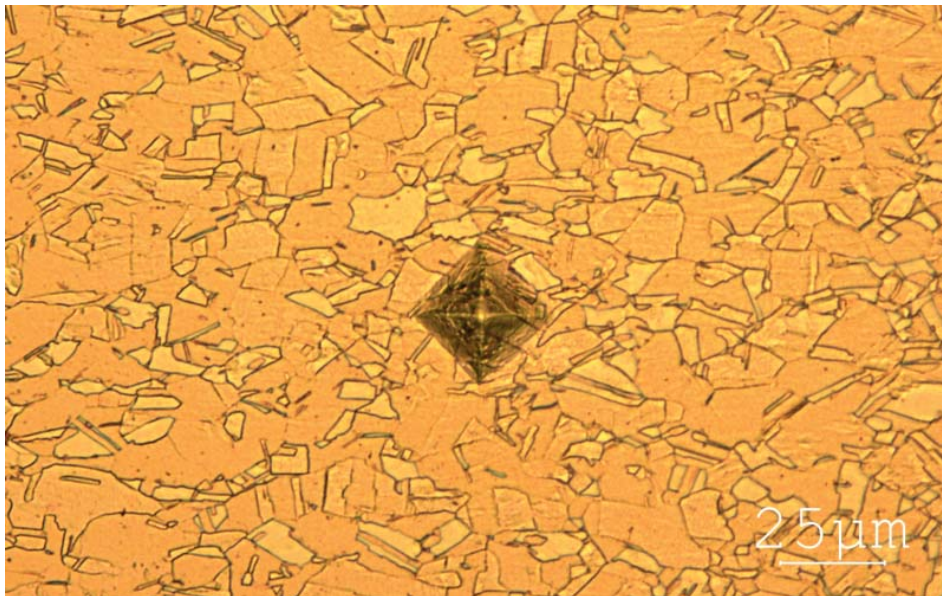
(b) Im Drahtbereich ist ersichtlich, dass der Draht nicht mit den umgebenden Material verbunden ist, sondern ausschließlich mechanisch geklemmt. Während die Lamelle (oben) kaum dem Draht nachgibt, umschließt der Haken (unten) den Draht.

**Abbildung 7.9:** Schliffbilder Serienzustand (Stromzeit 180 ms).





(a) Korngefüge im Bereich des Hakens (hoher Wärmeeintrag).



(b) Korngefüge im Bereich der Lamelle (sehr geringer Wärmeeintrag).

**Abbildung 7.10:** Schlibfbilder Serienzustand (Stromzeit 180 ms) nach chemischem Ätzen mit  $\text{FeCl}_3$ . Es ist zu erkennen, dass im Bereich des Hakens grobkörnigeres Gefüge vorliegt, was durch die Wärmebringung und Rekristallisation zu erklären ist. Der Eindruck in der Bildmitte ist durch die Härtemessung verursacht.

so dass keine Verbindung aufgebaut werden kann. Die Ausbildung der makroskopischen Kontaktfläche ist noch nicht ausreichend fortgeschritten. Relevant hierfür sind die Parameter Temperatur und Zeit. Es wird ein bestimmter Energieeintrag in die Verbindungsstelle benötigt, damit eine Verbindung ausgebildet wird und dieser Energieeintrag ist nach der hier angewandten Stromzeit nicht gegeben.

**Stromzeit 120 ms:**

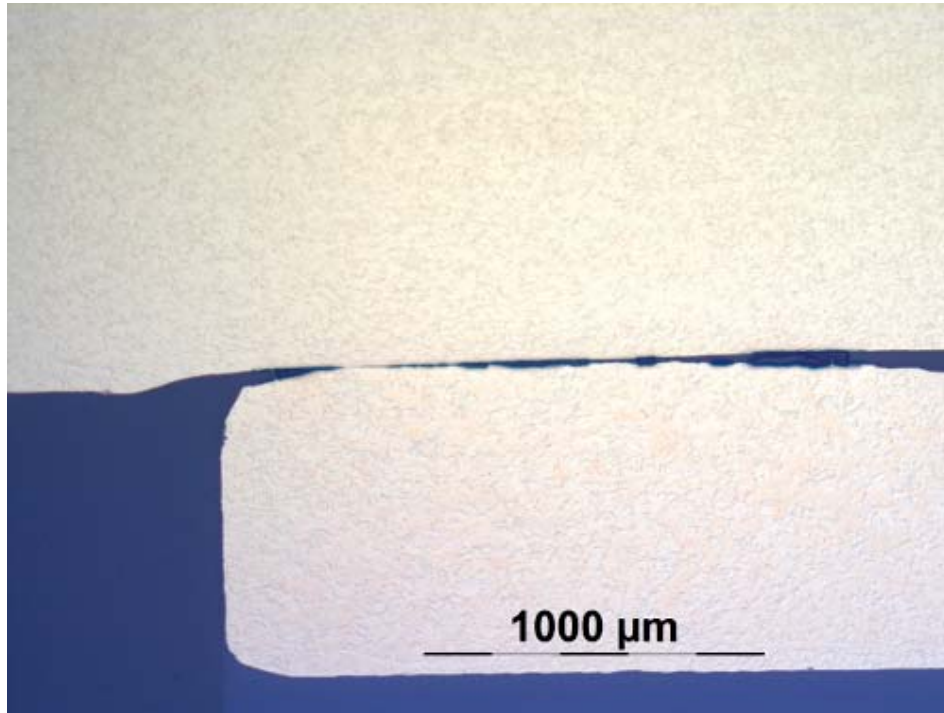
In Abbildung 7.12 ist der Kontakt von Haken und Lamelle weiterhin fehlend, so dass auch hier keine Verbindung zustande kommt. Verglichen mit Abbildung 7.3(b) kann es bereits hier vereinzelt zu schwachen Verbindungsbildungen kommen, insgesamt ist die Zeit jedoch nicht ausreichend.

**Stromzeit 210 ms:**

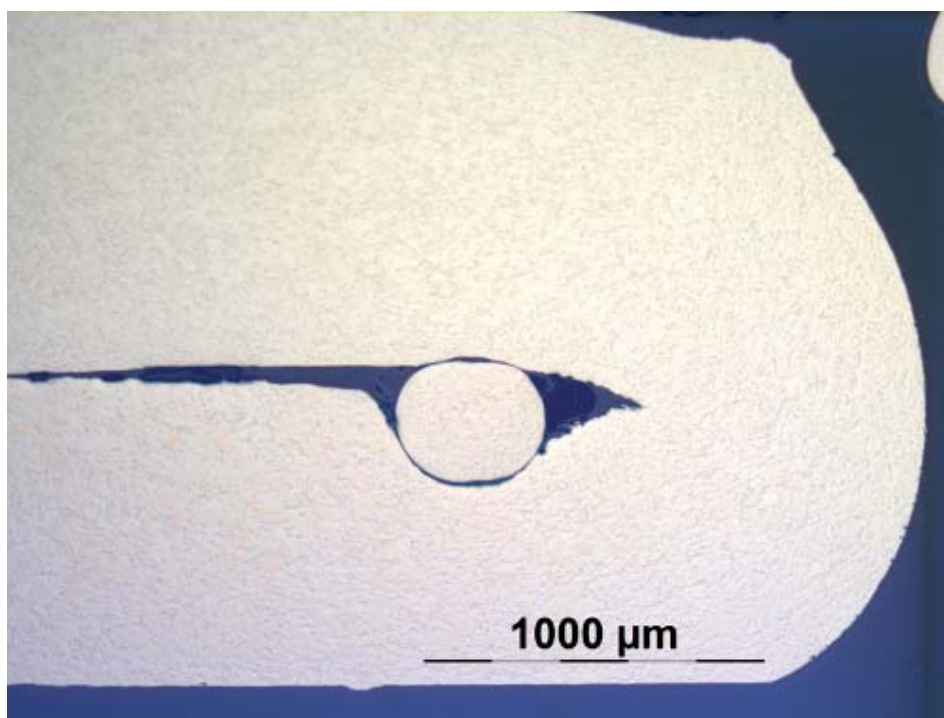
Im Vergleich zu den vorherigen Abbildungen ist in Abbildung 7.13 erstmals eine klare Drahtquetschung erkennbar. Das ist in der Serienfertigung unerwünscht. Weiterhin ist die Verbindungsstelle vergleichbar mit der bei 180 ms, so dass die längere Zeit des Stromflusses keinen Mehrgewinn bringt. Gegenteilig bewirkt die längere Stromphase neben der Quetschung des Wickeldrahtes eine längere Gesamtprozesszeit, was sich in der Taktzeit negativ niederschlägt. Geringe Taktzeit und hohe Qualität sind für jeden Prozess von großer Bedeutung. Die in der Serienfertigung eingesetzte Dauer der Bestromung von 180 ms ist daher im günstigen Bereich.

**Druckerhöhung innerhalb der Nachhaltezeit und der Stromzeit:**

Abschließend zeigen Abbildung 7.14 und Abbildung 7.15, wie sich eine Druckerhöhung und somit eine Änderung der Kraft, die auf den Haken wirkt, auf die Verbindung auswirkt. Beide Abbildungen zeigen einen ausgeprägten Kontakt zwischen Haken und Lamelle und somit eine ausreichende Verbindung. Dies war nach Abbildung 7.7 zu erwarten und entspricht den dortigen Messergebnissen. Wird der Druck des Pneumatikzylinders innerhalb der STZ erhöht, so sind Haken und Lamelle auf einem höheren Temperaturniveau im Vergleich zur NHZ. Es ist hierdurch eine leicht größere Kontaktfläche auszumachen als bei den restlichen Aufnahmen, da ein erhöhter Druck in Kombination mit weicherem Material eine bessere Anbindung ermöglicht.

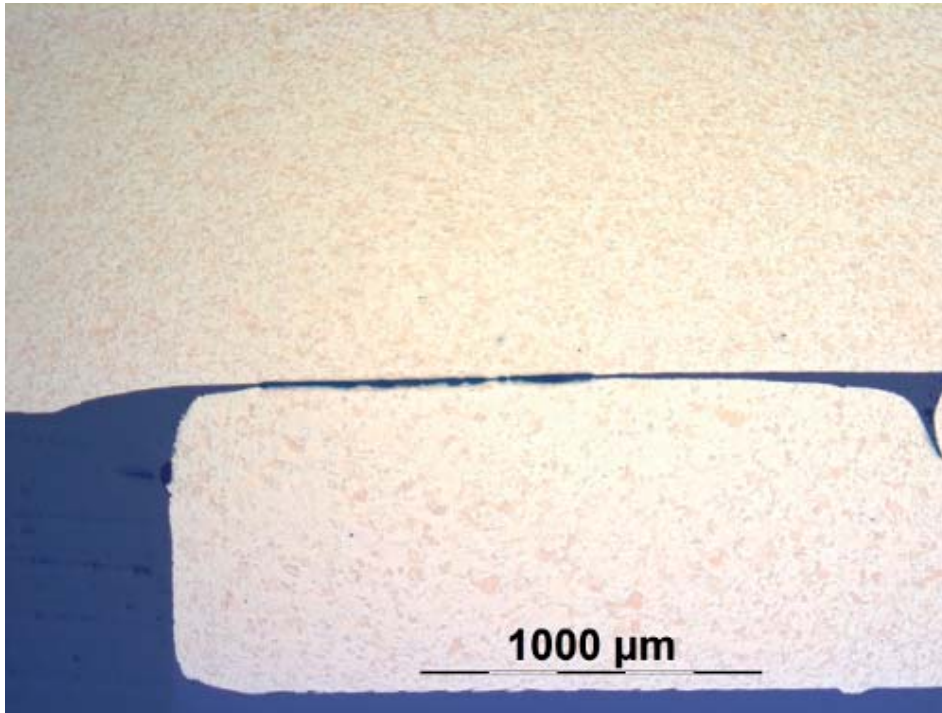


(a) Verbindungsstelle zwischen Haken (unten) und Lamelle (oben). Zu diesem Zeitpunkt findet noch kein Kontakt zwischen den Fügepartnern statt.

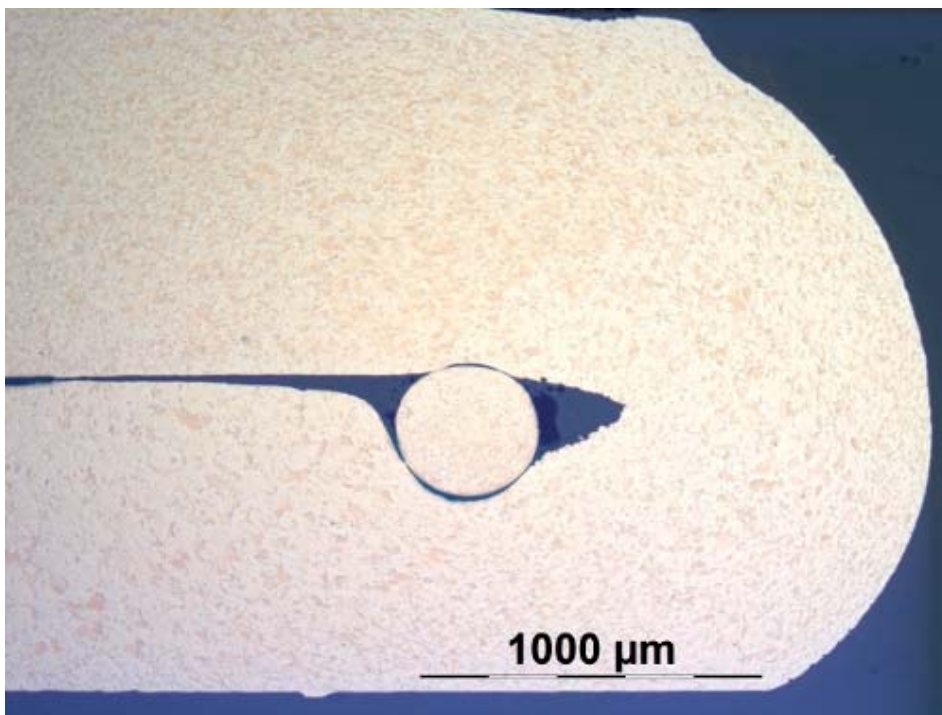


(b) Der Draht ist nicht verbunden mit den umgebenden Material.

**Abbildung 7.11:** Schliffbilder Stromzeit 90 ms.

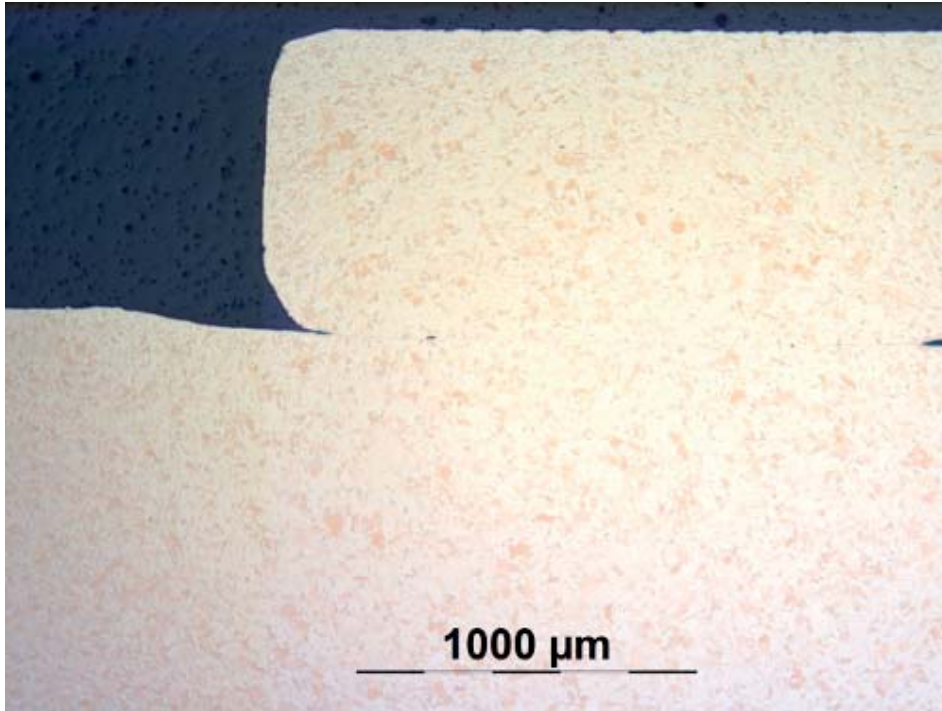


(a) Verbindungsstelle zwischen Haken (unten) und Lamelle (oben). Bei dieser Zeitdauer findet noch kein Kontakt zwischen den Fügepartnern statt.

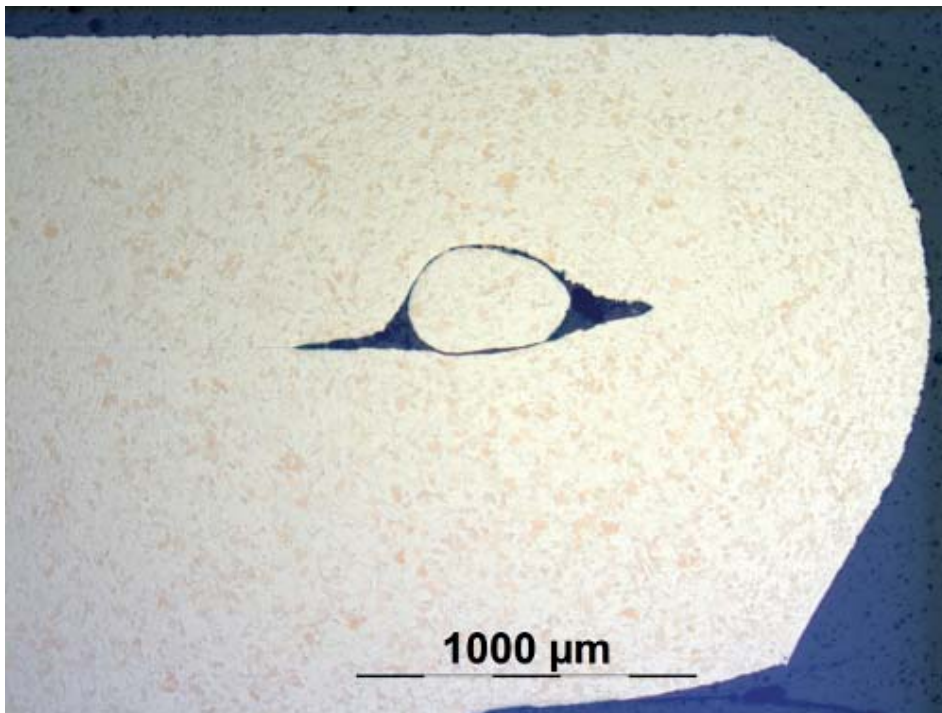


(b) Der Draht ist nicht verbunden mit den umgebenden Material.

**Abbildung 7.12:** Schlibfbilder Stromzeit 120 ms.

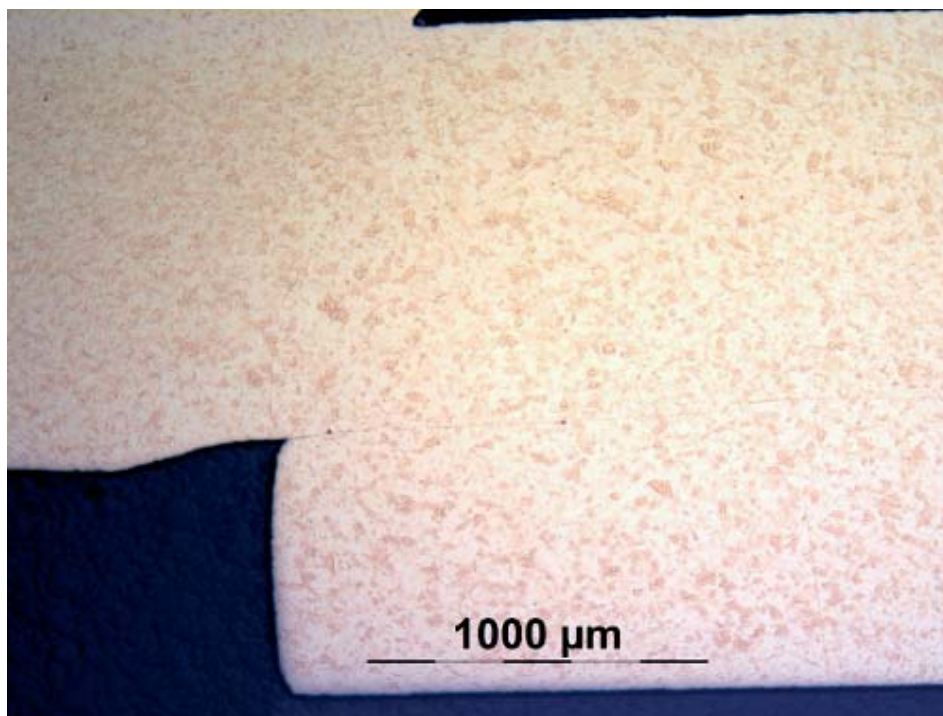


(a) Verbindungsstelle zwischen Haken (oben) und Lamelle (unten). Die Verbindung ist ausreichend ausgeprägt, wobei auch hier weiterhin eine „Kontaktlinie“ erkennbar ist.

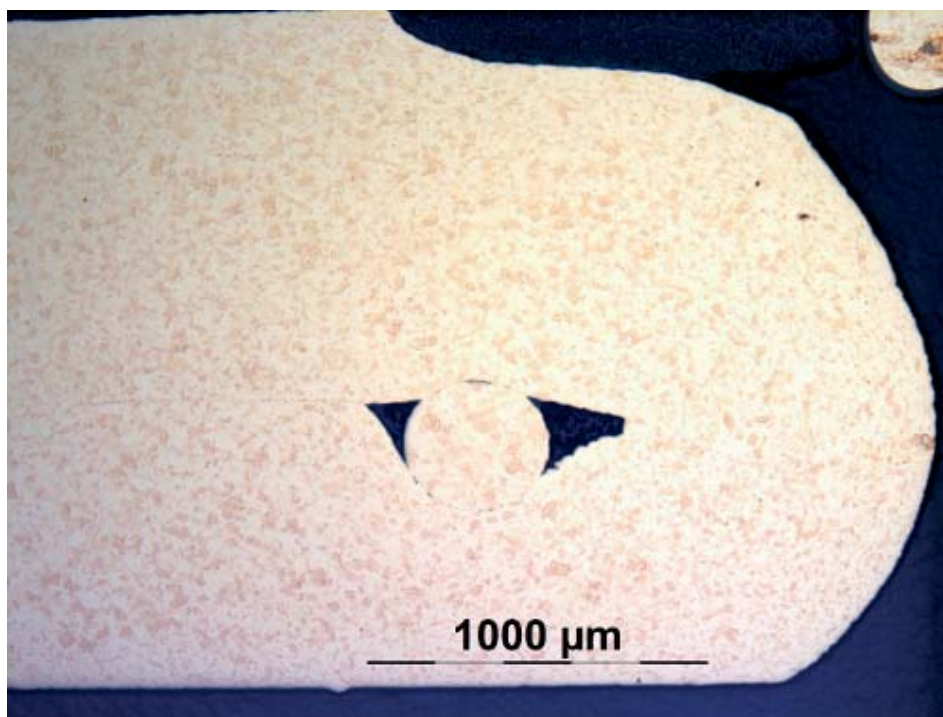


(b) Im Vergleich zu den restlichen Abbildungen kommt es hier zu einer klar ersichtlichen Drahtquetschung.

**Abbildung 7.13:** Schliffbilder Stromzeit 210 ms.

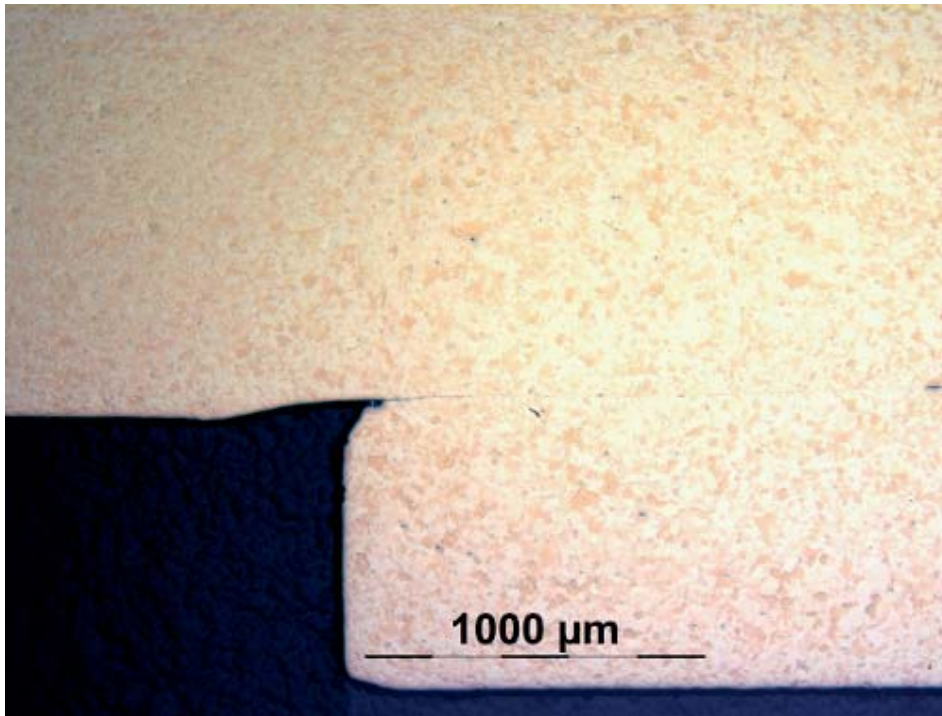


(a) Verbindungsstelle zwischen Haken (unten) und Lamelle (oben). Die Verbindung ist ausreichend ausgeprägt, wobei auch hier weiterhin eine „Kontaktlinie“ erkennbar ist.

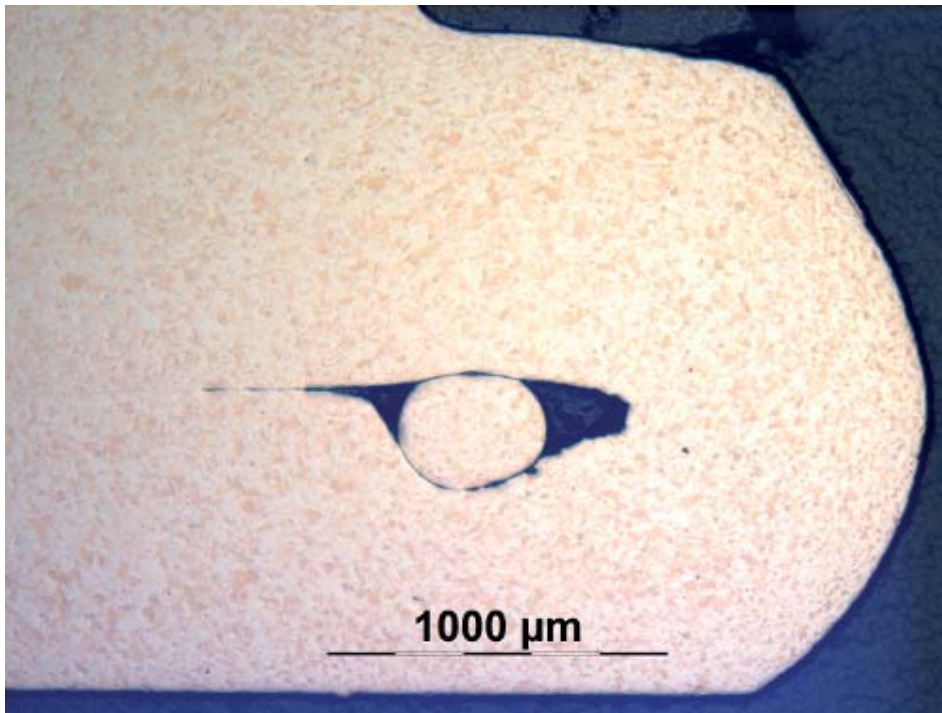


(b) Der Draht ist nicht gequetscht und mechanisch sehr stark geklemmt ohne fest mit dem umgebenden Material verbunden zu sein.

**Abbildung 7.14:** Schlifffbilder Druckerhöhung innerhalb der Stromzeit. Die Stromzeit beträgt 180 ms.



(a) Verbindungsstelle zwischen Haken (unten) und Lamelle (oben). Die Verbindung ist ausreichend ausgeprägt, wobei auch hier weiterhin eine „Kontaktlinie“ erkennbar ist.



(b) Eine leichte Drahtquetschung ist erkennbar.

**Abbildung 7.15:** Schliffbilder Druckerhöhung innerhalb der Nachhaltezeit. Die Stromzeit beträgt 180 ms.

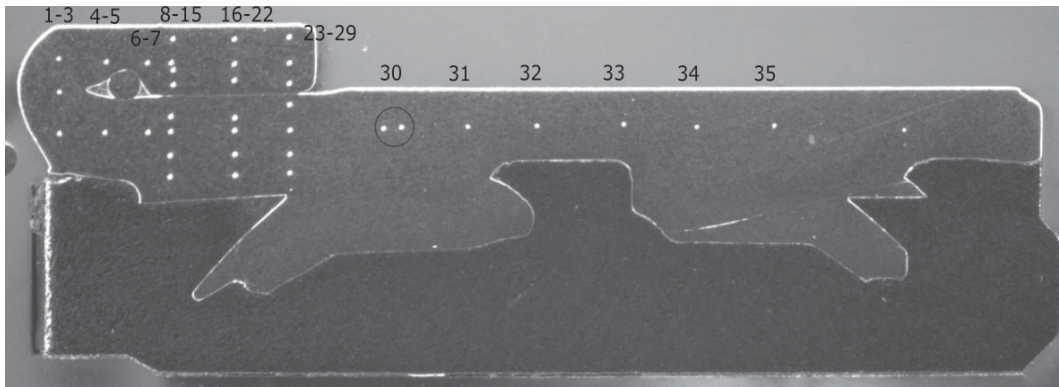
**Tabelle 7.4:** Ergebnisse der Härtemessung am Kommutator nach der Kontaktierung unter Serienparametern

Eindruckstelle	HV $\pm$ 3 HV	Eindruckstelle	HV $\pm$ 3 HV
1	88	19	72
2	77	20	71
3	73	21	67
4	84	22	68
5	69	23	80
6	90	24	75
7	68	25	81
8	80	26	80
9	83	27	77
10	80	28	80
11	81	29	128
12	73	30	128
13	73	31	140
14	67	32	143
15	70	33	144
16	83	34	147
17	83	35	145
18	82		

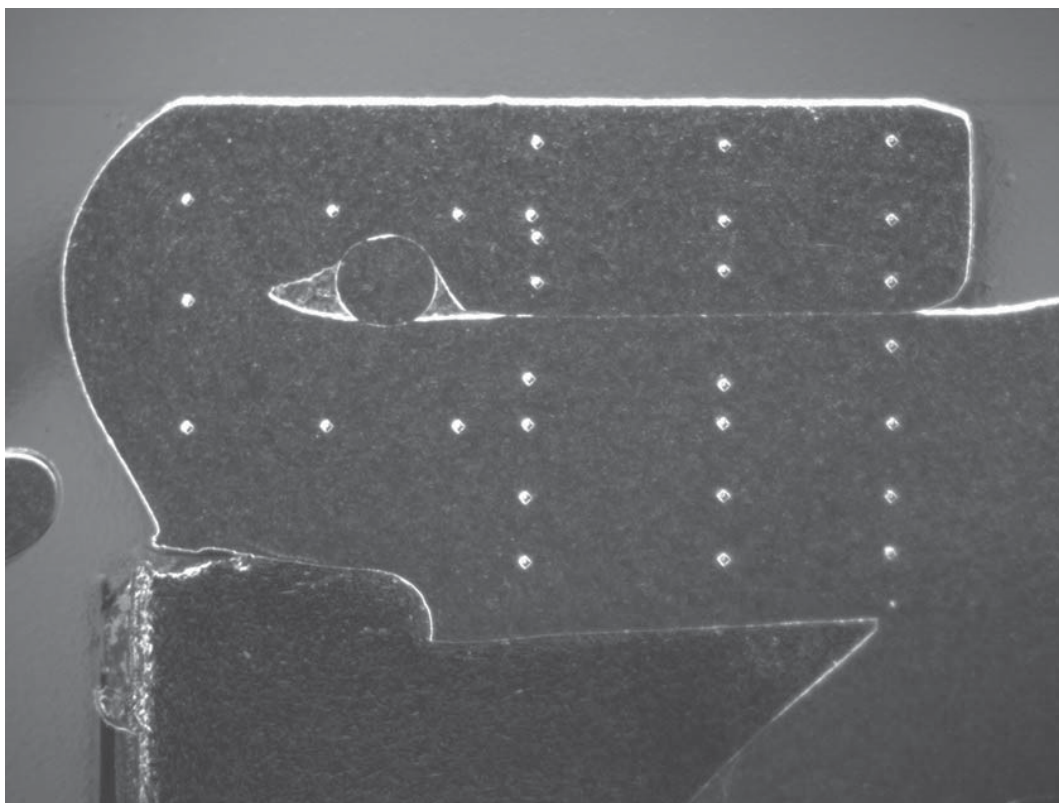
#### 7.1.4 Härtemessungen der Kontaktierung unter Serienbedingungen

An dem metallografischen Schliff der Kontaktierung mit Serienparametern wurden Härtemessungen durchgeführt. Abbildung 7.16 zeigt die Messstellen der Härterüfung nach Vickers (HV). Die Last beträgt 1 N bei einer Senk- und Eindrückgeschwindigkeit von 10  $\mu\text{m/s}$  und einer Haltezeit von 1 s. Die Messwerte der Messstellen sind in Tabelle 7.4 aufgezeigt, wobei die beiden umkreisten Punkte in Abbildung 7.16(a) einer Messung entsprechen (Nummer 30) und der Messpunkt ganz rechts nicht mit abgebildet wird. Es ist zu erkennen, dass die Messpunkte auf dem Haken eine leicht höhere Härte aufweisen als diejenigen, die sich auf der Lamelle auf identischer Vertikale befinden. Die Härtewerte bei zunehmender Entfernung vom Haken und somit zur Wärmeeinflusszone steigen bis auf den Grundwert des Materials von etwa 144 HV an. Diese Grundhärte haben theoretisch auch der Haken sowie die Lamelle im Bereich des Hakens.





(a) Darstellung des gesamten Messbereichs



(b) vergrößerte Darstellung des Hakens

**Abbildung 7.16:** Härtemessungen am metallografischen Schliffbild der Kontaktierung mit Serienparametern.

Durch Kaltumformung des Hakens im Herstellungsprozess steigt dessen Härte weiter an [Kön13]. Bedingt durch den Hot-Staking-Prozess und den Einfluss der Temperatur, rekristallisiert das Material in der Wärmeinflusszone und die Härte nimmt stark ab. Dass die Härtewerte auf dem Haken nach dem Prozess größer sind als auf der Lamelle bestätigt, dass der Haken zuvor kaltverformt wurde.

### 7.1.5 Einfluss der Oberflächenstruktur

Es ist bisher nicht hinreichend bekannt, inwiefern die Oberflächenbeschaffenheit von Kommutatoren den Hot-Staking-Prozess beeinflusst. Eine Untersuchung dieses Einflusses wird anhand von präparierten Kommutatoren durchgeführt. Die verschiedenen Arten der Präparation werden im Folgenden erläutert. Nach der Präparation werden die Rauheiten der Oberflächen sowohl in Längs- als auch in Querrichtung gemessen, der Widerstandsverlauf während des Hot-Staking-Prozesses aufgezeichnet sowie die Hakenverschiebekräfte nach der Kontaktierung bestimmt und ausgewertet. Die somit erzielten Ergebnisse erlauben Schlussfolgerungen auf den zugrunde liegenden Verbindungsmechanismus zwischen der Lamelle und dem Haken (Kapitel 7.4).

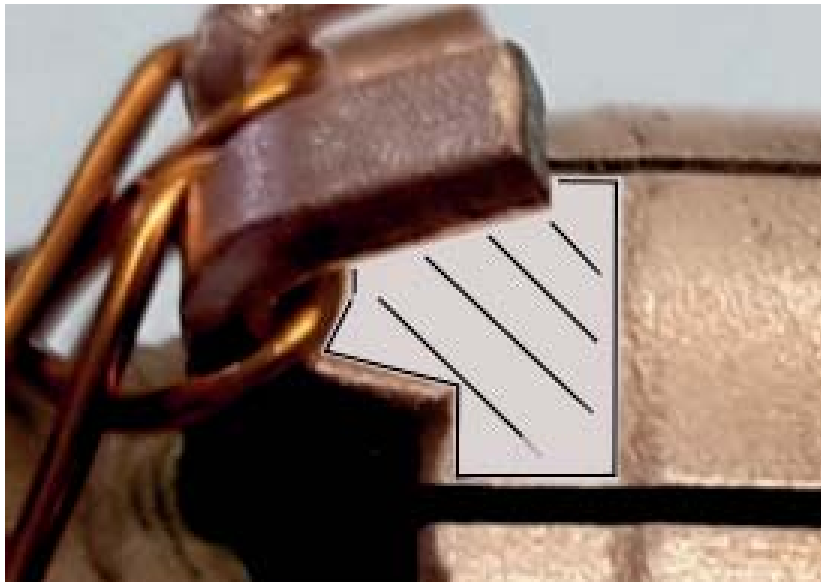
Die Kommutatoren müssen bearbeitet werden bevor der Haken in seine Position gebogen wird, da ansonsten die Zugänglichkeit zur Aufliegefläche nicht gegeben ist. Die Oberflächen der Lamellen wurden im Bereich der Auflagefläche (Abbildung 7.17) der Haken

- poliert,
- gedreht,
- mit Siliziumkarbid (SiC) geschliffen,
- mit Korund ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) geschliffen,
- gerändelt und
- gebürstet,

wobei letzteres nicht gezielt geändert wurde, sondern dem Lieferzustand entspricht. Dieser ist lediglich definiert über die Anforderungen an Mittenrauwert ( $R_a$ ) und Rautiefe ( $R_z$ ) in Längsrichtung, wobei gilt:

$$R_a > 1,5 \mu\text{m}$$

$$R_z > 10 \mu\text{m}$$



**Abbildung 7.17:** Die in der Abbildung markierte Fläche stellt den Bereich dar, in dem die Oberflächen der Kommutatoren bearbeitet sind. An gleicher Stelle findet auch die Messung der Rauheiten statt.

Im Zuge der Messung der Oberflächenrauheiten werden die charakteristischen Messgrößen  $R_a$  und  $R_z$  nach [Deu10] ausgegeben. Der  $R_a$ -Wert gibt die mittlere Abweichung des gemessenen Profils von dessen mittlerer Linie an,  $R_z$  den Mittelwert der Einzelrautiefen (Abstand zwischen Maximal- und Minimalwert jedes Messabschnittes) von fünf aufeinander folgenden Einzelmessstrecken im Rauheitsprofil. Insgesamt werden die Rauheiten an jeweils 40 Haken gemessen und anschließend gemittelt. Die Messung der Rauheiten findet ebenfalls an der in Abbildung 7.17 markierten Fläche statt. Die gemittelten Messwerte der Rauheiten sowie deren  $\sigma$  in Längs- und in Querrichtung sind Tabelle 7.5 und Tabelle 7.6 zu entnehmen.

Die Rauheiten quer zur Lamelle der strukturverfeinernden Maßnahmen Polieren, Schleifen und Drehen sind nahezu identisch. Erst in Längsrichtung treten Unterschiede auf, besonders beim Prozess des Drehens. Ursache hierfür ist die Vorschubrichtung des Drehmeißels in Längsrichtung der Lamelle. Es entsteht das typische Drehbild, welches eine regelmäßige Wellenstruktur aufweist. Im Gegensatz hierzu weist die unbearbeitete Oberfläche wesentlich höhere  $R_a$ -Werte auf. Bei dem Materialbearbeitungsverfahren des Rändelns handelt es sich um das Einprägen von Mustern in das Werkstück. Somit erklärt sich der deutliche Unterschied in den Rauheitswerten im Vergleich zu den restlichen Verfahren.

**Tabelle 7.5:** Ergebnisse der Rauheitsmessungen der unterschiedlichen Oberflächenstrukturen:  $R_a$ -Werte  $\pm$  Standardabweichungen  $\sigma$ 

Struktur	$R_a \pm \sigma$ in $\mu\text{m}$	
	längs	quer
poliert	$0,141 \pm 0,027$	$0,685 \pm 0,016$
gedreht	$0,869 \pm 0,028$	$0,686 \pm 0,010$
geschliffen SiC	$0,229 \pm 0,028$	$0,686 \pm 0,009$
geschliffen $\text{Al}_2\text{O}_3$	$0,301 \pm 0,031$	$0,699 \pm 0,016$
gerändelt	$19,169 \pm 3,212$	$31,677 \pm 5,272$
gebürstet	$1,611 \pm 0,346$	$2,527 \pm 0,371$

**Tabelle 7.6:** Ergebnisse der Rauheitsmessungen der unterschiedlichen Oberflächenstrukturen:  $R_z$ -Werte  $\pm$  Standardabweichungen  $\sigma$ 

Struktur	$R_z \pm \sigma$ in $\mu\text{m}$	
	längs	quer
poliert	$1,447 \pm 0,334$	$4,392 \pm 0,226$
gedreht	$4,475 \pm 0,234$	$4,371 \pm 0,137$
geschliffen SiC	$1,753 \pm 0,190$	$4,370 \pm 0,126$
geschliffen $\text{Al}_2\text{O}_3$	$2,412 \pm 0,209$	$4,619 \pm 0,224$
gerändelt	$87,250 \pm 11,940$	$142,330 \pm 18,860$
gebürstet	$10,657 \pm 2,593$	$16,640 \pm 2,465$

Zur Vermeidung unbeabsichtigter Einflüsse wie z. B. Oxidschichten oder Verunreinigungen auf den Oberflächen, werden die Kommutatoren vor der weiteren Verarbeitung zu vollständigen Ankern auf der Fertigungslinie mit Schwefelsäure ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) chemisch gereinigt. Schwefelsäure oxidiert hierbei das Kupfer an der Oberfläche und löst die Oxidschicht [Rau04]. Hierdurch ist gewährleistet, dass resultierende Untersuchungsergebnisse ausschließlich auf die erzwungenen Oberflächenstrukturen zurückzuführen sind.

Die präparierten Kommutatoren werden anschließend auf der Serienlinie aufgebaut und folgend die Hakenverschiebekräfte (Kapitel 5.2) gemessen. Die resultierenden Messwerte können Tabelle 7.7 entnommen werden, wobei es sich hier wieder um die Mittelwerte der Messungen handelt. Pro Struktur sind jeweils 40 Messwerte in die Mittelwertbildung ein-



**Tabelle 7.7:** Ergebnisse der gemittelten Messungen der Hakenverschiebekräfte und deren Standardabweichungen der unterschiedlichen Oberflächenstrukturen

Struktur	Hakenverschiebekraft in N
poliert	229,28 ± 29,79
gedreht	209,61 ± 26,25
geschliffen SiC	231,05 ± 17,14
geschliffen Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	210,29 ± 23,46
gerändelt	151,86 ± 19,84
gebürstet	119,28 ± 19,44

gegangen, aus denen zudem die Standardabweichung berechnet wird. Als Messwert wird der Maximalwert im Kraft-Weg-Verlauf verwendet, bei dem die Verbindung aufbricht. Im Rahmen des Aufbaus auf der Serienlinie kommt es zu keinen Einflüssen der Oberflächen auf andere Prozessabläufe neben dem Hot-Staking-Prozess, es kann nicht zwischen Serienkomponenten unterschieden werden. Die Hakenverschiebekräfte der vier strukturverfeinernden Maßnahmen befinden sich auf vergleichbarem Niveau, wohingegen die Hakenverschiebekraft der gerändelten Oberfläche deutlich abfällt. Die gebürstete Oberfläche weist eine noch geringere Kraft auf. Eine möglichst glatte Oberfläche hat einen positiven Effekt auf den Hot-Staking-Prozess in Bezug auf die Verbindungsbildung zwischen der Lamelle und dem Haken, welche für die Festigkeit verantwortlich ist. Auf den Mechanismus der Verbindungsbildung wird in Kapitel 7.4 genauer eingegangen. Eine Ursache dafür, dass die gerändelte Oberfläche einen geringfügig höheren Wert der Hakenverschiebekraft vorweist als die gebürstete Oberfläche, könnte darin liegen, dass die ausgeprägten Spitzen auf der Oberfläche einen erhöhten elektrischen Widerstand aufweisen und es somit punktuell zu höheren Temperaturen kommt. Diese höheren lokalen Temperaturen könnten für lokale Aufschmelzungen sorgen und so eine höhere Hakenverschiebekraft verursachen. Eine Darstellung mit den zugehörigen Fehlerbalken am Beispiel der  $R_a$ -Messung längs zeigt Abbildung 7.18. Zur besseren Erkennbarkeit der einzelnen Werte ist die Abszisse logarithmisch aufgetragen. In dieser Abbildung ist ersichtlich, dass die Hakenverschiebekräfte tendenziell höher sind, je geringer der  $R_a$ -Wert ist. Die deutliche Ausdehnung der Fehlerbalken entlang der Ordinate zeigen, dass eine Unterscheidung der drei Maßnahmen Polieren, Schleifen und Drehen nicht möglich ist.

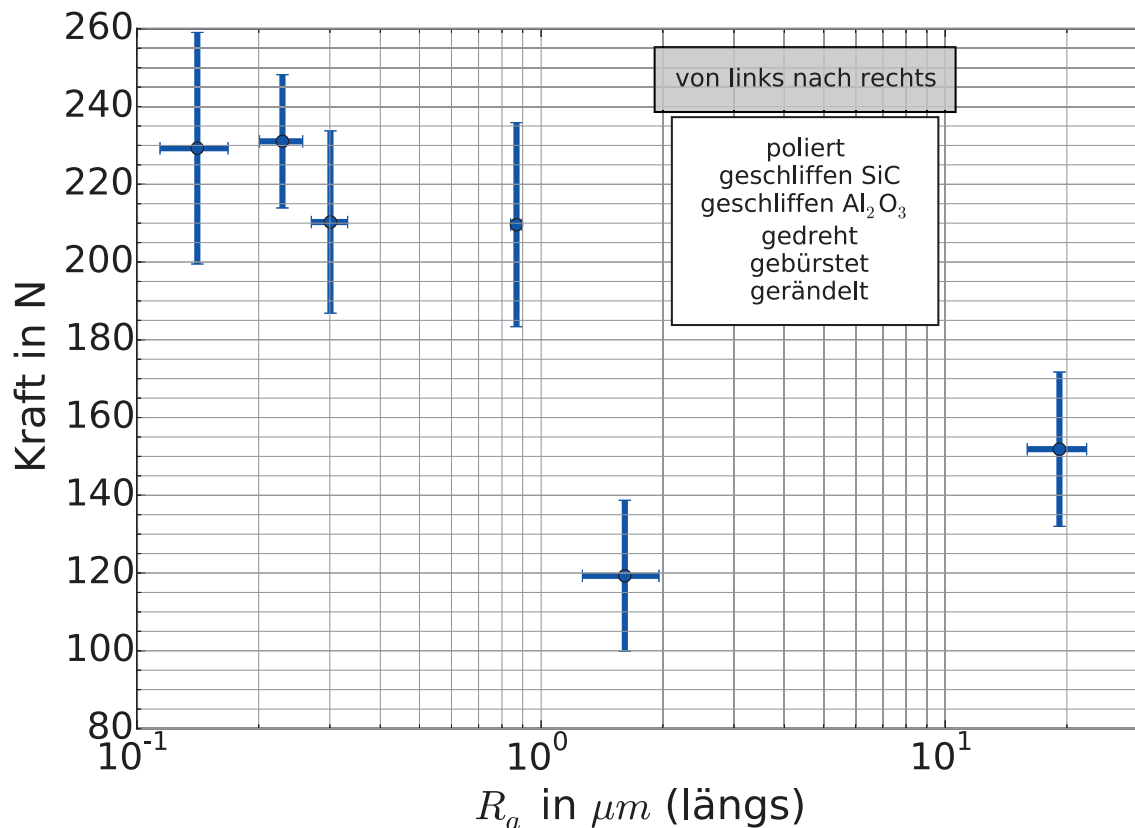


Abbildung 7.18: Hakenverschiebekräfte in Relation zum jeweiligen  $R_a$ -Wert längs inklusive Fehlerbalken.

## 7.2 Zusammenhang zwischen den Parametern Stromstärke und Druck

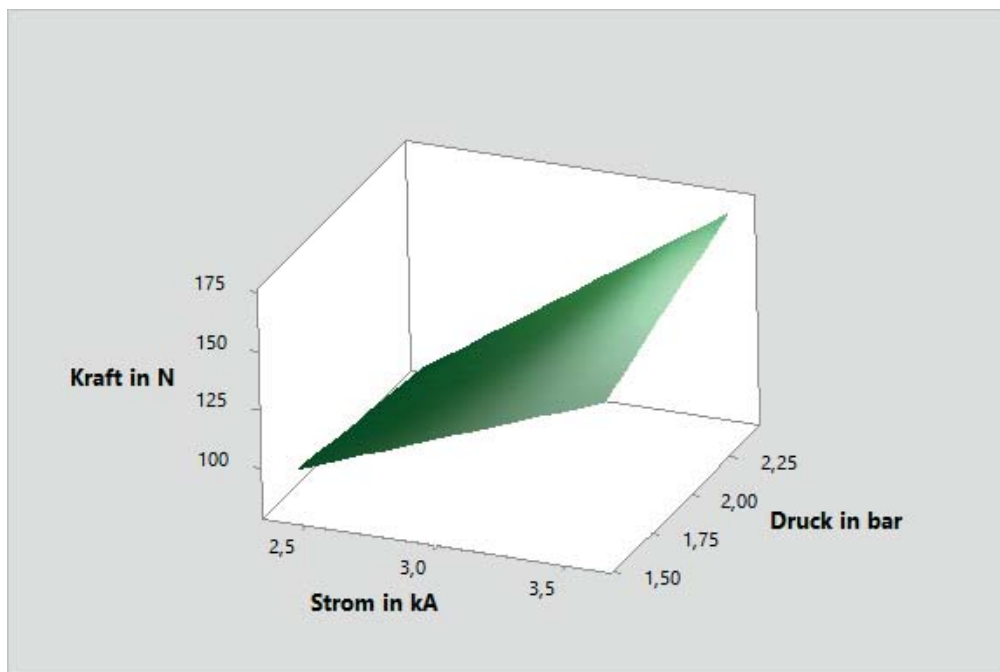
Für den Erhalt eines robusten Prozessablaufs sind zwei wesentliche Parameter verantwortlich: Die angelegte Stromstärke  $I$  und der Druck  $p$ , mit dem die Elektroden den Haken und die Lamelle kontaktieren. Im Fertigungsumfeld kann die Stromstärke üblicherweise im Bereich von  $\pm 20\%$  um einen Grundwert variiert werden, um auf Abweichungen vom Normzustand, wie z. B. geringe Chargenschwankungen des Kommutators, Einfluss nehmen zu können. Grundlage für diese Angabe bilden ausschließlich Erfahrungswerte. Der Druck wird hingegen allgemein nicht angepasst. Damit die Bedeutung der beiden Stellgrößen ersichtlich wird, werden beide im Bereich  $\pm 20\%$ , ausgehend von den Werten  $I = 3 \text{ kA}$  und  $p = 2 \text{ bar}$ , geändert und anschließend die Festigkeit des Hakens auf der Lamelle nach bekanntem Vorgehen gemessen. Eine ANOVA-Auswertung



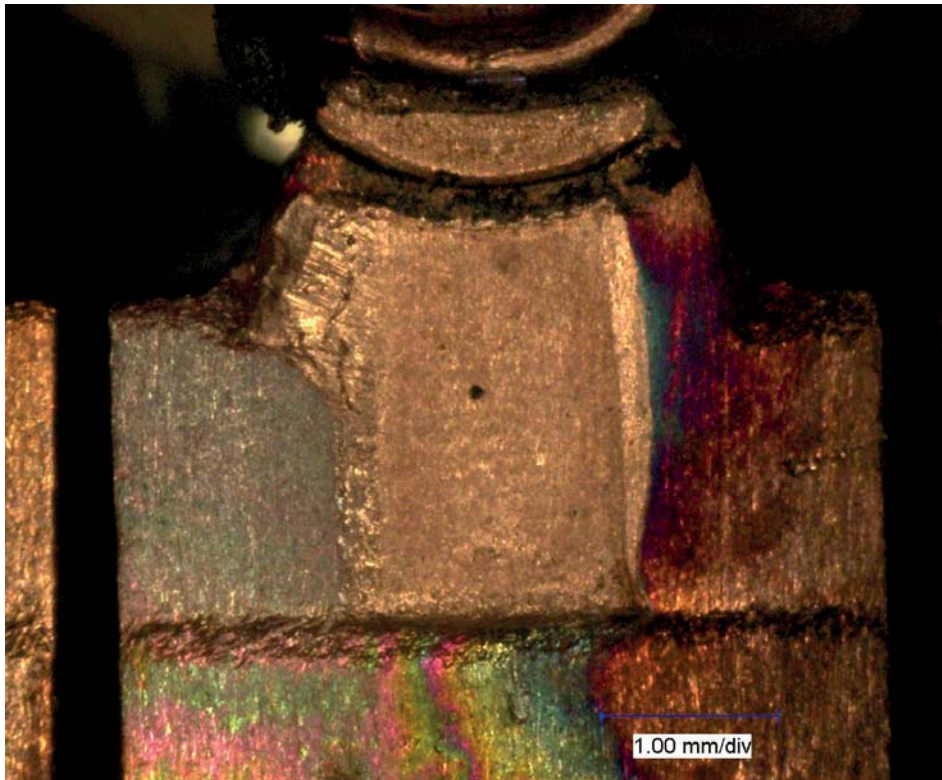
der Messergebnisse des Stichprobenumfangs von jeweils 10 Messpunkten zeigt Abbildung 7.19 anhand eines Wirkungsflächendiagramms. Die Stromstärke hat einen großen Einfluss auf die Hakenverschiebekraft. Sie ist verantwortlich für die Wärmegeneration und somit förderlich für den Verbindungsaufbau (Kapitel 7.4). Ein zu hoher Wärmeeintrag hat jedoch negative Auswirkungen im ersten Prozessabschnitt, wenn der Stromfluss ausschließlich durch den Hakenradius erfolgt. Hierdurch kann die Stromstärke nicht beliebig hoch angesetzt werden. Im Gegensatz hierzu hat der Druck einen wesentlich geringeren Einfluss auf die notwendige Kraft, die Verbindung zu lösen.

Die mikroskopische Analyse der Verbindungsfläche zwischen Haken und Lamelle bestätigt die messtechnisch erfassten Ergebnisse. Ein Indiz für eine gute Verbindung ist der Abdruck, den der Hakens auf der Lamelle hinterlässt, nachdem die Verbindung aufgebrochen wird. Abbildung 7.20 und Abbildung 7.21 zeigen die resultierenden Aufnahmen der Auflagefläche. Die eingestellten Parameter können Tabelle 7.8 entnommen werden.

Es ist direkt ersichtlich, dass jene Kontaktierungen mit erhöhter Stromstärke einen deutlicheren Hakenabdruck generieren im Vergleich zu denen mit einer Verringerung der Stromstärke. Die Abhängigkeit vom Druck ist minimal, was die Erkenntnis aus Abbildung 7.19 bestätigt. Geringe

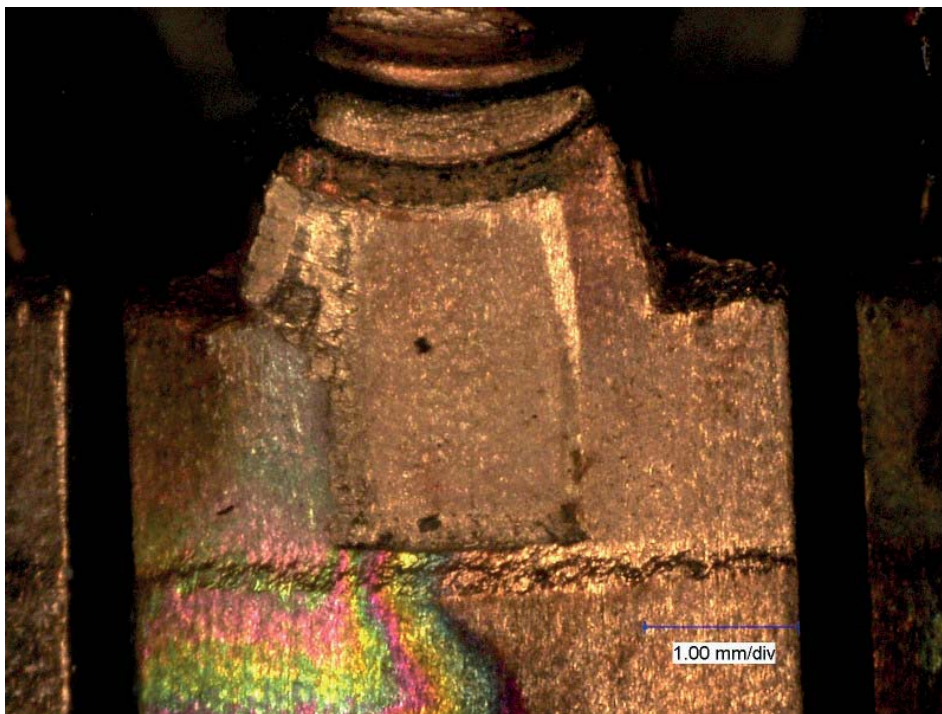


**Abbildung 7.19:** Wirkungsflächendiagramm von Stromstärke und Druck in Bezug auf die Hakenverschiebekraft.



(a) Stromstärke +20 % und Druck +20 %.

Es ist ein deutlicher Hakenabdruck über die gesamte Fläche erkennbar.

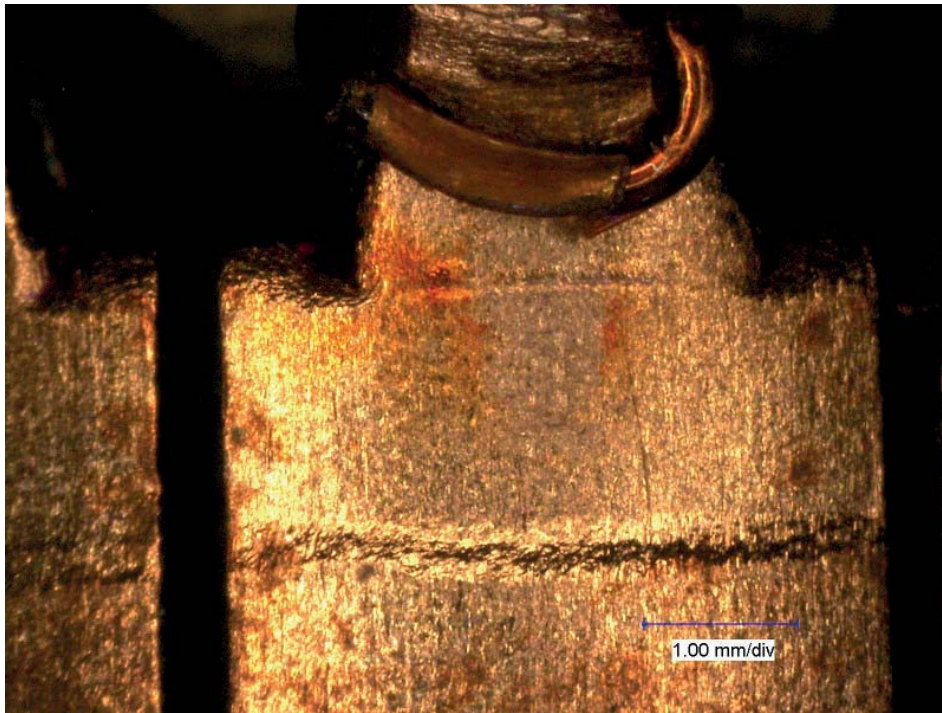


(b) Stromstärke +20 % und Druck -20 %.

Auch hier ist ein deutlicher Hakenabdruck über die gesamte Fläche zu erkennen.

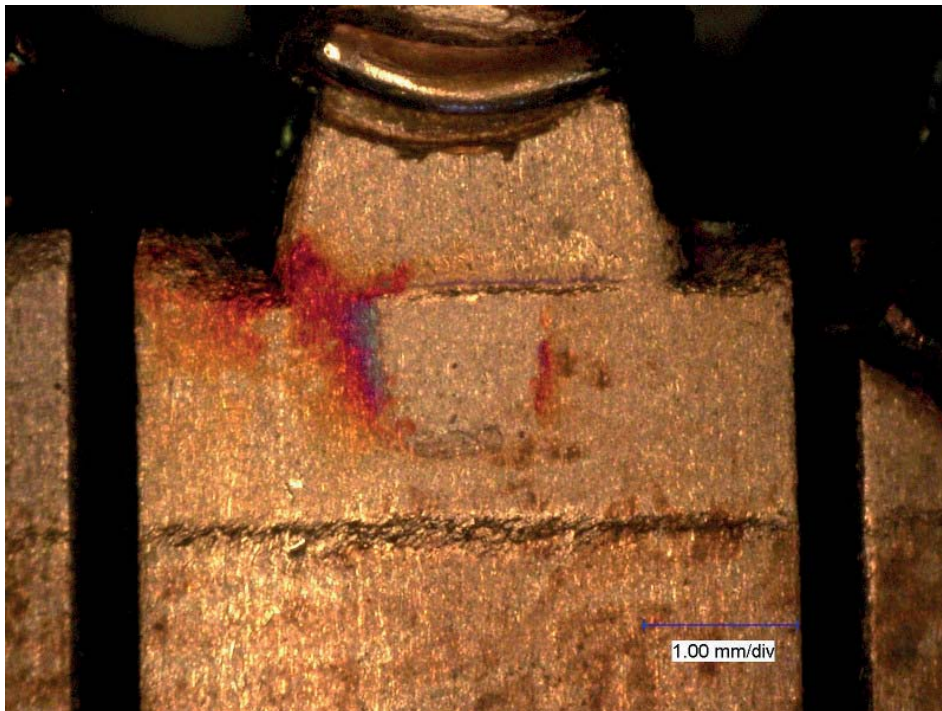
**Abbildung 7.20:** Hakenabdruck bei Parametervariation. Die Stromstärke ist um 20 % erhöht, der Druck um 20 % erhöht (a) und verringert (b).





(a) Stromstärke -20 % und Druck +20 %.

Ein Hakenabdruck ist nicht vorhanden. Die Konturen sind schwach erkennbar, allerdings ist hier keine Verbindung ausgeprägt.



(b) Stromstärke -20 % und Druck -20 %.

Ein sehr schwacher Hakenabdruck ist vorhanden, jedoch nicht über die gesamte Hakenfläche.

**Abbildung 7.21:** Hakenabdruck bei Parametervariation. Die Stromstärke ist um 20 % verringert und der Druck um 20 % erhöht (a) und verringert (b).

**Tabelle 7.8:** Parametereinstellungen der Variation von Stromstärke und Druck (Standard: 3 kA und 2 bar)

Abbildung	Stromstärke in A	Druck in bar	Merkmal
7.25 (a)	3,6	2,4	Hakenabdruck deutlich erkennbar und ausgeprägt
7.25 (b)	3,6	1,6	Hakenabdruck deutlich erkennbar und ausgeprägt
7.26 (a)	2,4	2,4	Hakenabdruck nicht erkennbar
7.26 (b)	2,4	1,6	Hakenabdruck partiell erkennbar

Stromstärke bedeutet geringere Wärmeentwicklung an prozessrelevanten Stellen. Dies hat ein geringeres Erweichen des Hakens zur Folge und somit ein schlechteres Anliegen des Hakens an die Lamelle, was eine Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Bindung darstellt.

## 7.3 Messung der Prozesstemperatur

Der untersuchte Kontaktierprozess beruht auf dem Wärmeeintrag durch elektrischen Strom (vgl. Kapitel 3). Somit ist eine wichtige Prozesskenngröße die generierte Temperatur im Prozessablauf an relevanten Prozessstellen. Diese sind neben dem Hakenradius (Verdampfen der Isolationschicht) auch die Auflagefläche zwischen Haken und Lamelle, damit eine Verbindung ausgebildet werden kann. Im laufenden Serienbetrieb ist eine Temperaturmessung wegen der fehlenden Zugänglichkeit nicht möglich. Die Information über die Temperaturentwicklung ist jedoch eine grundlegende Voraussetzung für ein fundamentales Prozessverständnis. Eine Messung mittels Pyrometer hat sich als nicht zielführend herausgestellt. Die relevanten Messstellen sind aufgrund der Elektrodenanordnung und Hakengeometrie optisch schlecht zugänglich. Weiterhin verfügt der Werkstoff Kupfer über ein zu breites Spektrum der Emissionsgrade, was diese Art der Messung zusätzlich erschwert. Dieser Eigenschaft lässt sich durch Lackieren mit schwarzer Farbe entgegenwirken. Aufgrund der schlechten



optischen Zugänglichkeit ist dies jedoch keine zufriedenstellende Lösung und wird nicht weiter betrachtet.

Eine weitere Möglichkeit der Temperaturmessung sind Thermoelemente. Deren Funktionsweise beruht auf dem Seebeck-Effekt [Mes15]. Die betragsmäßig größte Fehlerquelle beim Messen mit Thermoelementen ist die räumliche Unschärfe des Thermoelementes. Sie wird durch den Durchmesser der Messstelle des Thermoelementes sowie dessen Positioniergenauigkeit bestimmt. Folglich sind kleinere Radien der Thermoelementmessstelle besser geeignet. Die folgende Messung wurde mit Thermoelementen Typ K durchgeführt. Ein Schenkel des Thermoelementes besteht aus dem Material Nickel, der andere Schenkel aus Nickel-Chrom. Es handelt sich um zwei Thermoeinzeldrähte mit Durchmesser 80  $\mu\text{m}$ , die mittels Laserschweißung sowohl miteinander, als auch mit der Lamelle verbunden wurden. Zu sehen ist dieser Messaufbau in Abbildung 5.5.

Die einzelnen Schenkel des so gebildeten Thermoelements werden mit dem, in Kapitel 6 aufgezeigten Messaufbau verbunden. Dies ermöglicht eine zeitsynchrone Temperaturmessung parallel zur Messung anderer Prozessparameter. Zwischen den auftretenden Thermospannungen eines Thermoelementes Typ K und der vorherrschenden Temperatur besteht ein linearer Zusammenhang, so dass diese Umrechnung nach der Messung durchgeführt werden kann. Der aus der Messung resultierende Temperaturverlauf ist in Abbildung 7.22 dargestellt. Es wurden mehrere Messungen durchgeführt, die in Verlauf und Temperaturwerten übereinstimmen und somit nicht weiter aufgezeigt werden.

Bereits vor Einsetzen des Stromflusses kommt es zu starkem Rauschen des Thermospannungssignals. Ab etwa 200 ms setzt das Rauschen mit dem Anfahren der Elektrode an den Haken ein. Dieses Rauschsignal endet zudem bei rund 1450 ms mit dem Absetzen der Elektrode vom Haken.

Mit dem Zeitpunkt des einsetzenden Stromflusses steigt die Temperatur deutlich an (roter Kurvenverlauf) und erreicht einen Maximalwert von über 1100 °C. Ursache hierfür sind weitestgehend Induktionsvorgänge aufgrund der starken zeitlichen Änderung des Stroms. Nachdem die Hakenspitze die Lamelle berührt und sich der Haken vollständig mechanisch umformt, erfolgt der Stromfluss nahezu ausschließlich über diesen Nebenschluss. Die Temperatur sinkt ab auf etwa 800 °C, von wo aus sie in Folge des weiteren Stromflusses und der abgeschlossenen mechanischen Umformung nochmals linear ansteigt bis zu dem Endwert von etwa 850 °C. Nach Ende der Phase des Stromflusses klingt die Temperatur exponentiell ab.

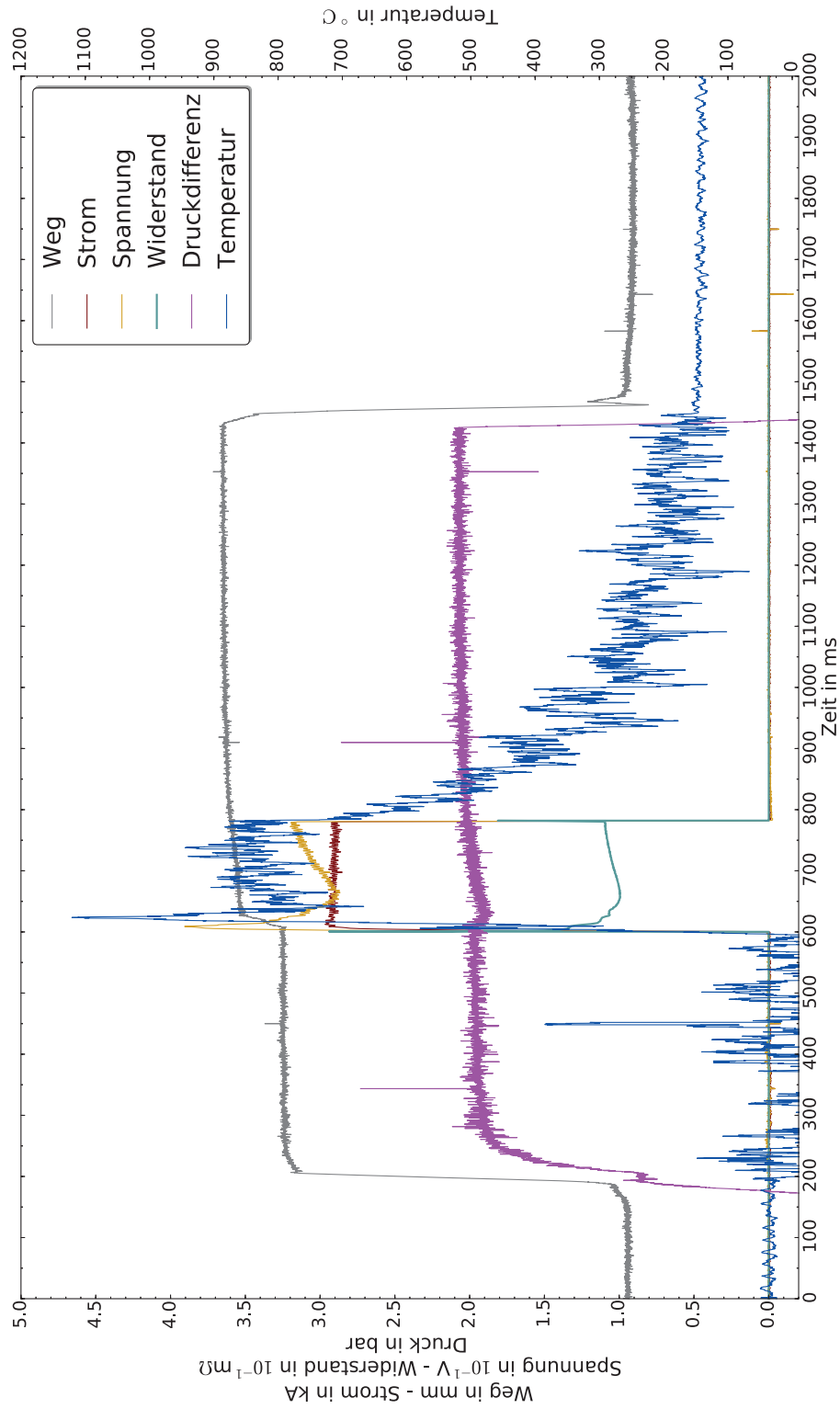
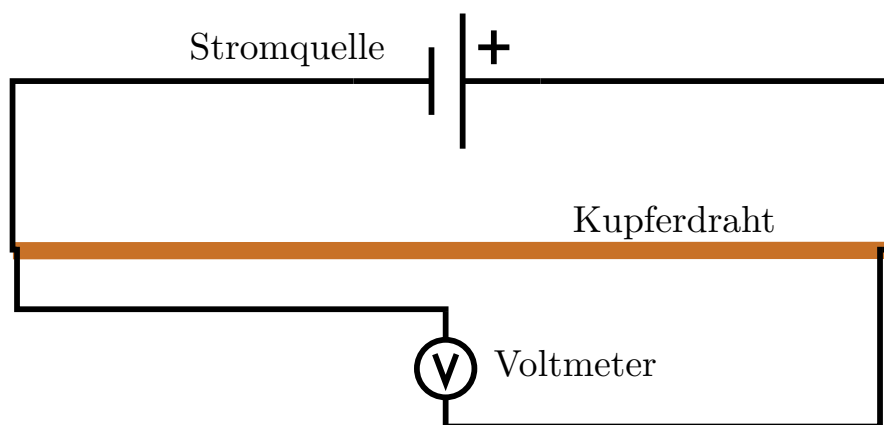


Abbildung 7.22: Diagramm der zeitsynchronen Temperaturmessung.

Schwankungen bzw. Störungen des Analogsignals der Thermospannung sind auf den starken Stromfluss zurückzuführen, welcher zu induzierten Spannungen führt. Auch das ausgebildete Magnetfeld beeinflusst das Messsignal nachhaltig. Die Messung der Temperatur im Prozessablauf belegt, dass keine schmelzflüssige Phase entsteht. Die generierten Temperaturen sind hierfür nicht ausreichend.

Die hier auftretenden Temperaturen sind ausreichend, um die Lackschicht des Drahtes zu verdampfen, da diese nicht temperaturfest ist. In der zugehörigen Norm [Rob01] sind 340 °C als Erweichungstemperatur des Drahtes angegeben, jedoch gibt es dort keine Angaben zur Verdampfungstemperatur der Isolationsschicht. Zur Bestimmung der Verdampfungstemperatur  $T_V$  wurde ein Versuchsaufbau analog zu Abbildung 7.23 verwendet. Zur Bestimmung der Materialwiderstände im Ausgangszustand wird eine Vierpunktmessung verwendet. Die Spannungsabfälle werden dabei nicht nur am Werkstück, sondern zusätzlich an einem internen Referenzwiderstand des Messgerätes gemessen. Hieraus kann mathematisch der ohmsche Widerstand des Werkstücks bestimmt und verfälschende Kontakt- und Übergangswiderstände eliminiert werden. Es werden vier anstelle der üblichen zwei Messspitzen in Reihe gebracht, der Stromfluss erfolgt über die beiden äußeren Spitzen, während die Inneren für die Messung des Potenzialunterschieds zuständig sind.

Der Gleichstrom wird solange erhöht, bis die Verdampfung der Isolationsschicht einsetzt. Es handelt sich hierbei um die Messung des rein thermischen Einflusses, es findet kein mechanischer Einfluss auf den weichen Lack statt durch Kontaktdrücke oder ähnliches. Die Verdampfung



**Abbildung 7.23:** Schematischer Aufbau zur Messung der Verdampfungstemperatur der Lackisolation. Der Kupferlackdraht wird an beiden Enden manuell abisoliert und mit der Stromquelle verbunden.

setzt ein bei  $I = 17,3 \text{ A}$ , wobei das Einsetzen des Verdampfens ohne technische Hilfsmittel festgestellt wurde. Mit diesem Wert und der dabei abfallenden Spannung kann der elektrische Widerstand  $R(T_V)$  des Drahtes bei der Verdampfungstemperatur  $T_V$  berechnet werden.

Für den Widerstand  $R(T_V)$  gilt, unter Verwendung des Widerstands  $R(T_0)$  zur Temperatur  $T_0 = 20^\circ\text{C}$  und dem Temperaturkoeffizienten  $\alpha_{T_0} = 3,93 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  [Deu05],

$$R(T_V) = R(T_0) \cdot (1 + \alpha_{T_0} \cdot (T_V - T_0)) \quad (7.1)$$

$$\Rightarrow T_V = \frac{\frac{R(T_V)}{R(T_0)} - 1}{\alpha_{T_0}} + T_0. \quad (7.2)$$

Einsetzen der Messwerte  $R(T_0) = 14,32 \text{ m}\Omega$  und  $R(T_V) = 43,76 \text{ m}\Omega$  in 7.2 ergibt eine Verdampfungstemperatur von

$$T_V = 543^\circ\text{C}$$

Eine Mikroskopaufnahme des Drahtes nach Einsetzen der Verdampfung zeigt Abbildung 7.24. Der genaue Zeitpunkt der einsetzenden Verdampfung ist mit einer Reaktionszeit fehlerbehaftet, da dieser ohne technische Hilfsmittel bestimmt wurde und somit nur als Anhaltspunkt dient, in welchem Bereich sich die Verdampfungstemperatur befindet. Verbunden mit einer Ableseungenauigkeit ist davon auszugehen, dass die reale Verdampfungstemperatur etwas unterhalb des Wertes von  $T_V = 543^\circ\text{C}$  liegt.



**Abbildung 7.24:** Mikroskopbild des Drahtstücks (Durchmesser  $0,421 \text{ mm}$ ) mit verdampfter Isolationsschicht nach rein thermischer Belastung des Drahtes.



## 7.4 Verbindungsmechanismus

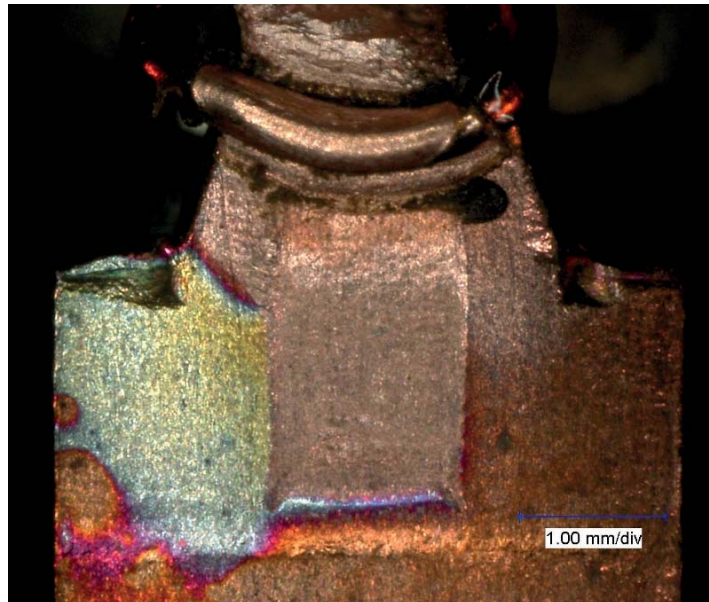
Kapitel 7.1.5 hat gezeigt, dass die Verbindungsbildung beim Hot-Staking-Prozess durch glatte Oberflächen begünstigt wird. Der Verbindungsmechanismus beim Verfahren des Kaltpressschweißens beispielsweise ist durch atomare Bindungskräfte der Metalle begründet. Die beste Beschreibung der Vorgänge beim Kaltpressschweißen liefert die Adhäsionstheorie kombiniert mit Diffusionsvorgängen [Haa94].

Beim Verfahren des Kaltpressschweißens ist der Parameter Druck von großer Bedeutung, wohingegen die Temperatur beim Hot-Staking als relevante Prozesskenngröße hinzukommt.

Dabei ist die Bindungsvoraussetzung eine „Annäherung der beiden Füge­teile auf Abstände atomarer Größenordnung“ [Pri02]. Problem hierbei sind vorhandene Oxidschichten, die sich immer auf den Fügepartnern ausbilden. Diese wenigen nm sind ausreichend, um den Prozess der Verbindungsbildung zu stören oder sogar zu verhindern. Die Kombination von Temperatur und Druck sorgt dafür, dass es möglich ist, die beiden Fügepartner (Kupferhaken und Kupferlamelle) auf ausreichend kleinen Abstand zu bringen. Vorhandene Oxidschichten werden durch die mechanische Umformung sowie den Wärmeeintrag aufgebrochen.

Allgemein gilt nach [Fri12], dass es sich bei Schweißverbindungen um stoffschlüssige Verbindungen handelt. Sie entstehen durch „die Wirkung von Adhäsions- oder Kohäsionskräften zwischen den Füge­teilen“ [Fri12]. Jedoch sind diese stoffschlüssigen Verbindungen nur durch Zerstören der Fügepartner lösbar.

Beim Hot-Staking-Prozess kommt es hingegen zu keiner schmelzflüssigen Phase zwischen Haken und Lamelle, da hierfür die auftretenden Temperaturen zu gering sind (Kapitel 7.3). Da keine schmelzflüssige Phase auftritt, ist der Verbindungsmechanismus auch in diesem Prozess auf atomare Bindungskräfte zurückzuführen. Ebenso beschreibt [Jeg14], dass es im Hot-Staking-Prozess lediglich zu einer Oberflächenadhäsion kommt, welche nur etwa 5 µm in die Oberflächen hinein reicht. Begünstigend kommt es hierbei zu statistischen Sprüngen einzelner Atome durch thermische Anregung (vgl. Kapitel 2.4). Ein weiteres Merkmal der Verbindung ist, dass ein Lösen der Verbindung nach der Kontaktierung erkennen lässt, dass kein makroskopischer Materialübertrag stattfindet (Abbildung 7.25). Es ist ausschließlich ein Abdruck des Hakens auf der Lamelle ersichtlich. Dies sind Indizien für atomare Bindungskräfte und gegen eine klassisch



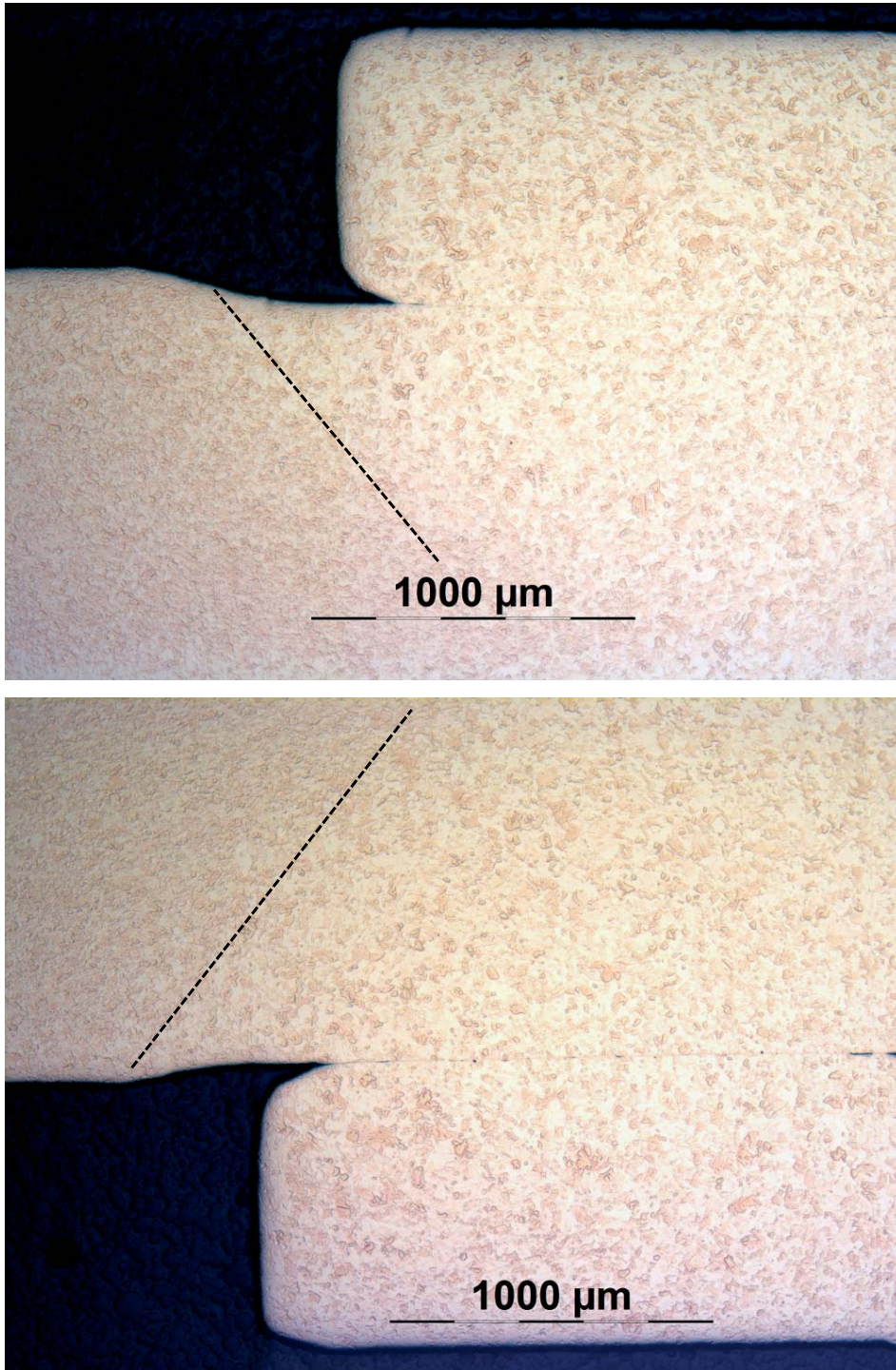
**Abbildung 7.25:** Mikroskopabdruck des Hakenabdrucks nach dem Lösen der Verbindung unter Serienbedingungen ( $I = 3 \text{ kA}$ ,  $t_I = 180 \text{ ms}$ ). Es kommt zu keinem Materialabtrag. Es ist ausschließlich ein Abdruck der Hakenfläche auf der Lamelle erkennbar.

abkühlende Schmelze oder tiefe Diffusionsverbindungen. Weiterhin ist in Abbildung 7.25 ersichtlich, dass die Isolationsschicht nicht vollständig verdampft. Es bleiben Reste in den freien Stellen um dem Draht erhalten. Die Verfärbungen sind Folge von Reaktionen der Werkstoffoberfläche mit Umgebungsmedien, vorwiegend sind dies Oxidationen.

Abbildung 7.26 zeigt Schliffbilder zweier Kontaktierungen unter Serienbedingungen im Bereich der Aufliegefläche des Hakens auf der Lamelle. Der Haken liegt nahezu vollständig an der Lamelle an. Es ist jedoch über die gesamte Länge die Trennlinie zwischen beiden Fügepartnern erkennbar. Die atomaren Bindungskräfte implementieren eine Art „nanokristalline Fügezone“ und keine vollflächige, stoffschlüssige Fügezone, die nur durch Zerstörung der Fügepartner wieder gelöst werden kann. Anhand der vorliegenden Gefügeänderung kann auf die Wärmeeinflusszone (WEZ) geschlossen werden. So wird der Bereich der Schweißverbindung bezeichnet, in dem es zu Gefügeumwandlungen durch die generierte Wärme kommt [Fri12].

Es kann im Laufe des Prozesses zu Problemen bei der Verbindungsbildung kommen aufgrund von Restverunreinigungen. Zudem ist die Oberfläche des Kommutators mit einer Oxidschicht unbestimmter Dicke überzogen. Diese Schicht wird durch die plastische Verformung des Hakens nicht





**Abbildung 7.26:** Schliffbilder der Auflagefläche unter Serienbedingungen ( $I = 3 \text{ kA}$ ,  $t_I = 180 \text{ ms}$ ). Es ist keine Fügezone erkennbar, sondern ausschließlich eine Kontaktlinie. Diese Verbindung kann ohne Materialübertrag gelöst werden. Die vorliegende Kornstruktur lässt auf die Wärmeeinflusszone in den Bereichen größerer Körner schließen.

zwingend komplett aufgebrochen und kann einen Störfaktor bilden. Darüber hinaus wird im Laufe des Prozesses die Lackisolationsschicht soweit erhitzt, dass diese großteils verdampft. Verkohlte Rückstände lassen sich auch hier nicht vermeiden und diese können, eventuell in Kombination mit mangelhafter Absaugung den Prozess der Verbindungsbildung negativ beeinflussen. Von Bedeutung ist zudem bereits der Lieferzustand des Kommutators. Rückstände der Pressmasse müssen von der Oberfläche entfernt sein. Da es sich hierbei um glasfaserverstärkten Kunststoff handelt, verhindern Verunreinigungen dieser Art die Bindungsprozesse.

Zur genaueren Analyse des Verbindungsmechanismus werden REM-Aufnahmen herangezogen. Hierzu werden Aufnahmen der Hakenunterseiten verschiedener Haken bei unterschiedlich langen Stromflussdauern gemacht. Die Verbindung zwischen Haken und Lamelle wird nach erfolgreichem Hot-Staking-Prozess aufgebrochen und die Hakenunterseite analysiert. Alternativ kann auch die Auflagefläche des Hakens auf der Lamelle betrachtet werden. Die Hakenunterseite enthält jedoch die identischen Informationen und die geringere Geometrie kommt der REM-Analyse zu Gute. Untersucht werden Haken bei Stromflussdauern im Prozess von 120 ms, 150 ms, 180 ms und 210 ms. Im Folgenden werden die erhaltenen Aufnahmen verschiedener Vergrößerungsstufen aufgezeigt und verglichen (Abbildung 7.27 bis Abbildung 7.34).

Die vergrößerten Aufnahmen entsprechen jeweils der Bildmitte der vorherigen Aufnahme. In den Übersichtsbildern sind keine wesentlichen Unterschiede erkennbar. Dies ändert sich bei Betrachten der vergrößerten Aufnahmen, speziell beim Vergleich der Bilder unter 20 000-facher Vergrößerung. Hier kommt es zu einer Zunahme einer feinen, wabenförmigen Struktur bei ansteigender Dauer des Stromflusses während des Hot-Staking-Prozesses. Diese wabenförmige Struktur ist ein Hinweis darauf, dass eine stoffschlüssige, metallische Bindung des Kupfers zwischen Haken und Lamelle stattgefunden hat. Sie sind bezeichnend für einen duktilen transkristallinen Bruch [Bür14]. Bei einem duktilen Bruch verformt sich der Werkstoff vor dem Versagen plastisch. „Mikroskopisch betrachtet ist der Bruch durch Scherung das Ergebnis intensiver Abgleitung entlang von Gleitebenen der Körner“ [Kal11]. Zu Beginn dieses Versagensmusters entstehen kleine Hohlräume, die weiter wachsen und letztendlich miteinander verschmelzen. Folge hiervon sind Rissbildungen, bis es abschließend zum Bruch kommt.

Tabelle 7.9 fasst die gewonnenen Erkenntnisse der REM-Aufnahmen in Bezug auf das Vorhandensein der duktilen Verformungswaben zusammen.

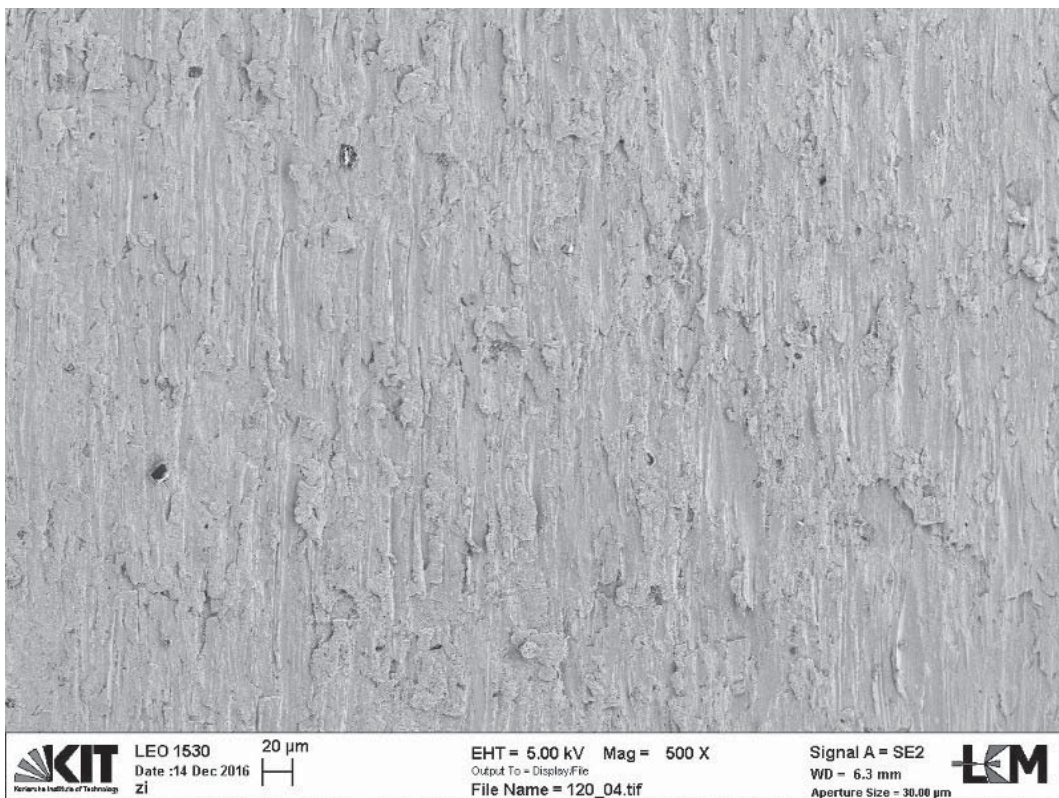
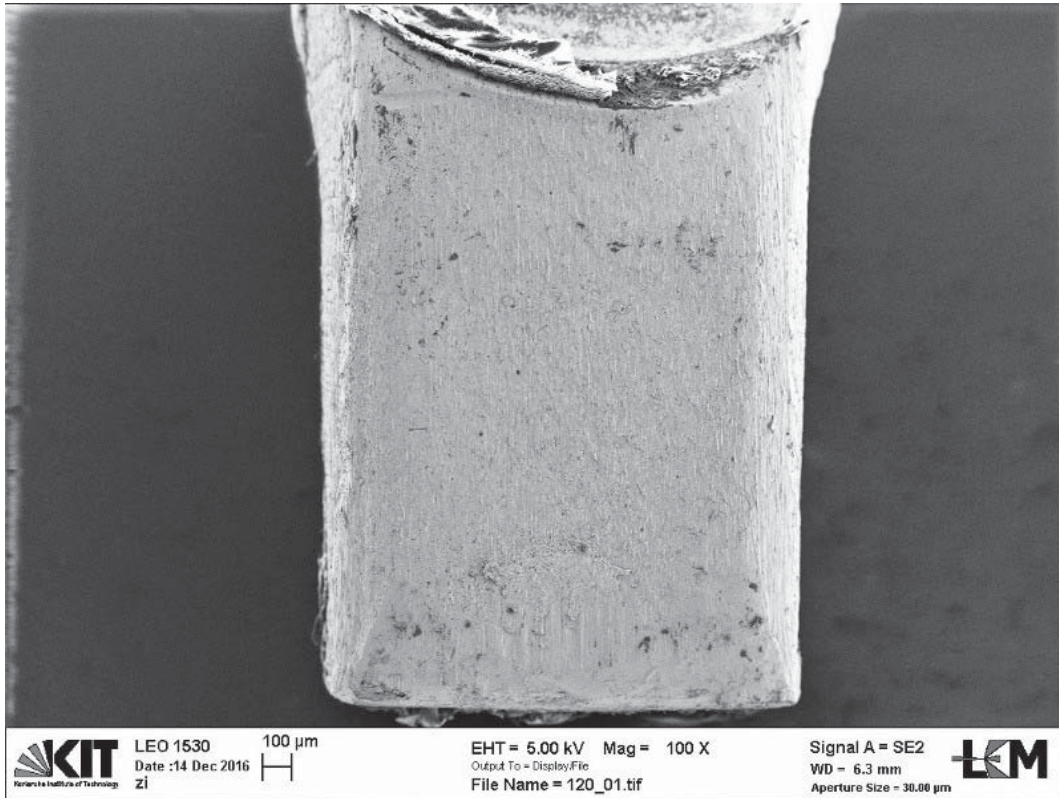
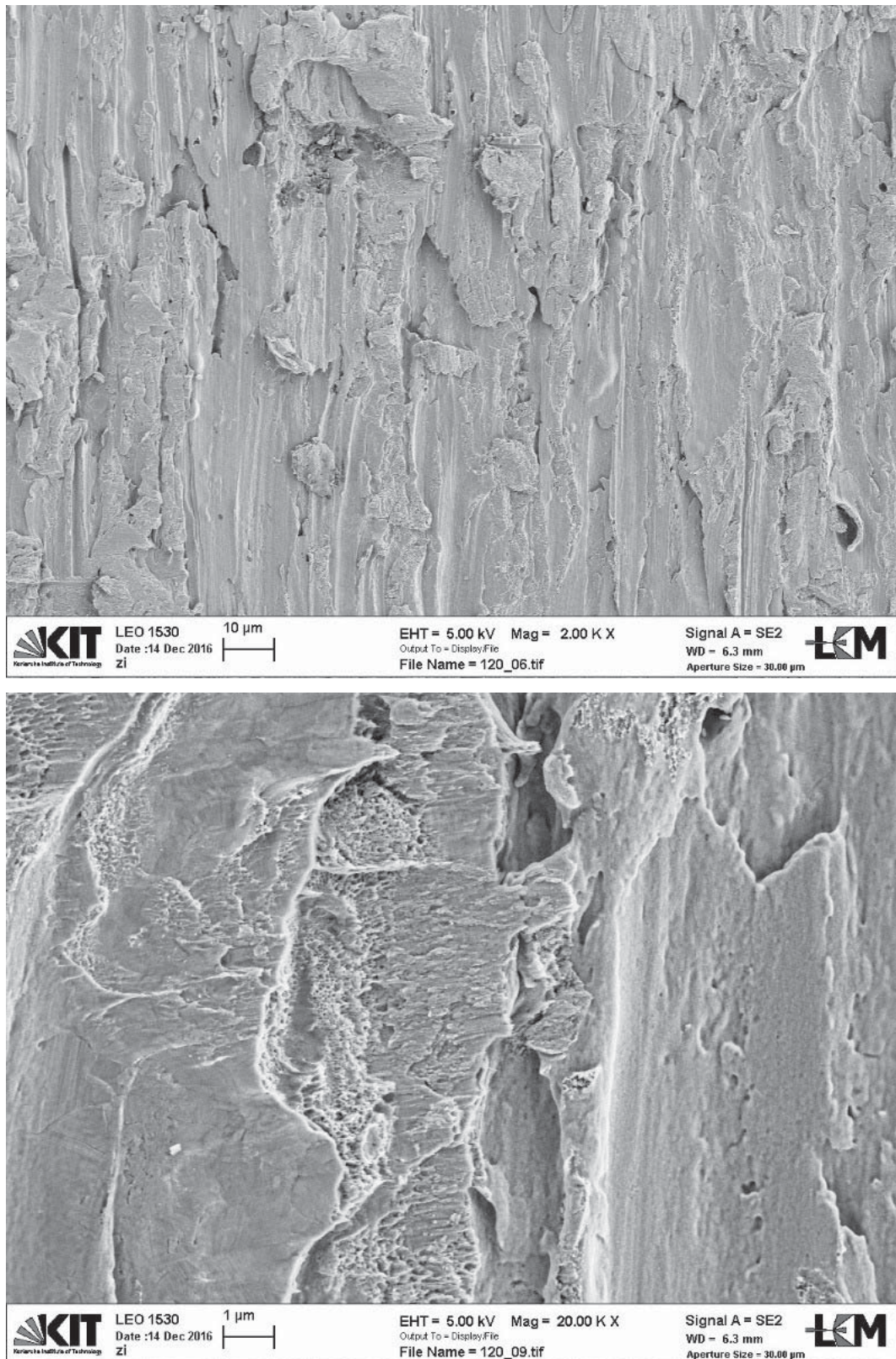


Abbildung 7.27: REM-Aufnahmen der Hakenunterseite bei 120 ms Stromflussdauer.



**Abbildung 7.28:** REM-Aufnahmen der Hakenunterseite bei 120 ms Stromflussdauer.

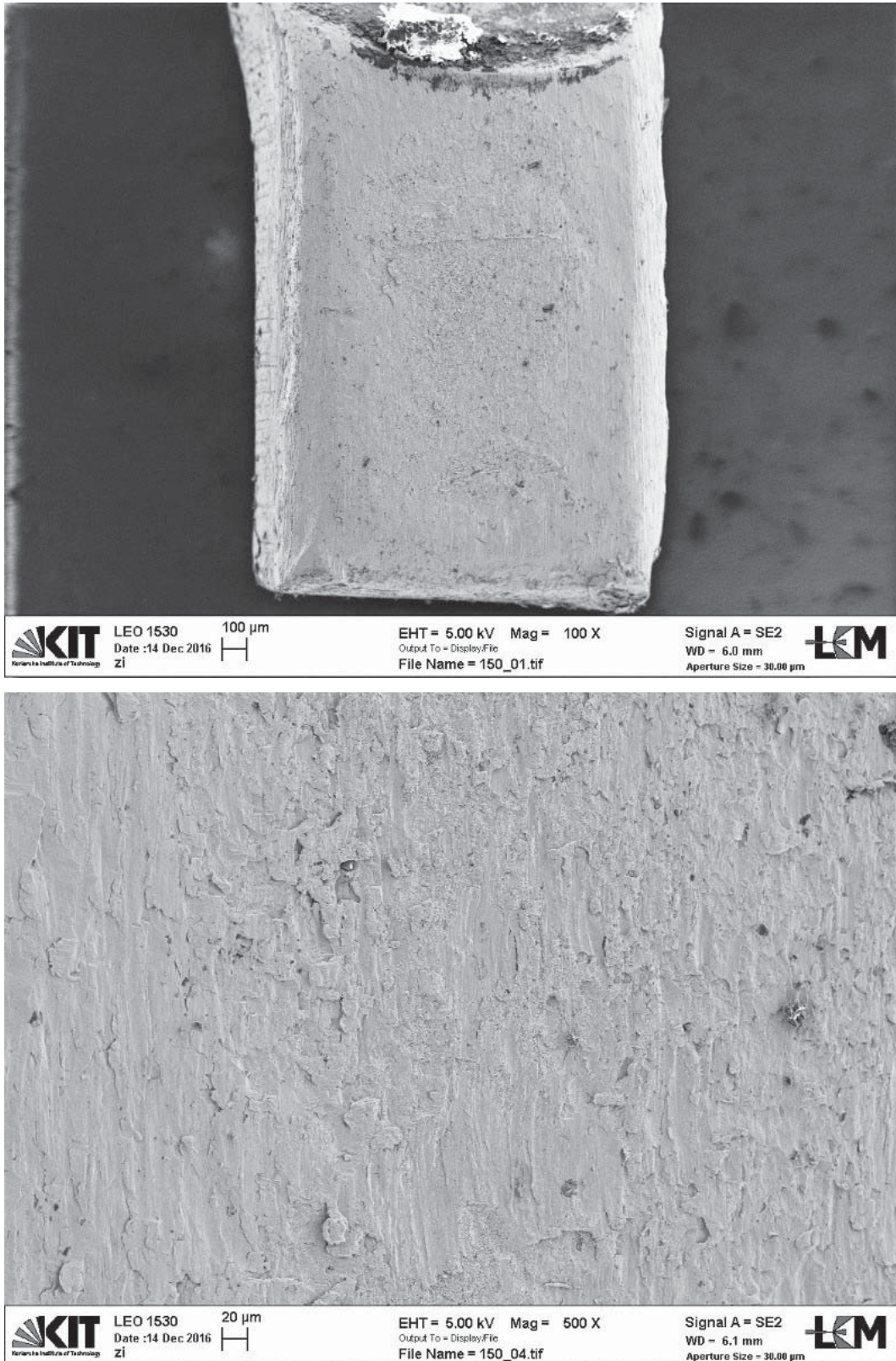
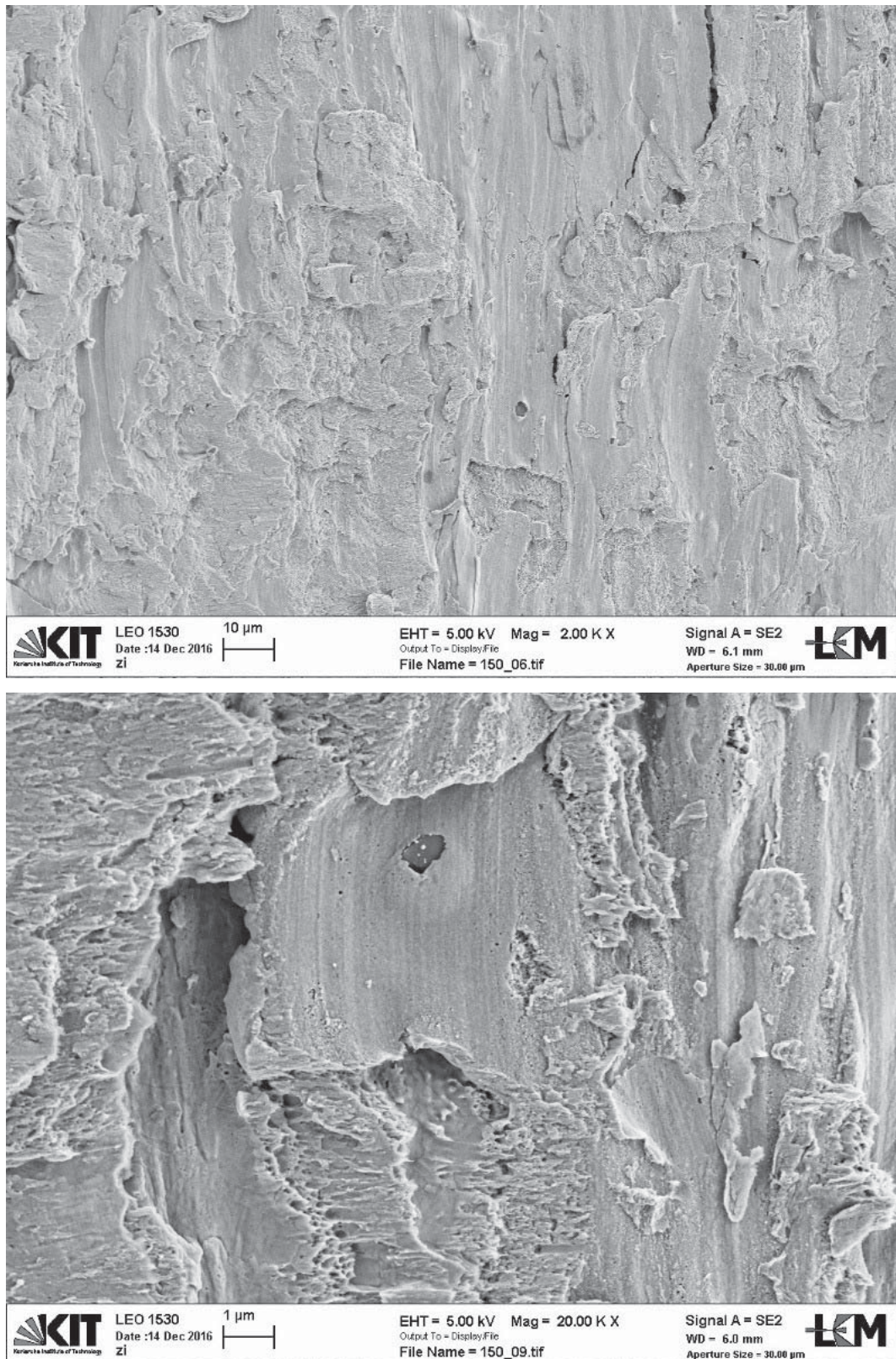


Abbildung 7.29: REM-Aufnahmen der Hakenunterseite bei 150 ms Stromflussdauer.



**Abbildung 7.30:** REM-Aufnahmen der Hakenunterseite bei 150 ms Stromflussdauer.



Abbildung 7.31: REM-Aufnahmen der Hakenunterseite bei 180 ms Stromflussdauer.

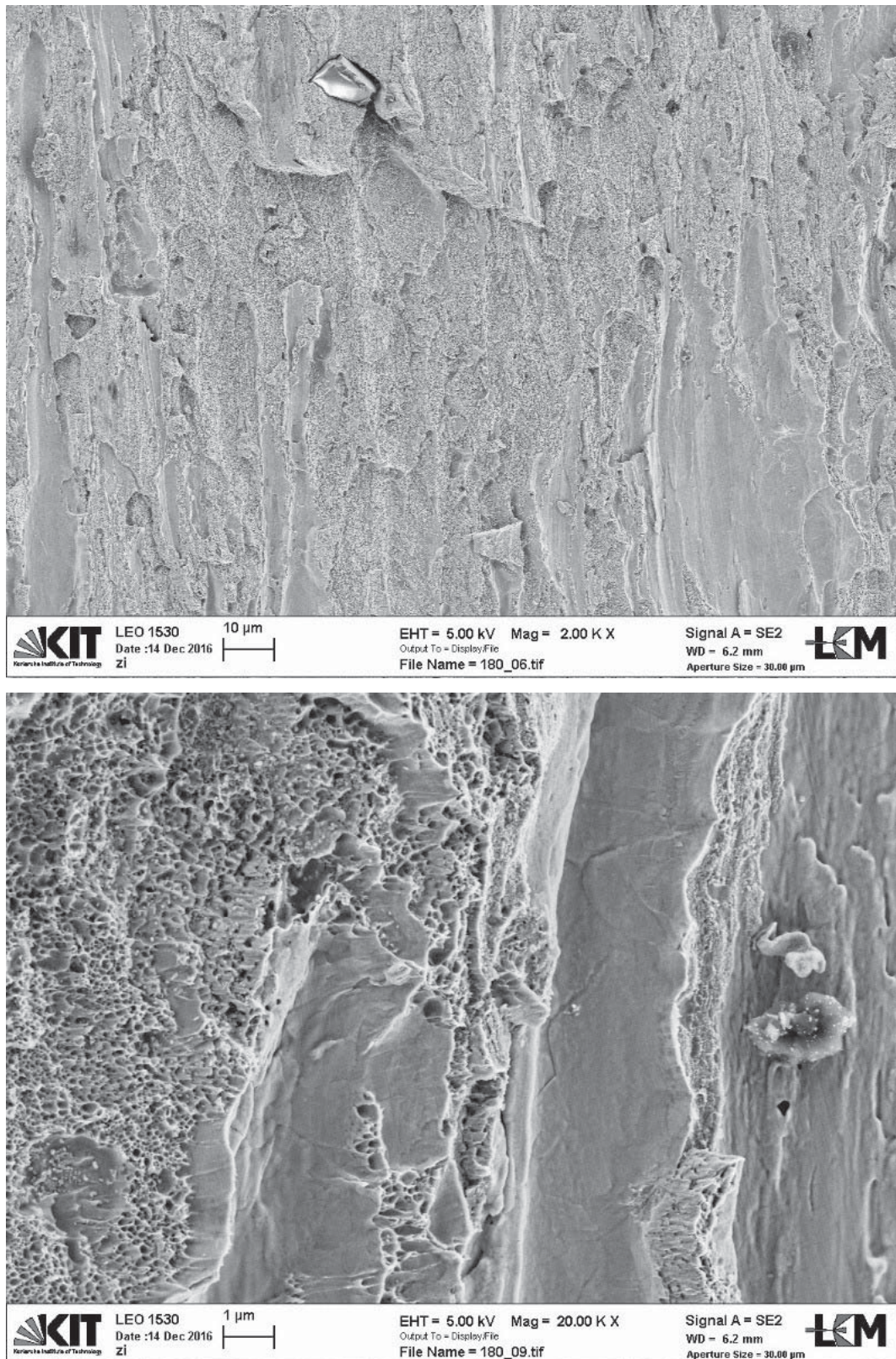


Abbildung 7.32: REM-Aufnahmen der Hakenunterseite bei 180 ms Stromflussdauer.



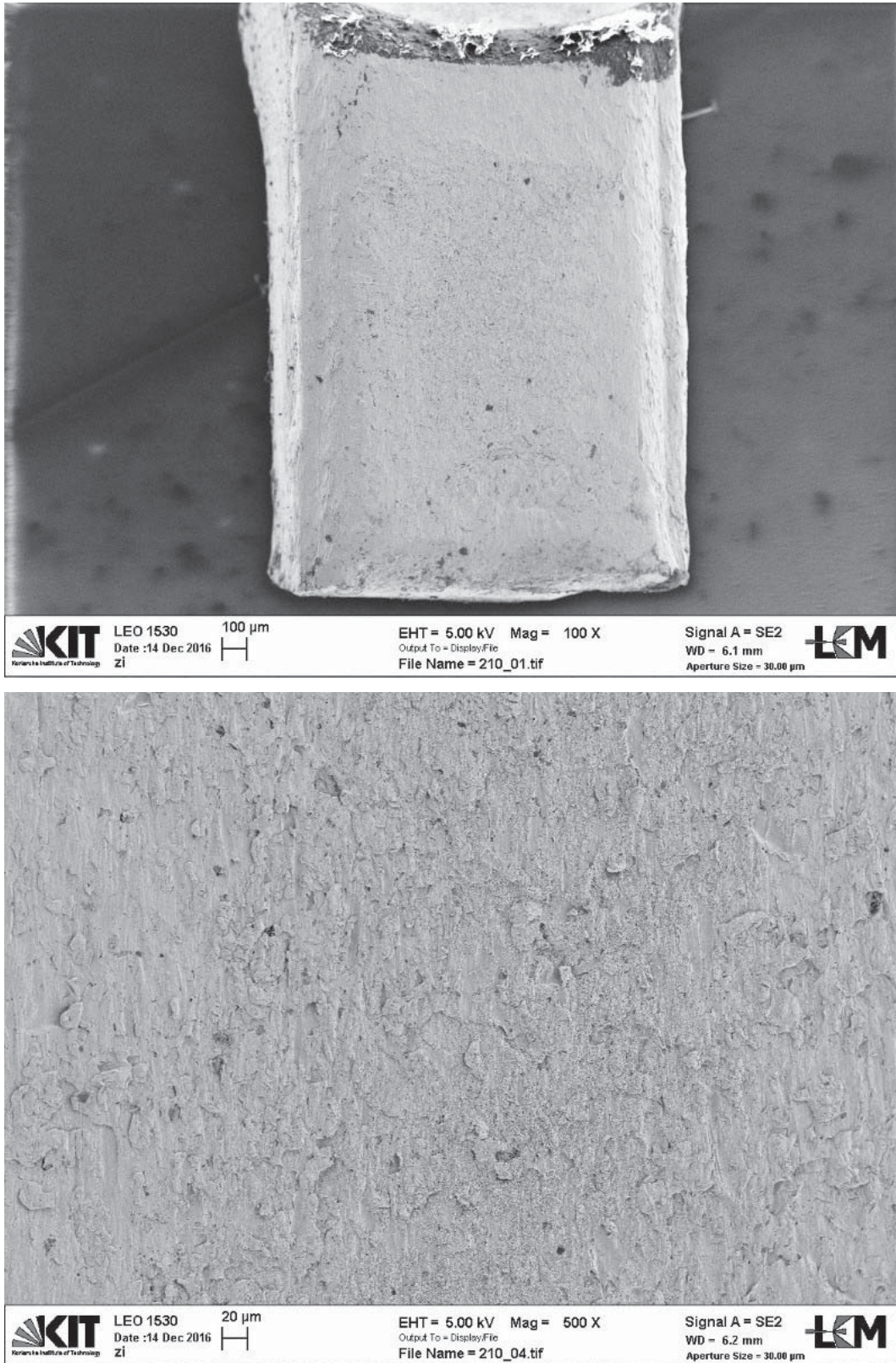
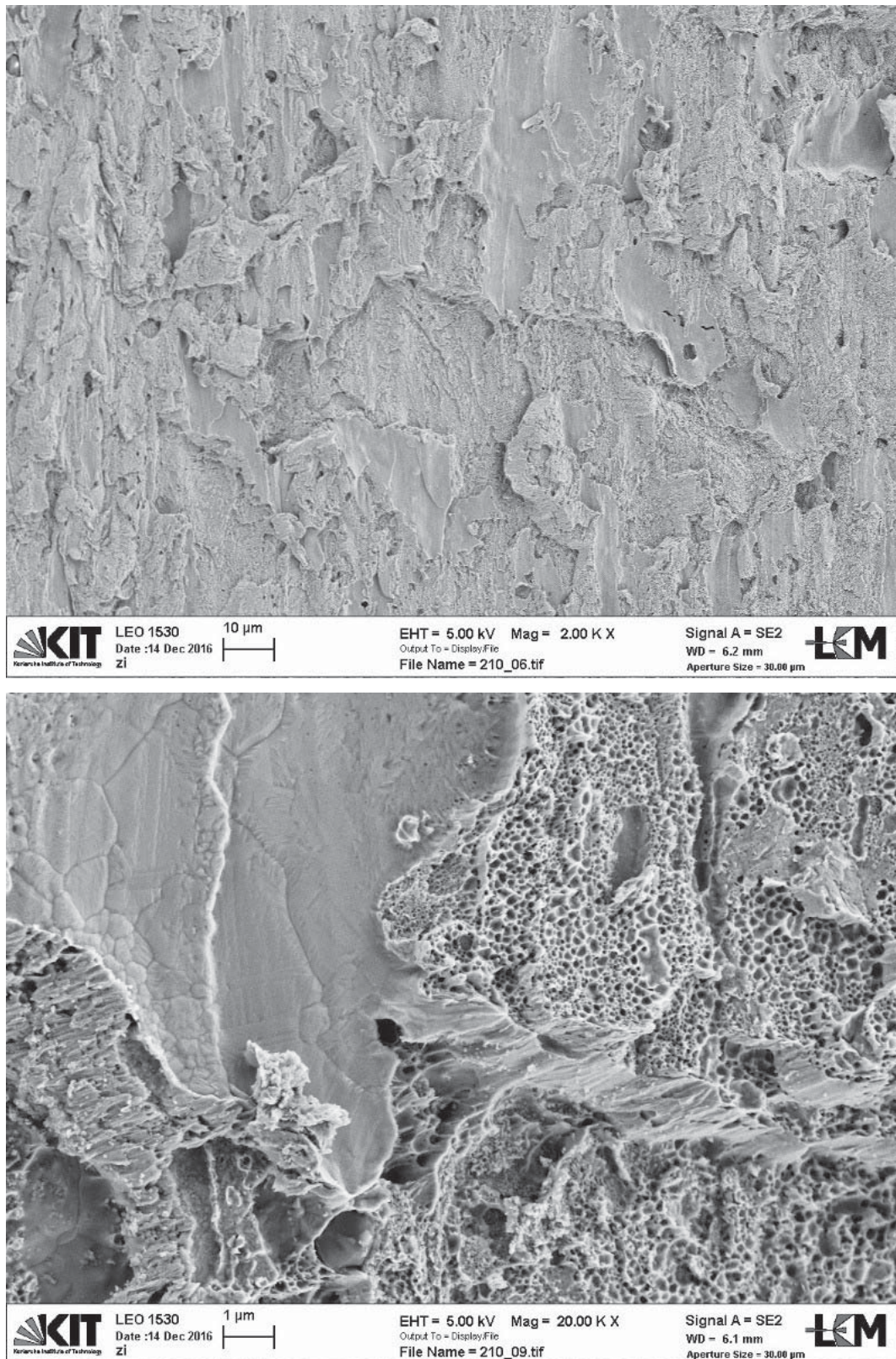


Abbildung 7.33: REM-Aufnahmen der Hakenunterseite bei 210 ms Stromflussdauer.



**Abbildung 7.34:** REM-Aufnahmen der Hakenunterseite bei 210 ms Stromflussdauer.



**Tabelle 7.9:** Ergebnisse der REM-Aufnahmen der Hakenunterseiten bei unterschiedlich langen Stromflussdauern  $t_I$

$t_I$	Merkmale
120 ms	Oberfläche nahezu im Ausgangszustand und nur sehr wenige, kleine Poren erkennbar
150 ms	leichter Abdruck der Lamelle auf der Hakenunterseite erkennbar, jedoch nur wenige, kleine Poren vorhanden
180 ms	deutlicher Abdruck der Lamelle auf der Hakenunterseite erkennbar und duktile Verformungswaben vorhanden
210 ms	deutlicher Abdruck der Lamelle auf der Hakenunterseite erkennbar und duktile Verformungswaben vorhanden

# 8

## Zusammenfassung

---

Ziel dieser Arbeit war es, ein grundlegendes Prozessverständnis auf dem Gebiet des Hot-Staking-Prozesses bei Hakenkommutatoren zu erlangen. Hierzu wurden verschiedene Aspekte des Prozesses, wie z. B.

- der Prozessablauf im Detail,
- die entstehenden Temperaturen
- oder der Einfluss der Oberflächenstruktur auf die Verbindungsbildung

genauer betrachtet und durch Mikroskopieaufnahmen oder Messungen der Hakenverschiebekraft ergänzt und unterstützt.

Hauptbestandteil zur Erreichung dieses Ziels ist die sequentielle Prozessphasenanalyse, unterstützt durch weitere Analysen der Wirkzusammenhänge. Verwendung fand ein externer Messaufbau, der es ermöglicht, prozessrelevante Kenngrößen zeitsynchron und mit hoher Auflösung aufzuzeichnen. Anhand dieser Signalverläufe gelang es, fünf Phasen innerhalb der Gesamtprozesszeit auszumachen, welche verschiedene Zeitpunkte des Prozessablaufs widerspiegeln. Diese Erkenntnis der unterschiedlichen Abschnitte im gesamten Verfahrensablauf in Bezug auf deren Zeitpunkte, Zeitdauern und charakteristische Merkmale kann für zukünftige Prozessauslegungen, -überwachungen und -regelungen herangezogen werden. Bisher wird der Prozess selbst nahezu als „Black Box“ betrachtet, dessen Prozesszeiten und Einstellungen weitestgehend auf Erfahrungen beruhen. Mit dem zusätzlichen Wissen dieser Untersuchungen können zukünftige Entscheidungen speziell im Bereich der Prozessauslegung begründet werden und somit folgende Problematiken im Serienbetrieb vermieden werden. Besonders hervorzuheben ist dabei die Thematik der Taktzeitreduzierung.



Nur mit diesem detaillierten Verständnis der einzelnen Phasen können notwendige Mindestprozesszeiten fundiert erläutert und auf diese Weise Qualitätsprobleme vermieden werden.

Der Messaufbau wurde ebenfalls dazu verwendet, um mittels Thermoeinzeldrähten die entstehende Prozesstemperatur aufzuzeichnen. Auch hier wurde das Temperatursignal, genauer die resultierende Thermospannung, zeitsynchron zu weiteren Parametern aufgezeichnet, so dass die Temperatur ebenfalls den fünf Phasen zugeordnet werden kann. Zu relevanten Zeitpunkten der Verbindungsbildung zwischen Haken und Lamelle entstehen Temperaturen von etwa 850 °C. Mit dem Ende des Stromflusses klingt die Temperatur exponentiell ab, was eine gewisse Dauer der Nachhaltezeit zum Wärmeabfluss aus der Kontaktstelle und den einzelnen Komponenten erforderlich macht. Dies ist von besonderer Bedeutung, da erstmals genaue Aussagen über entstehende Temperaturen getroffen werden können. Bisher wurden Temperaturmessungen ausschließlich an Schlitzkommutatoren durchgeführt und hierbei die Hakenoberfläche betrachtet und nicht wie in dieser Arbeit zwischen dem Haken und der Lamelle.

Weitergehend wurde untersucht, welchen Einfluss die Oberflächenbeschaffenheit des Kommutators auf den Prozess bzw. auf die Hakenverschiebekraft hat. Hierzu wurden die Auflageflächen des Hakens auf der Lamelle von Kommutatoren gezielt präpariert. Ergebnis dieser Versuchsreihe war, dass sich möglichst glatte Oberflächen positiv auf die Verbindungsbildung auswirken. Ursache dieser Verbindungsbildung sind Metallbindungen, welche durch Diffusionsvorgänge unterstützt werden. Es gilt, die beiden Oberflächen nach Möglichkeit auf atomaren Abstand zu bekommen, was durch makroskopisch glatte Oberflächen begünstigt wird. Auch die Prozessgrößen Druck und Temperatur spielen hierbei eine entscheidende Rolle, da z. B. der statistische Prozess der Diffusion durch thermische Erregung erhöht wird. Diese neuen Erkenntnisse des Einflusses der Oberflächenbeschaffenheit und dem daraus resultierenden Verbindungsmechanismus ergänzen das Grundlagenverständnis des Hot-Staking-Prozesses und dienen weiterhin als Basis für die Auslegung kommender Produkte.

All diese Untersuchungen und Erkenntnisse dienen als Grundlage für ein Folgeprojekt, welches zum Ziel hat, den Grundprozess in seiner mechanischen, elektrischen und thermischen Gesamtheit simulativ abzubilden. Aufgrund der Komplexität des Verfahrens ist die Simulation nur zielführend anwendbar, wenn ausreichend experimentelle Daten zur Verifizierung vorliegen.

Der einleitend aufgezeigte Stand der Technik konnte durch diese Arbeit um wichtige Eckpunkte ergänzt werden, da nun detailliertere Informationen über den Prozess vorliegen. Das reine Aufzeichnen verschiedener Parameter ist bereits seit einigen Jahren in vielen Schweißsteuerungen bzw. Schweißanlagen implementiert. Neu ist hingegen die Deutung der einzelnen Abschnitte. Es wird jedoch empfohlen, diese Möglichkeiten moderner Schweißsteuerungen auch einzusetzen, denn mit der Visualisierung sämtlicher Parameter in Kombination mit dem Grundlagenverständnis des Prozesses kann besser und schneller auf Abweichungen vom Soll-Zustand reagiert werden.

Diese Arbeit unterstreicht ebenfalls die Bedeutung der eingesetzten Stromstärke zur Wärmezeugung sowie der Stromflussdauer. Neben der Kraft, mit der die Elektrode auf den Haken drückt, sind die genannten Parameter die Haupteinflussfaktoren auf den Prozess. Von besonderer Wichtigkeit ist hierbei das ausgewogene Verhältnis zwischen der Zeit, in der Strom fließt und der Stromstärke selbst. Zu lange Zeiten sind prozessunabhängig ungünstig, da sie eine Taktzeitverlängerung folgern und dies in der Serienfertigung nach Möglichkeit zu vermeiden ist. Das Zeitfenster muss jedoch ausreichend groß sein, so dass die Lackisolation verdampfen, der Haken erweichen und sich die Verbindung zwischen Haken und Lamelle ausbilden kann. Der Wert der Stromstärke ist in Kombination mit der Dauer des Stromflusses für ein gutes Ergebnis bedeutsam und in Summe wichtiger für den Prozessablauf, als der Druck bzw. die Kraft der Elektrode.

Die Messung der Hakenverschiebekraft kann und sollte weiter verbessert werden, um hier eine gleichbleibende Qualität der Messergebnisse sicherzustellen. Bisher werden die Kommutatoren bzw. die ganzen Anker in eine Art Universalhalterung gespannt und Haken für Haken nachgedreht. Hierbei kann jedoch nur unzureichend auf unterschiedliche Produkttypen und somit Kommutatorgrößen reagiert werden und weiterhin ist nicht gewährleistet, dass jeder Haken identisch in der Vorrichtung eingespannt ist und somit der Messdorn immer eine vergleichbare Angriffsstelle hat. Hieraus können Streuungen in den Messungen resultieren, bei denen unklar ist, ob diese durch unterschiedliche Parametereinstellungen oder durch fehlerhaftes Einspannen in die Versuchseinrichtung verursacht werden. Es wird eine Einspannvorrichtung pro Produkttyp empfohlen mit mehreren Anschlägen, um eine gleichbleibende Positionierung zu gewährleisten.

Des Weiteren findet der Messaufbau sowie die Messtechnik Anwendung in anderen Gebieten der Elektrokleinmotorenfertigung. So wird untersucht, wie bei einem EC-Motor anhand der zeitlichen Entwicklung der Signalverläufe Rückschlüsse auf den Verschleiß der Elektroden gezogen werden



können. Hierdurch soll durch geeignetes Regeln von Prozessparametern eine Verlängerung der Elektrodenstandzeiten erreicht werden. Ziel ist es, von statischen Standzeiten zu dynamischen Standzeiten zu kommen.

# A

## Anhang: Datenblätter der Sensoren

---

In diesem Kapitel des Anhangs werden auszugsweise Informationen über die verwendete Sensorik gegeben. Sämtliche Angaben sowie Abbildungen sind den offiziellen Produktkatalogen entnommen.

### A.1 Wegmessung



**Abbildung A.1:** Wegsensor CS5 mit Controller capaNCDT 6110 der Firma Micro-Epsilon ([www.micro-epsilon.de](http://www.micro-epsilon.de)).



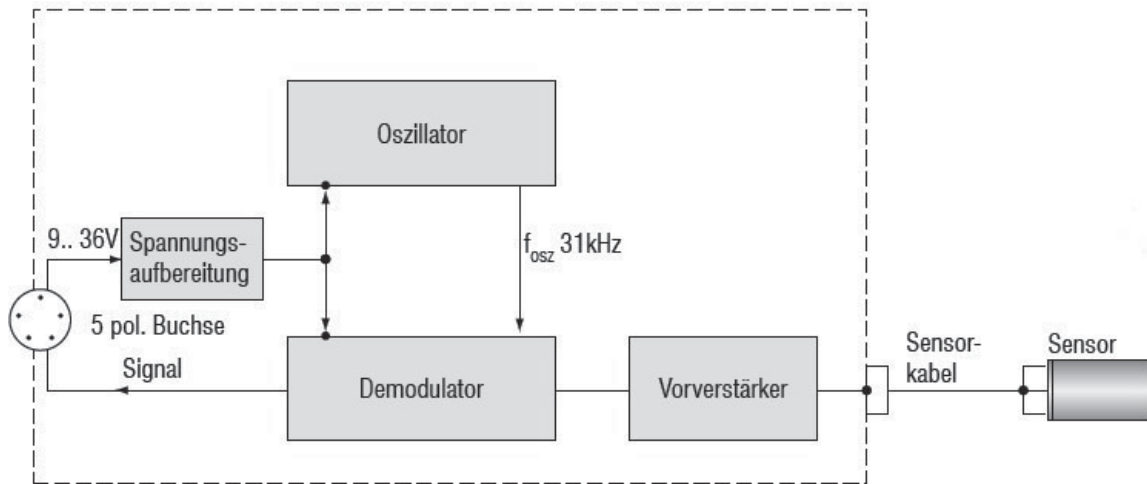


Abbildung A.2: Systemaufbau des Wegsensors.

Tabelle A.1: Produktinformationen capaNCdT 6110

Auflösung statisch	0,01 % d.M.
Auflösung dynamisch	0,015 % d.M.
Bandbreite	1 kHz
Linearität (typisch)	$\pm 0,05$ % d.M.
Empfindlichkeitsabweichung	$\pm 0,1$ % d.M.
Temperaturstabilität	200 ppm
Temperaturbereich Betrieb Controller	10 bis 60 °C
Temperaturbereich Betrieb Sensor	-50 bis 200 °C
Versorgung	24 VDC, 55 mA (9 bis 36 V)
Ausgang	0 bis 10 V (kurzschlussfest)

Tabelle A.2: Produktinformationen CS5

Messbereich nominal	5 mm
Linearität	2,5 $\mu\text{m}$
Auflösung (statisch, 2 Hz)	3,75 nm
Temperaturstabilität Nullpunkt	-170 $\frac{\text{nm}}{^\circ\text{C}}$
Temperaturstabilität Empfindlichkeit	-160 $\frac{\text{nm}}{^\circ\text{C}}$
Temperaturbereich Betrieb	-50 bis 200 °C
Durchmesser	40 mm
Aktive Messfläche	$\varnothing 12,6$ mm
Schirmelektrodenbreite	11,6 mm
Minstdurchmesser Messobjekt	$\varnothing 37$ mm
Gewicht	95 g

## A.2 Strom- und Spannungsmessung

Die Strom- und die Spannungsmessung wurden mit dem gleichen Messgerät durchgeführt. Das Impulsstrommessgerät MM-336A der Firma Miyachi verfügt über die Möglichkeit, parallel Stromstärke und Spannung zu messen und als Analogsignale weiterzugeben. Hierzu kann die Messspule (Rogowski-Gürtel) MB-400K Stromstärken im Bereich von 1 bis 19,99 kA bei einer Genauigkeit von  $\pm 1\%$  messen. Die Spannung wird über ein Spannungsmesskabel in einem Messbereich von 0,5 bis 9,99 V bei identischer Genauigkeit gemessen.

## A.3 Druckmessung

Für die Bestimmung des Druckes werden zwei Sensoren verwendet. Jeweils einer für den Vorschubdruck und einer für den Rückschubdruck des Pneumatikzylinders. Zum Einsatz kommen der Sensor DMP 331 von BD Sensors sowie der Sensor ISE40-01-62L der Firma SMC.

Der DMP 331 liefert bei einem Eingangssignal von 0 bis 10 bar ein analoges Ausgangssignal von 0 bis 10 V bei einer Genauigkeit von 0,35%. Abbildung A.3 zeigt die technischen Daten des Sensors ISE40-01-62L.



		ZSE40F (Überdruck/Vakuum)	ISE40 (Überdruck)
Druckanzeigebereich		-100.0 bis 100.0kPa	0.000 bis 1.000MPa
Betriebsdruckbereich		-100.0 bis 100.0kPa	-0.100 bis 1.000MPa
Prüfdruck		500kPa	1.5MPa
kleinste Anzeigeeinheit	kPa	0.1	—
	MPa	—	0.001
	kgf/cm <sup>2</sup>	0.001	0.01
	bar	0.001	0.01
	psi	0.02	0.1
	mmHg	1	—
	InHg	0.1	—
Medium		Luft, nicht aggressives/nicht entflammables Gas	
Netzspannung		12 bis 24VDC 10%, Restwelligkeit (s-s) max. 10%	
Stromaufnahme		max. 55mA	
Schaltausgang		2 Transistoren oder PNP Ausgänge max. Laststrom: 80mA Restspannung: max. 1V (bei 80mA Laststrom)	
Wiederholgenauigkeit		0.2% vom Endwert max. 1Digit	
Hysterese	Hysteresemodus	einstellbar	
	Windowmodus	fest (3-stellig) <sup>Anm.1)</sup>	
Ansprechzeit (mit Anti-Chattering-Funktion)		max. 2.5ms (mit Anti-Chattering-Funktion: 24ms, 192ms und 768ms zur Auswahl)	
Ausgang kurzschlussfest		ja	
Display		3 1/2-stelliges LED-Display (Abtastfrequenz: 5mal/s)	
Display-Genauigkeit		2% vom Endwert max. 1 Digit (bei einer Umgebungstemperatur von 25°C ± 3 °C)	
Betriebsanzeige		grüne LED (Ausgang 1: leuchtet bei EIN), rote LED (Ausgang 2: leuchtet bei EIN)	
Analogausgang		Ausgangsspannung: 1 bis 5V max. 5% vom Endwert (im Druckanzeigebereich) Linearität: max. 1% vom Endwert Ausgangsimpedanz: ca. 1kΩ	Ausgangsspannung: 1 bis 5V max. 2.5% vom Endwert (im Druckanzeigebereich) Linearität: max. 1% vom Endwert Ausgangsimpedanz: ca. 1kΩ
Auto-Referenz-Eingang		Masse-Brücke (Reed oder elektronisch), Eingang min. 5ms	
Schutzart		IP65	
Umgebungstemperaturbereich		bei Betrieb: 0 bis 50°C, bei Lagerung: -10 bis 60°C (ohne Taubeschlag und Gefrieren)	
Luftfeuchtigkeitsbereich		Betrieb/Lager: 35 bis 85% rel. Luftfeuchtigkeit (ohne Taubeschlag)	
Spannungswiderstand		zwischen allen Drähten und Gehäuse 1000VAC 1Min.	
Isolationswiderstand		min. 50MΩ (bei 500VDC) zwischen allen Drähten und Gehäuse	
Erschütterungsfestigkeit		10 bis 500Hz Amplitude = 1.5mm oder Beschleunigung 98m/s <sup>2</sup> (10G) in Richtungen X, Y, Z für je 2 Std. (ohne Strom)	
Stoßfestigkeit		980m/s <sup>2</sup> (100G) in Richtungen X, Y, Z je dreimal (ohne Strom)	
Temperaturverhalten		in einem Temperaturbereich von 0 bis 50°C, max. 2% vom Endwert, vom Druck gemessen bei 25°C	
Anschlussgrößen		01: R1/8 C6: mit ø6-Steckverbindung	
Anschlusskabel		5-adriges, ölbeständiges Hochleistungskabel (0.15mm <sup>2</sup> )	
Gewicht		Ausführung 01 ca. 60g / C6 ca. 92g (jeweils inkl. 0.6m Anschlusskabel)	

Abbildung A.3: Technische Daten des Drucksensors ISE40-01-62L

# B

## Anhang: Python-Skript zur Auswertung der Analogsignale

---

Bei den resultierenden Analogsignalen handelt es sich um Spannungswerte. Diese werden mit dem folgenden Skript der Programmiersprache Python in die jeweilig korrekte Einheit umgerechnet und gegebenenfalls weiterverarbeitet.

```
1 from numpy import *
2 from pylab import *
3 import numpy as np
4 import pylab
5 Figure = pylab.figure()
6 ax = Figure.gca()
7 import os

9 matplotlib.rc('xtick', labels=18)
10 matplotlib.rc('ytick', labels=18 )
11 matplotlib.rcParams.update({'font.size': 20})
12 #-----
13 # Datei einlesen
14 os.chdir(os.getcwd() + u"/__normale_Haken/")

16 data = np.genfromtxt('FPG2Haken0009.csv', delimiter=',',
17                     skip_header=6, names=['zeit', 'weg', 'strom',
18                     'spannung', 'druck_v', 'druck_r'])

20 # Umrechnungen von Analogspannung in 'korrekte Einheit'
21 data['weg']=[i * 0.5 for i in data['weg']]
22 data['strom']=[i * 1000/151 for i in data['strom']]
23 data['spannung']=[i * 10 for i in data['spannung']]
24 data['druck_r']=[(i-1) * 2.5 for i in data['druck_r']]

26 # gleitender Mittelwert auf Strom und Spannung anwenden
27 def glMW(m, Y, Z):
28     for i in range(0,m/2):
29         Z.append(Y[i])
30     for i in range(m/2,n-m/2):
31         k = 0
```



```
32         for j in range(-m/2,m/2):
33             k += Y[i+j]
34         Z.append(k/m)
35     for i in range(n-m/2,n):
36         Z.append(Y[i])

38     n = len(data['zeit'])
39     avgI = []
40     avgU = []
41     glMW(5, data['strom'], avgI)
42     glMW(5, data['spannung'], avgU)

44     # resultierender Druck und Widerstand berechnen
45     Druck_res = data['druck_v']-data['druck_r']
46     Widerstand = array(avgU)/array(avgI)

48     # Widerstandswerte ausserhalb der Bestromung=0
49     for i in range(len(avgI)):
50         if avgI[i] <= 0.03 or avgU[i] <= 0.01:
51             Widerstand[i] = 0

53     #-----
54     # Ploteigenschaften
55     ax.plot(data['zeit'], data['weg'], label='Weg')
56     ax.plot(data['zeit'], avgI, label='Strom')
57     ax.plot(data['zeit'], avgU, label='Spannung')
58     ax.plot(data['zeit'], Widerstand, label='Widerstand')
59     ax.plot(data['zeit'], Druck_res, label='Druckdifferenz')

61     ax.set_xlabel("Zeit in ms")
62     ax.set_ylabel("Weg in mm - Strom in kA \n Spannung in $10^{-1}$V"
63                 "- Widerstand in $10^{-1}$m$\Omega$ \n Druck in bar")

65     ax.set_ylim(-0.2,5)
66     ax.set_xlim(0,1000)

68     ax.xaxis.set_major_locator(MultipleLocator(100))
69     ax.xaxis.set_minor_locator(MultipleLocator(25))
70     ax.yaxis.set_major_locator(MultipleLocator(0.5))
71     ax.yaxis.set_minor_locator(MultipleLocator(0.1))

73     ax.legend(loc=0, fancybox=True, shadow=True)
74     show()
```



## Abkürzungsverzeichnis

---

Kfz	Kraftfahrzeug	5
DC	direct current	5
EC	electrically commutated	5
REM	Rasterelektronenmikroskop	9
VHZ	Vorhaltezeit	26
STZ	Stromzeit	26
NHZ	Nachhaltezeit	26
FE-Modell	Finite-Elemente-Modell	29
CuCrZr	Kupfer-Chrom-Zirkon	31
E-Modul	Elastizitätsmodul	34
BNC	Bayonet-Neill-Concelmann	43
$\sigma$	Standardabweichung	59
FeCl <sub>3</sub>	Eisen(III)-chlorid	63
SiC	Siliziumkarbid	75
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Korund	75
$R_a$	Mittenrauwert	75
$R_z$	Rautiefe	75
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Schwefelsäure	77
WEZ	Wärmeeinflusszone	89
d.M.	des Messbereichs	



# Abbildungsverzeichnis

---

1.1	Elektrokleinmotoren im Kraftfahrzeug . . . . .	6
1.2	Kommutatorhaken mit Wicklungsdraht . . . . .	8
2.1	Klassifizierung der Elektromotorgrundtypen . . . . .	13
2.2	Aufbau eines DC-Motors . . . . .	14
2.3	Aufbau eines Ankers . . . . .	15
2.4	Leiterschleife im Magnetfeld . . . . .	15
2.5	Verfahrensskizze Widerstandspunktschweißen . . . . .	17
2.6	Spannungsmessungen beim KE-Schweißen bei geschlossenen Elektroden ohne Bauteil . . . . .	19
2.7	Platzwechselmechanismen in Festkörpern . . . . .	23
3.1	Schematischer Prozessablauf des Hot-Staking-Verfahrens .	27
3.2	Isolationsreste zwischen Haken und Lamelle . . . . .	28
3.3	Scheinbare und wirkliche Kontaktfläche zweier Kontaktpartner . . . . .	33
3.4	Schematische Darstellung von Engstellen bei Kontaktwiderständen . . . . .	34
3.5	Widerstandsketten beim Hot-Staking-Prozess . . . . .	36
5.1	Aufbau und Anordnung der Sensoren zur Messung prozessrelevanter Parameter . . . . .	40
5.2	Messaufbau zur Korrelation der Elektrodenkraft mit dem eingestellten Druck des Pneumatikzylinders . . . . .	41
5.3	Gemessener Zusammenhang zwischen Druck des Pneumatikzylinders und der ausgeübten Kraft der Elektrode . . .	43
5.4	Versuchsaufbau zur Messung der Hakenverschiebekraft . .	44
5.5	Anordnung des Thermoelementes auf der Lamelle . . . . .	45
5.6	Kennlinie von Thermoelementen Typ K . . . . .	46





6.1	Signalverlauf unter Serienbedingungen mit eingezeichneten Prozessphasen . . . . .	49
7.1	Zusammenhang zwischen Dauer des Stromflusses und Hakenverschiebekraft . . . . .	54
7.2	Haken bei einer Stromflusszeit von 240 ms . . . . .	56
7.3	Kraft-Weg-Verlauf mit Stromzeitvariation - Teil 1 . . . . .	57
7.4	Kraft-Weg-Verlauf mit Stromzeitvariation - Teil 2 . . . . .	58
7.5	Kraft-Weg-Verlauf mit Stromzeitvariation - Teil 3 . . . . .	59
7.6	Signalverläufe mit Druckerhöhung zu unterschiedlichen Zeitpunkten . . . . .	61
7.7	Fehlerbalkendiagramm der Druckerhöhung zu unterschiedlichen Zeitpunkten . . . . .	62
7.8	Erläuterung des Einfallwinkels beim Ionenpolierers . . . . .	64
7.9	Schliffbilder Serienzustand . . . . .	65
7.10	Schliffbilder Serienzustand nach chemischem Ätzen . . . . .	66
7.11	Schliffbilder Stromzeit 90 ms . . . . .	68
7.12	Schliffbilder Stromzeit 120 ms . . . . .	69
7.13	Schliffbilder Stromzeit 210 ms . . . . .	70
7.14	Schliffbilder Druckerhöhung innerhalb der Stromzeit . . . . .	71
7.15	Schliffbilder Druckerhöhung innerhalb der Nachhaltezeit . . . . .	72
7.16	Härtemessungen am metallografischen Schliffbild der Kontaktierung mit Serienparametern . . . . .	74
7.17	Position der Oberflächenbearbeitung und Messung der Rauheiten . . . . .	76
7.18	Hakenverschiebekraft in Relation zum $R_a$ -Wert längs . . . . .	79
7.19	Wirkungsflächendiagramm von Stromstärke und Druck in Bezug auf die Hakenverschiebekraft . . . . .	80
7.20	Hakenabdruck bei Parametervariation - Teil 1 . . . . .	81
7.21	Hakenabdruck bei Parametervariation - Teil 2 . . . . .	82
7.22	Diagramm der zeitsynchronen Temperaturmessung . . . . .	85
7.23	Schematischer Aufbau zur Messung der Verdampfungstemperatur der Lackisolation . . . . .	86
7.24	Mikroskopbild des Drahtstücks mit verdampfter Isolations-schicht . . . . .	87
7.25	Mikroskopaufnahme des Hakenabdrucks nach dem Lösen der Verbindung . . . . .	89
7.26	Schliffbilder der Aufliegefläche unter Serienbedingungen . . . . .	90
7.27	REM-Aufnahmen der Hakenunterseite bei 120 ms Stromflussdauer. . . . .	92



7.28	REM-Aufnahmen der Hakenunterseite bei 120 ms Stromflussdauer. . . . .	93
7.29	REM-Aufnahmen der Hakenunterseite bei 150 ms Stromflussdauer. . . . .	94
7.30	REM-Aufnahmen der Hakenunterseite bei 150 ms Stromflussdauer. . . . .	95
7.31	REM-Aufnahmen der Hakenunterseite bei 180 ms Stromflussdauer. . . . .	96
7.32	REM-Aufnahmen der Hakenunterseite bei 180 ms Stromflussdauer. . . . .	97
7.33	REM-Aufnahmen der Hakenunterseite bei 210 ms Stromflussdauer. . . . .	98
7.34	REM-Aufnahmen der Hakenunterseite bei 210 ms Stromflussdauer. . . . .	99
A.1	Wegsensor mit Controller . . . . .	105
A.2	Systemaufbau des Wegsensors . . . . .	106
A.3	Technische Daten des Drucksensors ISE40-01-62L . . . .	108





# Tabellenverzeichnis

---

6.1	Prozessablauftabelle . . . . .	52
7.1	Gemittelte Maximalwerte der Hakenverschiebekraft und Standardabweichungen bei unterschiedlichen Stromflussdauern . . . . .	60
7.2	Ergebnisse der Auswertung der Hakenverschiebekräfte in N bei n Messungen . . . . .	62
7.3	Parameter des Ionenpolierers . . . . .	63
7.4	Ergebnisse der Härtemessung am Kommutator nach der Kontaktierung unter Serienparametern . . . . .	73
7.5	Ergebnisse der Rauheitsmessungen der unterschiedlichen Oberflächenstrukturen: $R_a$ -Werte $\pm$ Standardabweichungen $\sigma$ . . . . .	77
7.6	Ergebnisse der Rauheitsmessungen der unterschiedlichen Oberflächenstrukturen: $R_z$ -Werte $\pm$ Standardabweichungen $\sigma$ . . . . .	77
7.7	Ergebnisse der gemittelten Messungen der Hakenverschiebekräfte und deren Standardabweichungen der unterschiedlichen Oberflächenstrukturen . . . . .	78
7.8	Parametereinstellungen der Variation von Stromstärke und Druck (Standard: 3 kA und 2 bar) . . . . .	83
7.9	Ergebnisse der REM-Aufnahmen der Hakenunterseiten bei unterschiedlich langen Stromflussdauern $t_I$ . . . . .	100
A.1	Produktinformationen capaNCDT 6110 . . . . .	106
A.2	Produktinformationen CS5 . . . . .	106



## Literatur

---

- [Aso97] K. ASOKKUMAR u. a.: „Evaluation of dynamic resistance as quality criterion for resistance spot welding“. *Indian Welding Journal* (1997), Bd. (30): S. 24–31 (siehe S. 18).
- [Bin12] A. BINDER: *Elektrische Maschinen und Antriebe: Grundlagen, Betriebsverhalten*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012 (siehe S. 12).
- [Brü80] H. BRÜMMER: *Elektronische Gerätetechnik: Systematische Entwicklung und Konstruktion*. Vogel, 1980 (siehe S. 33).
- [Bür14] R. BÜRCEL; H. A. RICHARD und A. RIEMER: *Werkstoffmechanik: Bauteile sicher beurteilen und Werkstoffe richtig einsetzen*. 2., überarb. Aufl. SpringerLink : Bücher. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014 (siehe S. 91).
- [Bus15] R. BUSCH: *Elektrotechnik und Elektronik: Für Maschinenbauer und Verfahrenstechniker*. 7. Aufl. Springer Vieweg, 2015 (siehe S. 32).
- [Car99] R. T. CARTWRIGHT, Hrsg.: *Practical approach to fusing*. Electrical Electronics Insulation Conference and Electrical Manufacturing amp. 1999 (siehe S. 18).
- [Che] A. CHERTOV und R. MAEV: „Determination of resistance spot weld quality in real time using reflected acoustic waves“. *16th World Conference on NDT 2004* (siehe S. 20).
- [Cho03] Y. CHO und S. RHEE: „Experimental study of nugget formation in resistance spot welding“. *Welding Journal* (2003), Bd. (82): S. 195–201 (siehe S. 18).
- [Czi12] H. CZICHOS und M. HENNECKE: *HÜTTE - Das Ingenieurwissen*. 34. Aufl. Springer Berlin Heidelberg, 2012 (siehe S. 16, 17).



- [Deu03] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN 8580: Fertigungsverfahren: Begriffe, Einteilung*. Berlin, 2003 (siehe S. 16).
- [Deu10] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN EN ISO 4287: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit*. 2010 (siehe S. 76).
- [Deu05] DEUTSCHES KUPFERINSTITUT E.V.: *Werkstoff-Datenblatt Cu-ETP*. 2005 (siehe S. 87).
- [Dic80] D. W. DICKINSON; J. E. FRANKLIN und A. STANYA: „Characterization of spot welding behavior by dynamic electrical parameter monitoring“. *Welding Journal* (1980), Bd. 59(6): S. 170 (siehe S. 18).
- [DVS98] DVS-MERKBLATT 2903: *Elektroden für das Widerstandsschweißen*. 1998 (siehe S. 31).
- [DVS07] DVS-MERKBLATT 2921: *Widerstandsschweißen von lackisolierten Drähten*. 2007 (siehe S. 27).
- [DVS10] DVS-MERKBLATT 2950: *Widerstandsschweißen in der Elektronik und Feinwerktechnik - Übersicht und Grundlagen*. 2010 (siehe S. 16, 31).
- [Fah11] H. J. FAHRENWALDT und V. SCHULER: *Praxiswissen Schweißtechnik*. 4. Aufl. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg Verlag, Friedr. & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 2011 (siehe S. 28, 33).
- [Fri12] A. H. FRITZ und G. SCHULZE: *Fertigungstechnik*. 10. Aufl. Berlin: Springer DE, 2012 (siehe S. 88, 89).
- [Ged87] S. A. GEDEON u. a.: „Measurement of dynamic electrical and mechanical properties of resistance spot welds“. *Welding Journal* (1987), Bd. (66): S. 378–385 (siehe S. 18).
- [Haa94] J. HAATS: *Verfahrensoptimierung beim Kaltpressschweißen artverschiedener korrosionsbeständiger Metalle*. Bd. 305. Fortschrittberichte VDI. Reihe 2, Betriebstechnik. VDI, 1994 (siehe S. 88).
- [Hab14] H. HABERHAUER und M. KACZMAREK: *Taschenbuch der Antriebstechnik*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014 (siehe S. 14).



- [Her08] W. HERM u. a.: „Verfahren und Vorrichtung zum Herstellen einer elektrischen Maschine mit einem Kommutator“. DE 10 2006 046 667 A1. 2008 (siehe S. 29).
- [Her14] H. HERWIG und A. MOSCHALLSKI: *Wärmeübertragung - Physikalische Grundlagen - Illustrierende Beispiele - Übungsaufgaben mit Musterlösungen*. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014 (siehe S. 17).
- [Heu13] T. HEUMANN: *Diffusion in Metallen - Grundlagen, Theorie, Vorgänge in Reinmetallen und Legierungen*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013 (siehe S. 22).
- [Hol67] R. HOLM: *Electric Contacts - Theory and Application*. Springer, 1967 (siehe S. 33, 34).
- [Hun07] S. HUNKLINGER: *Festkörperphysik*. Deutschland: Oldenburg, 2007 (siehe S. 22, 23).
- [Jeg14] A. J. JEGADEESAN; L. KARUNAMOORHTY und N. ARUNKUMAR: „Investigation of hot-staking process parameters and evolution of improvement in joint strength“. *Materials and Manufacturing Processes* (2014), Bd. (just-accepted) (siehe S. 25, 88).
- [Kal11] S. KALPAKJIAN; S. R. SCHMID und E. A. WERNER: *Werkstofftechnik*. 5., aktual. Aufl. Always learning. München: Pearson Studium / Pearson Education, 2011 (siehe S. 91).
- [Ket16] M.-M. KETZEL; J. ZSCHETZSCHE und U. FÜSSEL: „Eliminieren von Spannungsmessfehlern infolge hoher veränderlicher Ströme beim Widerstandsschweißen“. *Schweißen und Schneiden, Düsseldorf* (2016), Bd. 68(11): S. 730–734 (siehe S. 18, 19, 41).
- [Kön13] W. KÖNIG: *Fertigungsverfahren 1: Drehen, Fräsen, Bohren*. 7. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013 (siehe S. 75).
- [Lan12] O. LANIER: „Kontaktwiderstandsmodell für die Simulation des Fügens durch Widerstandserwärmen“. Diss. Stuttgart: Universität Stuttgart, 2012 (siehe S. 29).
- [Laz16] M. LAZZARA: *Tribologisches Verhalten der Kolbenbolzenlagerung*. SpringerLink : Bücher. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016 (siehe S. 46).





- [Mae01] R. G. MAEV und A. PTCHELINTSEV: „Monitoring of pulsed ultrasonic waves’ interaction with metal continuously heated to the melting point“. *Review of Progress in Quantitative Non-destructive Evaluation: Volume 20* (2001), Bd. (557): S. 1517–1524 (siehe S. 20).
- [Mes15] D. MESCHEDE: *Gerthsen Physik*. 25. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, 2015 (siehe S. 84).
- [Met98] N. METZEN und U. MATUSCHEK, Hrsg.: *Qualitätssicherung beim Widerstandsschweißen durch Erfassen und Überwachen von Schweißdaten*. 1998 (siehe S. 18).
- [MPA11] MPA STUTTGART, Hrsg.: *Grundlegende Untersuchung zur Kontaktsituation beim Widerstandsschweißen von Kupferwerkstoffen: Schlussbericht*. 2011 (siehe S. 33).
- [Mül14] G. MÜLLER und B. PONICK: *Grundlagen elektrischer Maschinen*. 10. Aufl. Wiley-VCH Verlag GmbH, 2014 (siehe S. 12).
- [Off03] K. OFFTERDINGER: „Online Prozesssicherung beim Widerstandsschweißen mit Ultraschall“. Diss. Universität des Saarlandes, 2003 (siehe S. 20).
- [Per14] PEREZ REGALADO, WALDO JOSUE: „Ultrasonic real-time quality monitoring of aluminum spot weld process“. (2014), Bd. (siehe S. 20).
- [Pri02] H. PRIES und I. MARTINEK: *Forschungsvorhaben AiF-Nr. 12494 BG: Untersuchung zum ultraschallunterstützten Kaltpressschweißen für Anwendungen in der Kleinteilfertigung*. 2002 (siehe S. 88).
- [Rau04] G. RAU und R. STRÖBEL: *Die Metalle - Werkstoffkunde mit ihren chemischen und physikalischen Grundlagen*. 19. Aufl. München: Neuer Merkur GmbH, 2004 (siehe S. 77).
- [Rob01] ROBERT BOSCH GMBH: *Lackisolierte Runddrähte Grad 1 Klasse 200 (interne Spezifikation)*. 2014-10-01 (siehe S. 31, 86).
- [Rob16] ROBERT BOSCH GMBH: *Präsentation des Geschäftsbereiches Electrical Drives*. 2016 (siehe S. 5).
- [Roo14] E. ROOS und K. MAILE: *Werkstoffkunde für Ingenieure - Grundlagen, Anwendung, Prüfung*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014 (siehe S. 63).



- [Sba99] F. SBALCHIERO und G. PAZZANESE: „A systematic approach to process control in commutator fusing“. *Practical approach to fusing*. Hrsg. von R. T. CARTWRIGHT. Electrical Electronics Insulation Conference and Electrical Manufacturing amp. 1999: S. 585–589 (siehe S. 31).
- [Sch90] P. M. SCHÄFER: „Qualifizierung des Widerstandspressschweißens mit Gleichstrom zum Fügen von Hakenkollektoren mit lackisolierten Kupferdrähten“. Diss. Universität Stuttgart, 1990 (siehe S. 25, 28).
- [Sch03] G. SCHMITZ: *Mechatronik im Automobil II - aktuelle Trends in der Systementwicklung für Automobile*. 1. Aufl. Renningen: expert, 2003 (siehe S. 5, 6, 12).
- [Sch10a] K. SCHON: *Stoßspannungs- und Stoßstrommesstechnik: Grundlagen - Messgeräte - Messverfahren*. Springer, 2010 (siehe S. 40).
- [Sch10b] G. SCHULZE: *Die Metallurgie des Schweißens: Eisenwerkstoffe - Nichteisenmetallische Werkstoffe*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010 (siehe S. 21, 23).
- [Sch86a] R. SCHWAB: „Ein Rechenprogramm zur numerischen Temperaturfeldberechnung beim Widerstandsschweißen unter besonderer Berücksichtigung von Transformator Kennlinie, Stromflußverteilung und thermoelektrischen Effekten“. *Schweißen und Schneiden, Düsseldorf* (1986), Bd. 38/1: S. 22–25 (siehe S. 30).
- [Sch86b] R. SCHWAB: „Numerische Berechnung von Temperaturen beim Widerstandsschweißen am Beispiel des Kollektorschweißens“. *Schweißen und Schneiden, Düsseldorf* (1986), Bd. 38/8: S. 365–369 (siehe S. 30).
- [Sch84] R. SCHWAB: „Untersuchung und Optimierung des Hot-Staking-Verfahrens zur Widerstandspressschweißung von Kollektorelektromotoren“. Diss. Stuttgart: Universität Stuttgart, 1984 (siehe S. 30).
- [Sla99] P. G. SLADE: *Electrical Contacts - Principles and Applications*. Boca Raton, Fla: CRC Press, 1999 (siehe S. 33, 34).
- [Som15] M. SOMMER: „Evaluation und Aufbau eines Messsystems zur Erfassung der Parameter eines thermischen Kontaktierprozesses“. Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie, 2015 (siehe S. 41, 43, 47).



- [Stö06] H.-D. STÖLTING und E. KALLENBACH: *Handbuch elektrische Kleinantriebe*. 3. Aufl. München: Hanser, 2006 (siehe S. 11).
- [Sub04] D. SUBRAMANIAN u. a.: „Real time monitoring and quality control of resistance spot welds using voltage, current, and force data“. *Electro/Information Technology Conference, 2004. EIT 2004. IEEE* (2004), Bd.: S. 211–220 (siehe S. 18).
- [Tip15] P. A. TIPLER und G. MOSCA: *Physik*. 7. Aufl. Springer Spektrum, 2015 (siehe S. 16).
- [Wei13] J. WEIDAUER: *Elektrische Antriebstechnik: Grundlagen, Auslegung, Anwendungen, Lösungen*. 3. Aufl. Publicis Publishing, 2013 (siehe S. 13, 15).
- [Wol16] M. WOLFF: *Sensor-Technologien - Band 1: Position, Entfernung, Verschiebung, Schichtdicke*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2016 (siehe S. 42).
- [RuX12] L. RU-XIONG: „Quality monitoring of resistance spot welding based on process parameters“. *Energy Procedia* (2012), Bd. 14: S. 925–930 (siehe S. 20).
- [Yea01] W. YEADON und A. YEADON: *Handbook of Small Electric Motors*. McGraw Hill Professional (Madison), 2001 (siehe S. 7).

## Danksagung

---

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit bei der Robert Bosch GmbH, in der Arbeitsgruppe für elektrische Verbindungstechnik des Geschäftsbereichs *Electrical Drives*. Die universitäre Betreuung wurde von Prof. Dr.-Ing. Jürgen Wilde, Inhaber der Professur für Aufbau- und Verbindungstechnik am Institut für Mikrosystemtechnik (IMTEK) der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, übernommen.

Herr Prof. Dr.-Ing. Wilde bin ich zum Dank verpflichtet, da mir seine Unterstützung und Hilfestellungen jederzeit sicher waren. Die regelmäßigen und häufigen Rücksprachen vor Ort haben sehr zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Herrn Prof. Dr. Claas Müller, Inhaber der Professur für Prozesstechnologie am Institut für Mikrosystemtechnik (IMTEK) der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Besonderer Dank gilt auch meinem Abteilungsleiter Dr. Horst Callies sowie den beiden Gruppenleitern der TEF11 innerhalb der drei Jahre, Ralf Schmidt und Jürgen Herp, für die vielen Ratschläge auf den unterschiedlichsten Gebieten und die Unterstützung meines Projektes über die gesamte Laufzeit. Diese Unterstützung erhielt ich auch von meiner Arbeitsgruppe. Hierfür danke ich Andreas Friedmann, Edgar Seiler-Wegner, Dr. Thomas Devermann, Dr. Ekine Aristizabal Tolosa, Dr. Ann-Kristin Burger und Sigrid Herb recht herzlich für die unzähligen Diskussionen, Erläuterungen, Ideen und sonstigen Hinweise aller Art. Ein weiterer Dank gebührt Marco Sommer und Andreas Zürcher für die verlässliche Unterstützung bei verschiedensten Tätigkeiten und Untersuchungen.

Den Kollegen der Arbeitsgruppe CR/APJ1 bin ich ebenfalls zu Dank verpflichtet. Dr. Friedhelm Günter und Michael Wehle für die Unterstützung bei den Vorbereitungen zur Temperaturmessung und Dr. Tim Pychynski für die reichhaltigen Diskussionen und das Korrekturlesen.



Allen Kollegen der Abteilungen BueP/TEF11 und ED/ECP21 und sämtlichen Doktorandenkollegen bin ich dankbar für die Diskussionen, aber auch für die sehr angenehme Arbeitsatmosphäre.

Abschließend möchte ich mich noch bei meiner Familie und vor allem bei Annabell bedanken. Ohne eure Unterstützung auch in etwas zäheren Phasen wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Danke!

Stefan Heitz



