

Diplomarbeit

Nr.: KFM/04/2019

Konstruktionsmethodische Untersuchungen zur Konzeptentwicklung einer taktilen Spannvorrichtung zur Erhöhung der Prozessstabilität beim Laserschweißen von Dünoblechen im Batteriebau

eingereicht an der Fakultät Kraftfahrzeugtechnik der
Westsächsischen Hochschule Zwickau zur Erlangung des akademischen
Grades eines

Diplomingenieurs (FH)

vorgelegt von: **cand. ing. Kreßner, Richard** geb. am: 11.06.1991

Studiengang Kraftfahrzeugtechnik

Studienschwerpunkt Kraftfahrzeuge/Kraftfahrzeugmechatronik

Auftraggeber: thyssenkrupp System Engineering GmbH, Hohenstein-
Ernstthal, Abteilung: Research and Development / Technikum

Ausgegeben von: Prof. Dr.-Ing. J. Lange

Autorenreferat

Fertige DA noch in der Hochschulbibliothek eintragen!!

<http://bibdoc.hrz.fh->

[zwick-](http://bibdoc.hrz.fh-)

[au.de/uni/neu_allg.php?la=de&type=30&anzahl_creator_name=1&anzahl_publisher_inst=1&date_year=200&description2_lang=eng&jahr_pruef=200&lic](http://bibdoc.hrz.fh-)

Die Elektromobilität spielt eine stetig zunehmende Rolle in der Mobilität von Morgen. Im Regierungsprogramm Elektromobilität steht das Ziel, bis 2020 1.000.000 E-Fahrzeuge auf deutsche Straßen zu bringen. Realisiert werden kann solch ein Vorhaben nur durch die kontinuierliche Verbesserung des gesamten Herstellungsprozesses der dafür benötigten Energiespeicher.

Eine Herausforderung dabei ist die Erhöhung der Prozessstabilität während des Schweißprozesses der Ableiter. E-Fahrzeuge benötigen Batteriepacks, die sich aus mehreren Batteriemodulen zusammensetzen. Ein Batteriemodul wiederum besteht aus mehreren Batteriezellen, die an ihren Ableiterkontakten seriell miteinander verschweißt werden müssen.

[1]

Durch diverse Einflussfaktoren ist der Schweißprozess zum Verbinden der einzelnen Batteriezellen instabil. Ein Haupteinflussparameter ist der Spalt zwischen den zu verschweißenden Ableiterkontakten der Batteriezellen. Diese Diplomarbeit soll sich der Detektion dieses Spaltes widmen. Es sollen Möglichkeiten der Spaltdetektion aufgezeigt und miteinander verglichen werden. Anschließend sollen die so erlangten Ergebnisse in eine Anforderungsliste einfließen, anhand derer ein Konzept für eine Spannvorrichtung zur Spaltdetektion entworfen wird.

Erklärung zur selbständigen Anfertigung der Arbeit

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommene Textstellen, Bilder, Tabellen u.a. sind unter der Angabe der Herkunft kenntlich gemacht.

Weiterhin versichere ich, dass diese Arbeit oder eine ähnliche Arbeit mit in Teilen wesentlicher Inhaltsübereinstimmung noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegt wurde.

Zwickau, am 30.09.2019

.....

Richard Kreßner

Aufgabenstellung WHZ

Westfälische Hochschule Zwickau
Fakultät Kraftfahrzeugtechnik

Zwickau, 03.06.2019

DIPLOMAUFGABE

Nr.: KFM/04/2019
für Herrn cand. ing. Richard Kreßner
Studiengang Kraftfahrzeugtechnik /
Studienschwerpunkt Kraftfahrzeugtechnik/Kraftfahrzeugmechatronik

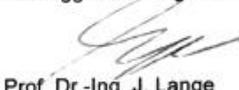
Tag der Ausgabe: 03.06.2019
Abgabetermin: 01.10.2019
Tag der Abgabe:
Ausgegeben durch: Prof. Dr.-Ing. J. Lange
Betreuer der WHZ: Prof. Dr.-Ing. J. Lange, Prof. Dr.-Ing. S. Weis
Betreuer des Auftraggebers: Dipl.-Ing. Ranft, ThyssenKrupp System Engineering GmbH

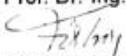
Thema:
Konstruktionsmethodische Untersuchungen zur Konzeptentwicklung einer taktiven Spannvorrichtung zur Erhöhung der Prozessstabilität beim Laserschweißen von Dünnblechen im Batteriebau

Teilaufgaben:

- Erstellen einer Situationsanalyse zu Methoden der Spaltdetektion
- Definieren der Grenzparameter einer korrekten Schweißung
- Aufstellen einer Anforderungsliste für die Spannvorrichtung
- Erarbeiten eines Konzeptes als 3D-Modell

Für die Anfertigung der Diplomarbeit sind die Richtlinien der Fakultät Kraftfahrzeugtechnik zu beachten. Wenn sich die Notwendigkeit ergibt, kann der Umfang der Aufgabenstellung vom ausgebenden Professor erweitert oder eingeschränkt werden. Veröffentlichungen über den Inhalt der Diplomarbeit dürfen, sofern die Arbeit mit einem Sperrvermerk versehen wird, nur mit Zustimmung des Auftraggebers vorgenommen werden.


Prof. Dr.-Ing. J. Lange


Prof. Dr.-Ing. F. Forbrig
Vorsitzender des Prüfungsausschusses

Hier Original einbinden

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
Inhaltsverzeichnis	I
Verzeichnis der Bilder	IV
Verzeichnis der Tabellen	VI
Verzeichnis der Anlagen	VI
Kurzzeichenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
2 Situationsanalyse	2
2.1 Präzisierung der Aufgabenstellung	2
2.2 Einflussparameter auf den Laserschweißprozess	3
2.2.1 Steuerbare Einflussparameter	3
2.2.2 Nicht Steuerbare Einflussparameter	4
2.3 Geplante Methoden und Vorgehen zur Problemlösung	5
3 Stand der Technik	6
3.1 Produktionsprozess eines Batteriepacks	6
3.2 Laserschweißen im Batteriebau	8
3.2.1 Wärmeleitungsschweißen	9
3.2.2 Tiefschweißen	9
3.3 Elektrische Kontaktierung – AK verschweißen	12
3.4 Biegen der Ableiterkontakte	15
3.5 Fertigungsmittel Vorrichtung	17
4 Methoden der Spaltdetektion	20
4.1 Direkte Spaltdetektion	21
4.2 Indirekte Spaltdetektion	23
5 Gewählte Methode – Indirekte Spaltdetektion	24

6	Vorversuche zur Definition des Grenzparameters – Spalthöhe	27
6.1	Versuchsaufbau – Spalthöhe	28
6.2	Versuchsdurchführung – Spalthöhe	31
6.3	Versuchsauswertung – Spalthöhe	33
6.3.1	Auswertung mittels Thermografie	33
6.3.2	Auswertung mittels Zugversuche	36
6.3.3	Zusammengefasste Auswertung Thermografie und Zugversuch	38
7	Vorversuche zur Definition des Grenzparameters – Spannkraft	42
7.1	Versuchsaufbau – Spannkraft	43
7.2	Versuchsdurchführung – Spannkraft	45
7.3	Versuchsauswertung – Spannkraft	47
7.3.1	Auswertung mittels elektronischer Druckmessfolie	47
7.3.2	Auswertung mittels Makroaufnahmen	49
7.3.3	Zusammengefasste Auswertung Makroaufnahmen und elektronische Druckmessfolie	50
8	Definierte Grenzparameter aus Vorversuchen	53
9	Methodisches Konstruieren nach VDI 2221 und VDI 2222	54
9.1	Anforderungsliste	56
9.2	Ermitteln einzelner Funktionen und deren Strukturen	58
9.3	Prinzipielle Lösungen der Funktionsstrukturen	59
9.3.1	Bestimmen und Spannen der SV auf dem Maschinentisch	60
9.3.2	Bestimmen und Spannen des Batteriemoduls in der SV	60
9.3.3	Spannen der AK durch definierte Niederhaltergeometrie	61
9.3.4	Ausgabe der Spannkraft	61
10	Konzept einer taktilen Spannvorrichtung	62
10.1	Morphologischer Kasten	62
10.2	Spannvorrichtungsvariante I	63
10.3	Spannvorrichtungsvariante II	64
10.4	Variantenbewertung	65
10.5	Ausgewähltes Konzept	66

11	Vorschläge für weiterführende Arbeiten	69
12	Zusammenfassung	70
	Quellenverzeichnis	71
	Anhang	

Verzeichnis der Bilder

<u>Bild</u>	<u>Titel</u>	<u>Seite</u>
Bild 1:	Schematischer Aufbau eines Batteriemoduls [3]	1
Bild 2:	Ursachen-Wirkungs-Diagramm Einflussparameter auf das Laserschweißen [4, 5]	3
Bild 3:	Vorgehen zur Konzeption einer taktilen Spannvorrichtung	5
Bild 4:	Verschiedene Zelltypen von Lithium-Ionen-Akkumulatoren [6]	6
Bild 5:	Prozessschritte zur Herstellung eines Batteriepacks [8 S.3]	7
Bild 6:	Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 [9]	8
Bild 7:	Schematische Darstellung von Wärmeleit- und Tiefschweißen [11]	9
Bild 8:	Schema Schweißprozess – Laserstrahlerzeugung bis Schweißvorgang	10
Bild 9:	Schematischer Aufbau eines Diodengepumpten Scheibenlasers nach [13]	10
Bild 10:	Prinzip der Schwingspiegeloptik für zweidimensionales Auslenken [16 S. 95]	11
Bild 11:	Spannvorrichtung während Druckverteilungstest an einem 27 Zeller Batteriemodul [18]	13
Bild 12:	Gebogene AK in SV und schematische Darstellung	15
Bild 13:	Einteilung von Vorrichtungen nach [23 S. 2]	18
Bild 14:	Mögliche Bewegungen eines Werkstückes in einem dreidimensionalen Koordinatensystem [23 S. 15]	19
Bild 15:	Möglichkeit der Spaltdetektion mittels Durchlichtverfahren [26]	21
Bild 16:	Möglichkeit der Spaltdetektion mittels Auflichtverfahren [27]	22
Bild 17:	Konzept Versuchsvorrichtung Kraft-Spalt Ermittlung	24
Bild 18:	Tekscan Druckmessfolie – Sensor Typ 5076	26
Bild 19:	Tekscan Software Oberfläche	26
Bild 20:	Fehlerhafte Verschweißung durch zu großen Schweißspalt	27
Bild 21:	Schematische Darstellung des Spotdurchmessers in Abhängigkeit der Brennweite	28
Bild 22:	Innerer Aufbau ABL mit SV	29
Bild 23:	Schematische Darstellung des inneren Versuchsaufbaus	29
Bild 24:	Künstlich erzeugter Spalt zwischen Ober- und Unterblech	30

Bild 25: Referenzprobe nach Zugversuch	33
Bild 26: Ausschnitt Auswertungsdokument der Thermografie	34
Bild 27: Gemittelte angebundene Fläche in Abhängigkeit der Spalthöhe	35
Bild 28: Nahtversagen und Materialversagen infolge des Zugversuches	36
Bild 29: Gemittelte Zugfestigkeit R_m in Abhängigkeit der Spalthöhe	38
Bild 30: Korrelierte Messdaten der Zug- und Thermografieversuche	40
Bild 31: Kategorisierung der Thermografie Messwerte mittels eines festgelegten Grenzwerts	40
Bild 32: Kategorisierung der Zugversuch Messwerte mittels eines festgelegten Grenzwerts	41
Bild 33: Aufbau Prüfstand mit Auswertelektronik	43
Bild 34: Schematische Darstellung des inneren Versuchsaufbaus	43
Bild 35: Aufbau Druckmessfolie mit Prozessfenster	44
Bild 36: Aufnahme des seitlichen Spaltes	44
Bild 37: Spannmasken zur Durchführung der Messversuche	46
Bild 38: Abhängigkeit der belasteten Fläche von der aufgebrachten Druckkraft	47
Bild 39: Verhalten der Spannvariante Blattfeder infolge der Druckkraft	48
Bild 40: Verhalten der Spannvariante Feuerherdt infolge der Druckkraft	49
Bild 41: Abhängigkeit der Spaltlänge zur aufgebrachten Druckkraft	50
Bild 42: Mittelwerte für Spaltlänge und belastete Fläche beider Spannvarianten	51
Bild 43: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren nach VDI 2221 [33]	54
Bild 44: Organigramm der Funktionsstruktur einer taktilen Spannvorrichtung	58
Bild 45: Spannvorrichtung Variante I – Feuerherdt	63
Bild 46: Spannvorrichtung Variante II – Blattfeder	64
Bild 47: Sterngriff mit Nutenstein zum Fixieren der SV auf den Maschinentisch	66
Bild 48: Bestimmen und Spannen des Batteriemoduls in der Spannvorrichtung	67
Bild 49: Niederhalter mit Feuerherdt Federn zum Spannen der Ableiterkontakte	68

Verzeichnis der Tabellen

<u>Tabelle</u>	<u>Titel</u>	<u>Seite</u>
Tabelle 1:	Rückfederungsfaktor k_R zur Berechnung der Rückfederung [20]	16
Tabelle 2:	Prozessparameter Schweißversuche	31
Tabelle 3:	Versuchsplan zur Ermittlung der Spalthöhe	32
Tabelle 4:	Auswertung der Schweißnähte mittels Thermografie	34
Tabelle 5:	Auswertung der Schweißnähte mittels Zugversuch	37
Tabelle 6:	Einzelne Messwerte der Thermografie- und Zugversuche	39
Tabelle 7:	Zusammengefasste Versuchswerte mit deren Grenzwert	39
Tabelle 8:	Versuchsplan zur Ermittlung der Spannkraft	45
Tabelle 10:	Prozessparameter aus Vorversuchen	53
Tabelle 11:	Anforderungsliste – Taktile Spannvorrichtung [34]	56
Tabelle 12:	Konzepte zum Bestimmen und Spannen auf dem Maschinentisch	60
Tabelle 13:	Konzepte zum Bestimmen und Spannen des Batteriemoduls in der SV	60
Tabelle 14:	Konzepte zum Spannen der AK	61
Tabelle 15:	Konzepte zur Ausgabe der Spannkraft	61
Tabelle 16:	Morphologischer Kasten – Taktile Spannvorrichtung	62
Tabelle 17:	Variantenbewertung nach VDI 2225 [35]	65

Verzeichnis der Anlagen

<u>Anlage</u>	<u>Titel</u>	<u>Seite</u>
Anlage 1	Datenblatt TruDisk5001	A1
Anlage 2	Datenblatt OPF 3D	A2
Anlage 3	Berechnung Streckenenergie und Fokusdurchmesser	A3
Anlage 4	Auswertung PDF Thermografie	A4
Anlage 5	Mögliche Nahtfehler	A13
Anlage 6	CD: CAD Daten	

Kurzzeichenverzeichnis

<u>Kurzzeichen</u>	<u>Einheit</u>	<u>Bedeutung</u>
$A_{\text{angeb.}}$	mm^2	Angebundene Fläche
d_0	mm	Fokusbildungsdurchmesser
d_k	μm	Durchmesser LLK
E_1	eV	Grundzustand des Energieniveaus
E_2	eV	Angeregter Zustand des Energieniveaus
f	mm	Brennweite
F	N	Druckkraft
$F_{\text{opt.}}$	N	Optimale Spannkraft
$F_{\text{opt.V1}}$	N	Optimale Spannkraft Spannvariante 1
$F_{\text{opt.V2}}$	N	Optimale Spannkraft Spannvariante 2
$F_{\text{sp max}}$	N	Maximale Spannkraft
k	mm	Kollimation
K_R	/	Rückfederungsfaktor
K_{R_Al}	/	Rückfederungsfaktor Al Ableiter
K_{R_Cu}	/	Rückfederungsfaktor Cu Ableiter
P	W	Laserleistung
r_2	mm	Biegeradius am Werkstück
R_m	N	Zugfestigkeit
S	J/m	Streckenenergie
s	mm	Blechdicke der Ableiter
S_h	mm	Spalthöhe
$S_{h \text{ max.}}$	mm	Max. Spalthöhe
S_l	mm	Spaltlänge
S_w	mm	Höhe der Spannanschlüsse an der Schweißvorrichtung
t	$^{\circ}\text{C}$	Grad Celsius
v	mm/s	Vorschubgeschwindigkeit
α_1	$^{\circ}$	Biegewinkel vor Rückfederung

α_{2_Al}	°	Biegewinkel nach Rückfederung Al Ableiter
α_{2_Cu}	°	Biegewinkel nach Rückfederung Cu Ableiter
$\Delta\beta$	°	Winkeldifferenz zwischen den Ableitern
λ	m	Wellenlänge

Abkürzungsverzeichnis

<u>Abkürzung</u>	<u>Bedeutung</u>
ABL	Ableiter schweiß Anlage
AK	Ableiterkontakt
BMS	Batterie Management System
CAD	Computer-aided design
CEO	Chief Executive Officer (geschäftsführendes Vorstandsmitglied)
DMS	Dehnungsmessstreifen
i.O	In Ordnung
Inc.	Incorporated (Zusatz für US-amerikanische Unternehmen mit der Form eines Konzerns)
kWh	Kilo-Watt-Stunden
Li-Ion	Lithium-Ionen
LLK	Lichtleitkabel
M	Mittelwert (mean)
N.i.O	Nicht in Ordnung
PFO	Programmierbare Fokussieroptik
Pos. Nr.:	Positionsnummer
Ref.	Referenz
SPS	Speicher Programmierte Steuerung
Stabw.	Standardabweichung (standard deviation)
SV	Schweißvorrichtung
tkSY	ThyssenKrupp System Engineering
Yb:YAG	Ytterbium-YAG-Laser

1 Einleitung

Mo-bi-li-tät, [die] – Beweglichkeit, in Bezug auf Beruf, soziale Stellung, Wohnsitz. [2]

Ein Thema, welches aktueller kaum sein könnte, ist die Elektromobilität, auch E-Mobilität (Eng. E-Mobility) genannt. Dabei spielt vor allem die Forschung und Entwicklung rund um den Energiespeicher „Batterie“ eine große Rolle. Um die Energiespeicher immer effektiver und leistungsfähiger zu gestalten, muss jeder Prozess in der Herstellung der Speicher optimiert werden. Diese Diplomarbeit befasst sich mit der Erhöhung der Prozessstabilität während des Schweißvorganges der Ableiterkontakte (AK).

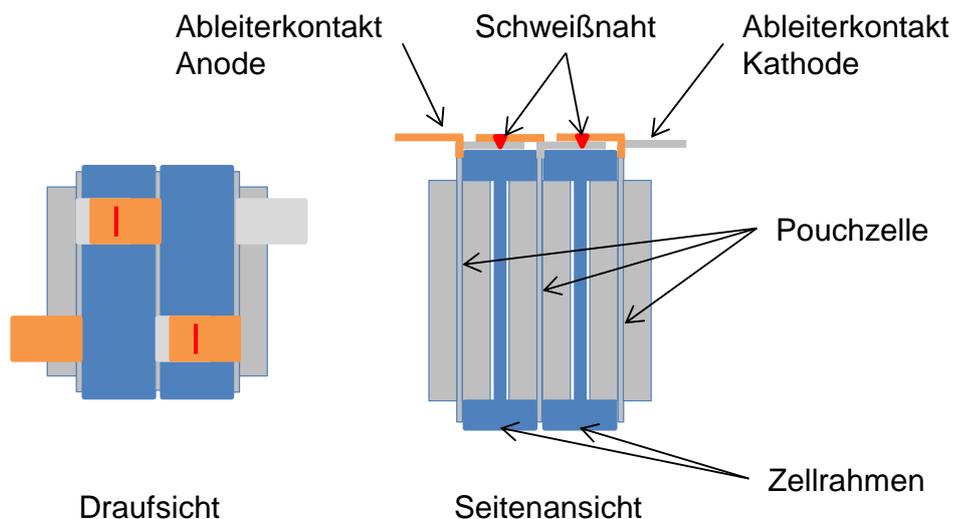


Bild 1: Schematischer Aufbau eines Batteriemoduls [3]

In Bild 1 ist der schematische Aufbau eines Batteriemoduls zu sehen. Ein Batteriemodul besteht aus mehreren, seriell verschweißten Batteriezellen. Jede dieser einzelnen Batteriezellen besitzt zwei AK, eine Anode als Pluspol und eine Kathode als Minuspol. Miteinander verschweißt sorgen diese für den Fluss des Elektrodenstroms. Wichtig bei der Verschweißung ist vor allem die stoffschlüssige Verbindung, um einen geringen Widerstand und somit bessere Leitfähigkeit und eine höhere Effizienz des Energiespeichers zu erreichen.

Durch verschiedene Einflussparameter wie bspw. Spalt oder Schmutz zwischen den AK kommt es häufig zu einer fehlerhaften Verschweißung und somit zum Ausfall des Batteriemoduls. In dieser Arbeit wird sich mit den Einflussparameter auf den Schweißprozess beschäftigt und nach Möglichkeiten gesucht, diese zu detektieren und zu regulieren. Dabei soll durch Versuche der Einfluss von Spalthöhe und Spannkraft auf den Laserschweißprozess untersucht werden und anhand jener Ergebnisse ein Konzept einer taktilen Laserschweißvorrichtung entworfen werden, welche die Prozessstabilität während des Schweißprozesses nachhaltig positiv beeinflusst.

2 Situationsanalyse

Ziel der Diplomarbeit ist die Entwicklung einer taktilen Spannvorrichtung zur Erhöhung der Prozessstabilität beim Laserschweißen von Batteriedünnsblechen. Realisiert werden soll dies durch eine Pre-Prozesskontrolle vor dem eigentlichen Laserschweißprozess. Es soll ein möglicher Zusammenhang zwischen den Spannparametern und dem dabei vorliegenden Spalt gesucht werden. Kann ein solcher Zusammenhang hergestellt werden, sollte es konstruktiv möglich sein, ein System in die Spannvorrichtung zu integrieren, welches einen möglichen Spalt bereits vor dem Laserschweißvorgang detektiert und somit eine fehlerhafte Verschweißung verhindert.

2.1 Präzisierung der Aufgabenstellung

Um die Prozessstabilität während des Laserschweißprozesses durch eine taktilen Laserschweißvorrichtung (SV) zu erhöhen, ist es notwendig, den Laserschweißprozess und dessen Einflussparameter genau zu kennen. Es existiert eine Vielzahl an Einflussparametern, welche die Qualität und Prozessstabilität beeinflussen. Nachfolgend soll auf die relevantesten Einflussparameter eingegangen werden. Diese unterscheiden sich in zwei Kategorien. Zum einen die steuerbaren Einflussparameter, die bereits zu detektierenden und steuern/ regeln sind. Also jene, die durch gezielte Beeinflussung, bspw. durch eine Nachstellung der Laseranlage, verhindert/eingestellt werden können. Zum anderen die nicht steuerbaren Einflussparameter, welche noch nicht in Erwägung gezogen wurden.

Dabei sollen für die Parameter, die bereits detektiert und gesteuert werden können, die jeweiligen Lösungen kurz aufgezeigt werden. Die nicht detektierbaren Parameter sollen definiert und anschließend nach einer Möglichkeit zum Detektieren und Steuern untersucht werden.

2.2 Einflussparameter auf den Laserschweißprozess

Die drei häufigsten Fehlerarten beim Schweißen von AK sind eine fehlerhafte Schweißverbindung durch Verschmutzung, Defokussierung oder unzureichende Nahtvorbereitung. Neben diesen gibt es noch weitere Einflussparameter, welche im Diagramm auf Bild 2 dargestellt sind.

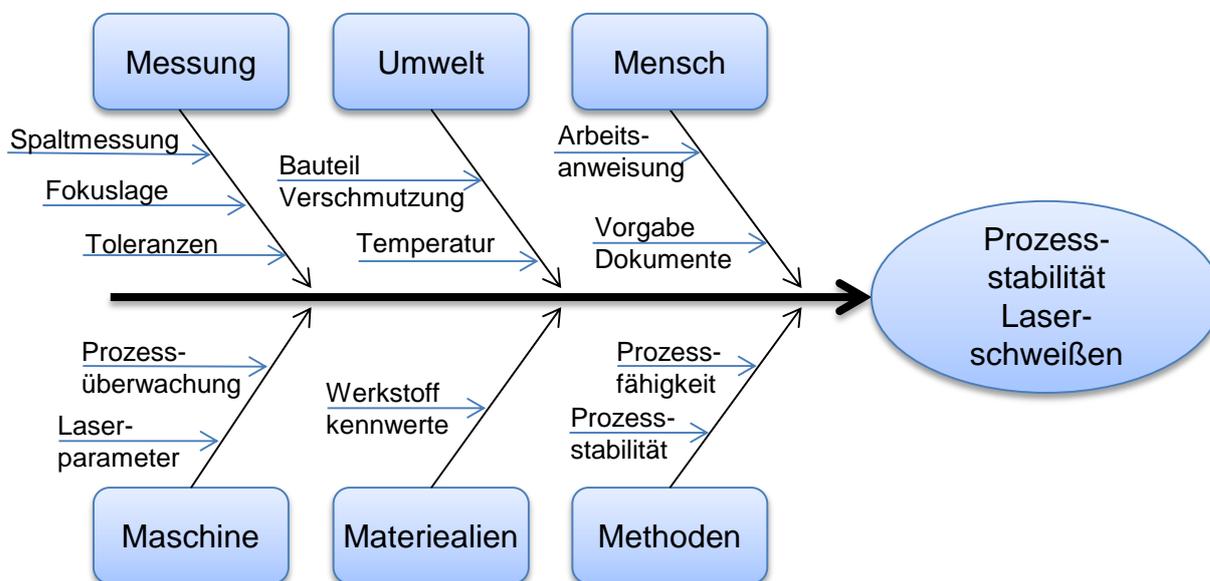


Bild 2: Ursachen-Wirkungs-Diagramm Einflussparameter auf das Laserschweißen [4, 5]

2.2.1 Steuerbare Einflussparameter

Die meisten der im Bild 2 aufgeführten Einflussparameter sind steuerbar. Zwei der drei häufigsten Ursachen für eine fehlerhafte Verschweißung, Verschmutzung und Defokussierung, sind dabei besonders von Interesse.

Verschmutzungen durch Staub, Öl etc., welche den Laserschweißprozess beeinflussen, lassen sich durch vorheriges Reinigen oder durch, regelmäßige Kontrollen der Reinheit der Bauteile sowie eine entsprechende Wareneingangskontrolle vermeiden.

Die Defokussierung kann durch bereits vorhandene Messtechnik diverser Anbieter ermittelt und nachgestellt werden. Aber auch eigene Messsysteme, wie z.B. Triangulation, können den Fokusabstand genau bestimmen und somit eine Defokussierung steuerbar machen.

2.2.2 Nicht Steuerbare Einflussparameter

Jedoch sind nicht alle Einflussparameter steuerbar. Es soll sich mit eben jenem Einflussparametern auseinander gesetzt werden, die nicht detektier- und steuerbar sind.

Um eine hohe Prozessstabilität beim Laserschweißen zu erreichen, ist es nötig, alle Einflussparameter kontrollieren und steuern zu können. Somit muss sich der Detektion und Steuerung des Schweißspaltes angenommen werden, denn eben jener Spalt sorgt häufig für fehlerhafte Verschweißungen. Durch einen zu großen Spalt kann beim Schweißen keine stoffschlüssige Verbindung der beiden AK hergestellt werden. Somit besitzt die Schweißverbindung eine geringe bis keine Anbindungsfläche, einen hohen Widerstand und es kann kaum bzw. kein Elektrodenstrom fließen. Infolgedessen kommt es zu einer fehlerhaften Batteriezelle und dementsprechend einem defekten Batterimodul, welches ausgetauscht werden muss.

Daher sollen in dieser Diplomarbeit die Möglichkeiten zur Spaltdetektion untersucht werden. Anhand der so gewonnenen Erkenntnisse soll ein Konzept einer taktilen Spannvorrichtung entwickelt werden, welche die Prozessstabilität während des Laserschweißvorgangs erhöht.

2.3 Geplante Methoden und Vorgehen zur Problemlösung

Wie eingangs festgestellt wurde, liegt das Problem in der Prozessstabilität des Spannsystems. Ein fehlerhafter Spannvorgang kann zum Spalt führen, der wiederum führt zu einem schlechten bis gar keinen Elektrodenstromfluss.

Um eine Aussage über den zu erwartenden Schweißprozess zu erhalten, benötigt man eine pre-Prozesskontrolle. Dies könnte mittels einer taktilen Spannvorrichtung umgesetzt werden. Wie ein System zur pre-Prozesskontrolle aussehen und funktionieren könnte, ist die Fragestellung dieser Diplomarbeit. Um diese Fragestellung zu klären, ist ein geplantes Vorgehen von Vorteil. Dieses Vorgehen wird im unterstehenden Bild 3 näher beschrieben.



Bild 3: Vorgehen zur Konzeption einer taktilen Spannvorrichtung

3 Stand der Technik

3.1 Produktionsprozess eines Batteriepacks

Wie in der Einleitung bereits beschrieben, ist es wichtig, die E-Fahrzeuge mit einer hohen Reichweite auszustatten. Um eine hohe Reichweite bei niedrigen Produktionskosten zu gewährleisten, ist es notwendig, jeden Prozessschritt in der Herstellungskette zu optimieren. In Bild 4 sind die drei gängigsten Zelltypen abgebildet. Unabhängig vom Aussehen ist der Fertigungsprozess annähernd gleich. Neben der Flach- / Pouchzelle gibt es noch die Rundzelle, die am weitesten verbreitet ist.



Bild 4: Verschiedene Zelltypen von Lithium-Ionen-Akkumulatoren [6]

Im Fahrzeugbau werden überwiegend Pouch- oder Prismatische Zellen eingesetzt. Die Rundzellen hingegen werden in fast allen handelsüblichen batteriebetriebenen Gegenständen, wie Werkzeugen, Notebooks usw. verbaut. Außerdem werden Rundzellen auch in den E-Fahrzeugen von OEM Telsa eingesetzt. [7]

In der vorliegenden Diplomarbeit wird sich mit der Pouchzelle befasst. Die Herstellung eines Batteriepacks kann in drei Fertigungsschritte unterteilt werden, die der Batteriezelle, des Batteriemoduls und des Batteriepacks. Diese drei Hauptprozesse werden nochmals in mehrere Teilprozesse aufgesplittet.

Die Fertigung der Batteriezelle ist in drei Unterkategorien und 13 Prozessschritte aufgeteilt:

- Elektrodenfertigung (6 Prozessschritte)
- Zellaussammlung (4 Prozessschritte)
- Formation und Aging (3 Prozessschritte)

Die Fertigung des Batteriemoduls ist in 5 Prozessschritte aufgeteilt:

- Vormontage Zellmodule
- Isolierung und Verspannung
- Elektrische Kontaktierung → AK verschweißen
- Montage Batterie Management System (BMS)
- Montage Schlussplatte und Prüfung

Und die Fertigung des Batteriepacks ist in 6 Prozessschritte aufgeteilt:

- Einsetzen der Zellmodule
- Befestigung der Zellmodule
- Elektrische und thermische Integration
- Schlussplatte und Dichtheitsprüfung
- Laden und Flashen
- End of Line – Finale Prüfung

In Summe sind somit 24 Prozessschritte von der Elektrodenfertigung bis zur finalen Prüfung des einbaufertigen Batteriepacks notwendig.

Um ein Gefühl für die Wichtigkeit einer korrekten Verschweißung zu bekommen, ist der Produktionsprozess anhand eines Flussdiagrammes dargestellt. Wie im Bild 5 zu sehen, findet das Verschweißen der AK in einem späten Stadium der Wertschöpfungskette statt. Sofern die Nacharbeit/ das Nachschweißen bereits erfolglos war, müssen die beiden Zellen aus dem Batteriepack entfernt und entsorgt werden. Daraus resultieren hohe Folgekosten. [8 S. 6]

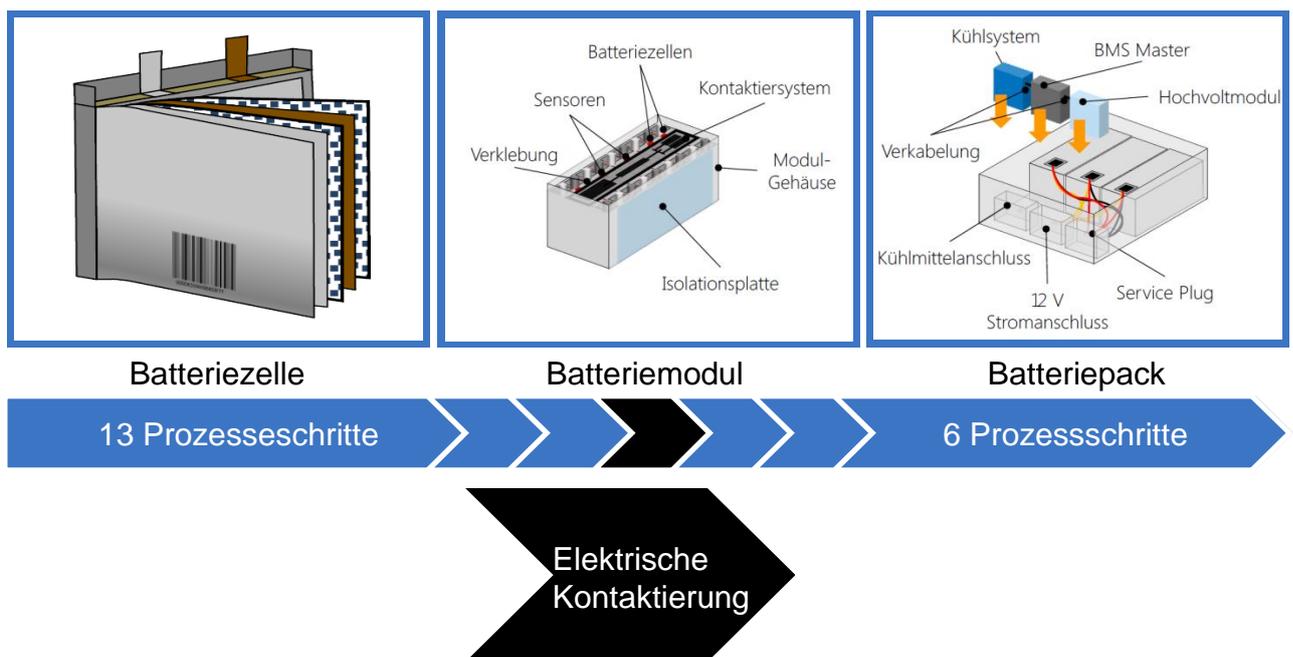


Bild 5: Prozessschritte zur Herstellung eines Batteriepacks [8 S.3]

3.2 Laserschweißen im Batteriebau

Zum Verschweißen der AK der Pouchzellen kommt das Laserschweißen zum Einsatz. Laserschweißen bietet diverse Vorteile gegenüber den herkömmlichen Schweißverfahren. Schweißen an sich ist ein Fertigungsverfahren, welches nach DIN 8580 in 6 Hauptgruppen unterteilt wird. Wie in Bild 6 zu sehen, gehört das Laserschweißen dabei der vierten Hauptgruppe, dem Fügen nach DIN 8593, an. Die Zugehörigkeit des Laserschweißens, speziell des Schmelzverbindungsschweißens, welches im Fall der Verschweißung der AK Verwendung findet, ist im untenstehenden Organigramm grün hervorgehoben.

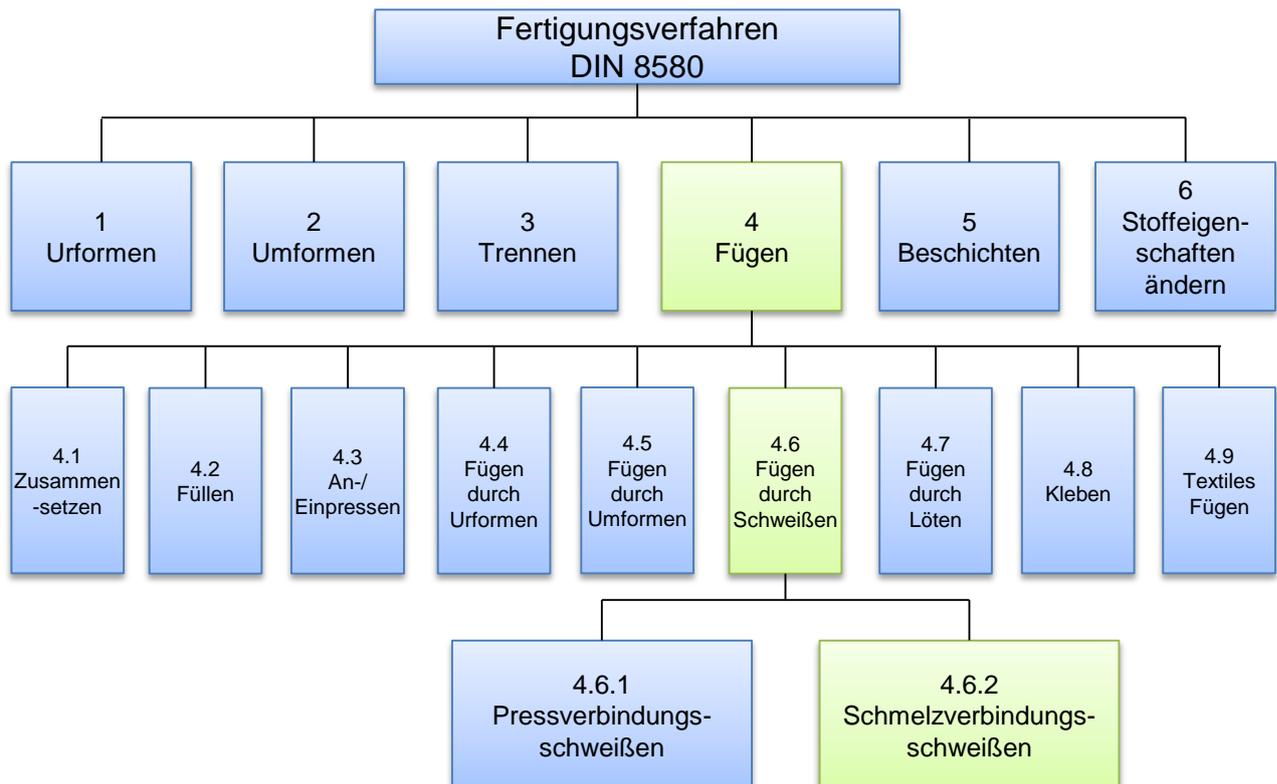


Bild 6: Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 [9]

Durch das Fügen von zwei Bauteilen wird eine lösbare- oder nichtlösbare Verbindung geschaffen. Im Falle des Schweißens der AK einer Batteriezelle handelt es sich um Fügen durch Schweißen nach DIN 8593. Der Stoffschluss zum Erzeugen einer Schmelzverbindung wird dabei durch das Einbringen von Energie mittels Laser geschaffen. [9]

Beim Laserschweißen wird nochmals in zwei verschiedene Methoden des Schweißens unterschieden. Zum Einen das Wärmeleitungsschweißen und zum Anderen das Tiefschweißen. Bei beiden Methoden ist der Schweißspalt eine wichtige Einflussgröße. Anzustreben ist dabei ein sogenannter „Nullspalt“. Dieser gewährleistet eine Dauerhafte, Stoffschlüssige Schweißverbindung mit geringem Widerstand.

3.2.1 Wärmeleitungsschweißen

Beim Wärmeleitungsschweißen wird der Werkstoff durch die Energie des Laserstrahles über seine Schmelztemperatur erhitzt, jedoch unterhalb seiner Verdampfungstemperatur. So entsteht kein merklicher Dampfdruck im Schmelzbad, siehe Bild 7 auf Seite (XX). Die Geometrie des Schmelzbades und die Tiefe dessen hängen dabei von mehreren Faktoren ab. Es spielen vor allem der Werkstoff, die Werkstückgeometrie und die Eigenwärme eine wichtige Rolle. Wesentlicher Vorteil des Wärmeleitschweißens ist eine ausgezeichnete Nahtqualität, aufgrund des ruhigen und stabilen Schweißvorgangs. [10 S. 253]

3.2.2 Tiefschweißen

Im Vergleich zum Wärmeleitungsschweißen wird beim Tiefschweißen die Werkstücktemperatur durch die vom Laser eingebrachte Energie über die Verdampfungstemperatur erhitzt. Durch den dabei entstehenden Metalldampf bildet sich ein Dampfkanaal (auch Keyhole oder Dampfkapillare genannt) innerhalb der Schmelze. Zu sehen ist dieser Effekt im Bild 7. Genau jener Effekt wird in der Literatur und auch in der DIN 32511 als Tiefschweißen bezeichnet. Vorteile des Tiefschweißens sind vor allem die damit erzeugbaren Schachtverhältnisse, also das Verhältnis von Nahttiefe zu Nahtbreite. Diese können im Bereich von 10:1 und größer liegen. [10 S. 257]

Beim Wärmeleitungs- und Tiefschweißen kann nochmals in zwei Arten unterschieden werden. Zum einen das Einschweißen, zum anderen das Durchschweißen. Im Falle der Verschweißung der vorliegenden AK findet das Tiefschweißen mittels Einschweißen Anwendung. Vorteil dabei ist vor allem die Unversehrtheit des Unterlage. Dies muss gegeben sein, da sich unter dem Unterblech der Zellrahmen mit Pouchzelle befindet, welche zwingend vor Beschädigungen durch Laserstrahlen geschützt werden müssen.

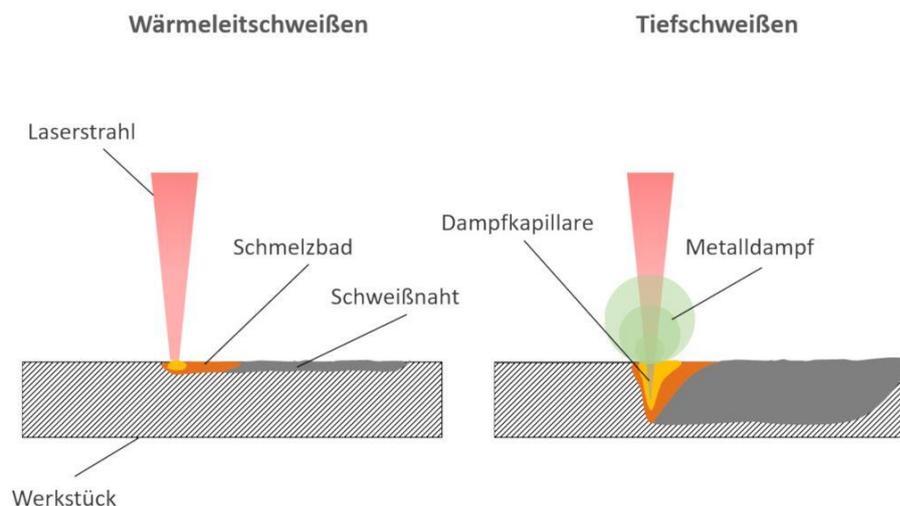


Bild 7: Schematische Darstellung von Wärmeleit- und Tiefschweißen [11]

Im Anwendungsfall dieser Diplomarbeit werden die AK mittels Tiefschweißen dauerhaft gefügt.

Wie der dafür benötigte Laserstrahl erzeugt, geführt und auf die zu schweißenden AK punktgenau gebündelt wird, ist in Bild 8 schematisch dargestellt.

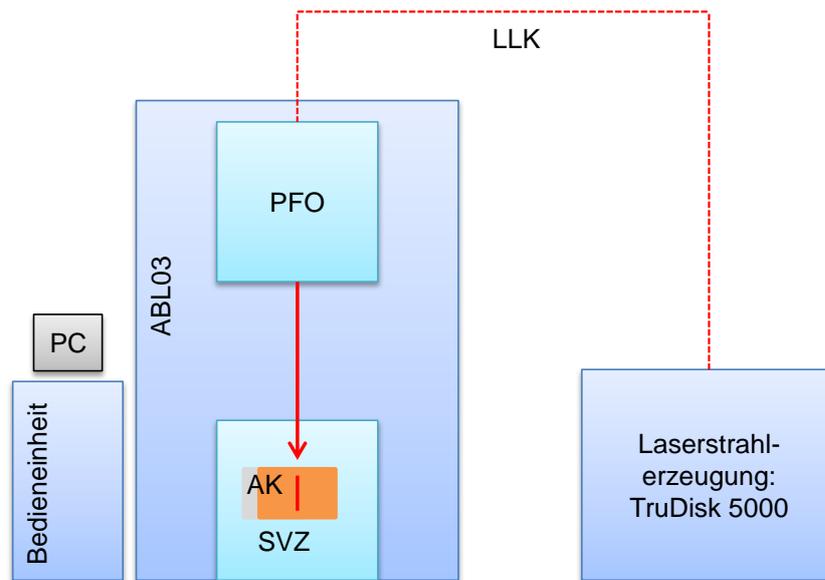


Bild 8: Schema Schweißprozess – Laserstrahlerzeugung bis Schweißvorgang

Laserstrahlerzeugung – TruDisk5001

Der Laserstrahl wird in diesem Fall mittels eines TruDisk5001 erzeugt. Dieser ist ein sogenannter Diodengepumpter Festkörperlaser, also das aktive Medium, welches durch beschießen mit Energie (in Form von Licht aus Dioden) den Laserstrahl erzeugt, ist ein kristalliner oder glasartiger scheibenförmiger Festkörper. Die Entstehung von Laserlicht erfolgt durch induzierte Emission von Strahlung. Um den Effekt der induzierten Emission hervorzurufen ist ein bestimmter schematischer Aufbau notwendig, welcher in Bild 9 zu sehen ist.

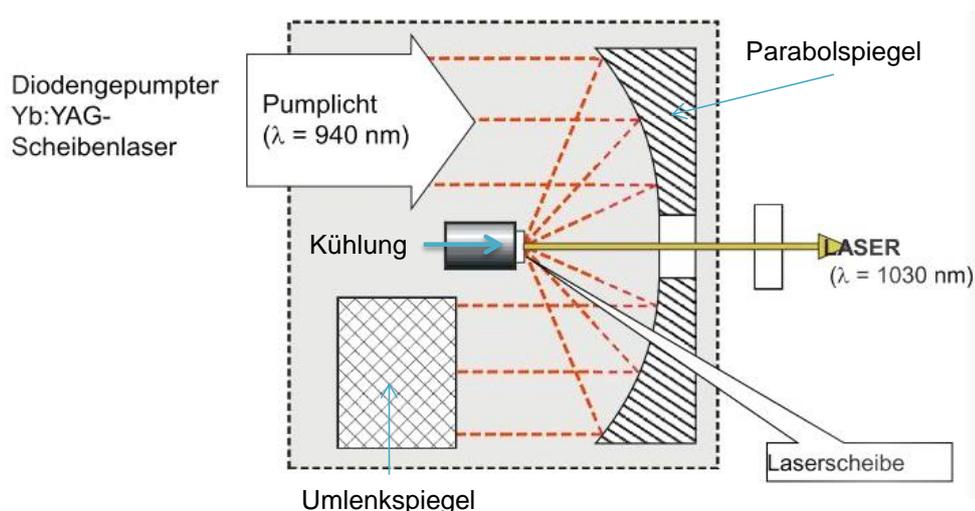


Bild 9: Schematischer Aufbau eines Diodengepumpten Scheibenlasers nach [13]

Die genauen Kenndaten der Laseranlage, speziell der Laserlichterzeugung, können dem Datenblatt des Lasers Anlage 1 im Anhang entnommen werden. [14]

Laserstahlleitung – Trumpf LKD

Im Fall der Ableiterschweißanlage (ABL) von tk SY ist die Laserstrahlerzeugung und die Laserstrahlverwendung örtlich voneinander getrennt. Somit muss der Laserstrahl transportiert werden, was über ein optisches Lichtleitkabel (folgend LLK genannt) realisiert wird. Dieses LLK besitzt einen Kern aus Quarzglas (SiO_2) in einem definierten Durchmesser, in diesem Anwendungsfall von $75 \mu\text{m}$. Umhüllt ist dieser innere Kern nochmals mit einem anderen Quarzglas und abschließend mit einer dicken widerstandsfähigen Kunststoffummantelung. Diese Ummantelung schützt das LLK vor äußeren Einflüssen und Zerstörung und sorgt für eine Verlegung der LLK von der Laserstrahlerzeugung bis in den Schweißbereich. [15 S. 245]

Programmierbare Fokussieroptik – PFO 3D

Das LLK ist im Inneren der ABL direkt an eine programmierbare Fokussieroptik (PFO) gekoppelt. Die PFO ist eine Scanneroptik zum Remoteschweißen- und schneiden. Vorteil einer solchen Optik sind die, im inneren verbauten, orthogonal angeordneten Schwingspiegel, die es ermöglichen jegliche Bahnen in X- und Y-Richtung, in einem definierten Bearbeitungsfenster, auf dem Bauteil zu erzeugen. In Bild 10 ist der schematische Aufbau einer solchen Scanneroptik dargestellt. Genaue technische Daten können dem Datenblatt im Anlage 2 im Anhang entnommen werden.

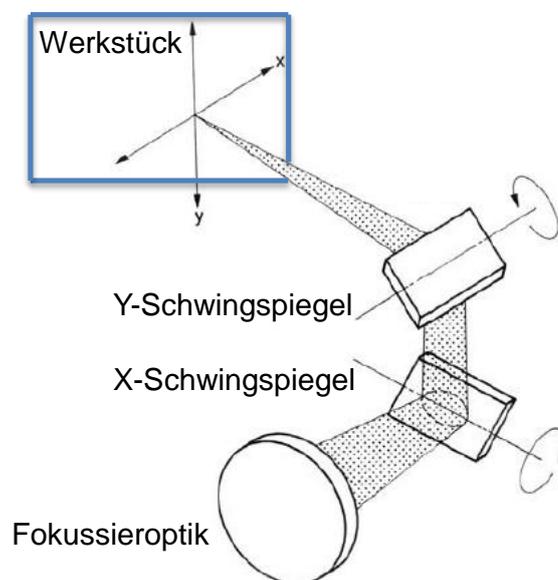


Bild 10: Prinzip der Schwingspiegeloptik für zweidimensionales Auslenken [16 S. 95]

Durch diese Schwingspiegel ist es möglich, Schweißnähte zu erzeugen während die Fokussieroptik und die Spannvorrichtung keine relative Bewegung zueinander ausführen. Vorteil dabei sind vor allem schnelle Schweißvorgänge und keine störenden Vibrationen infolge der Bewegung des Maschinentisches oder der Optik. Bauteile können somit einfach auf den Nutentisch der ABL gelegt werden und es bedarf keiner besonderen Spannkraft um diese in ihrer Position zu fixieren. [17]

3.3 Elektrische Kontaktierung – AK verschweißen

Bei der elektronischen Kontaktierung stehen die Verbindungen von Blechen < 0,5 mm Materialstärke im Fokus. Bei den AK der Pouchzellen handelt es sich um Batteriedünobleche aus Aluminium und Kupfer mit einer Materialstärke von 0,3 mm. Im Kapitel (2.1.1) Herstellung eines Batteriepacks wurde die Herstellung eines Batteriepacks und die dafür notwendigen Prozessschritte bereits beschrieben. Dabei war die Beschreibung eher allgemein gehalten was die Arten der Zelltypen betrifft. Im Folgenden wird sich mit der Prozessbeschreibung des AK Schweißens einer Pouchzelle befasst. Unten abgebildet ist die Reihenfolge der Prozessschritte für die elektronische Kontaktierung. Diese sind abhängig vom Zelltyp, Batterietyp und verschiedenen Kundenanforderungen. Somit können je nach Anwendungsfall weitere Prozessschritte hinzukommen oder wegfallen. Im hier vorliegenden Fall wird die elektronische Kontaktierung der AK einer Pouchzelle in folgende 6 Prozessschritte unterteilt:

1. Einlegen des Batteriemoduls in die SV
2. Verspannen des Batteriemoduls in der Spannvorrichtung
3. Umbiegen der AK
4. Auflegen der Spannvorrichtung auf die AK
5. Schweißen aller AK
6. Aufschweißen des BMS

1. Einlegen des Batteriemoduls in die SV

Die bereits isolierten und verspannten Zellen inkl. ihrer Zellrahmen werden als komplettes Batteriemodul in die SV eingelegt. Dabei wird es an die Anschläge der Vorrichtung geschoben und somit positioniert. Für die genaue Positionierung in X, Y und Z existieren in der Vorrichtung jeweils Anschläge in verschiedener Form für jede Koordinate.

2. Verspannen des Batteriemoduls in der SV

Das bereits in der SV positionierte Batteriemodul muss in seiner Lage noch gespannt werden. Zwar treten während des Laserschweißprozesses keine Bearbeitungskräfte auf, die von der SV aufgenommen werden müssen, jedoch ist es für die Prozessstabilität von Vorteil, eine genaue Position des Batteriemoduls beizubehalten. Mit dem Spannen des Batteriemoduls wird also auch die Wiederholgenauigkeit und gleichbleibende Qualität während des gesamten Schweißprozesses gewährleistet.

3. Umbiegen der AK

Nach dem aktuellen IST-Stand werden die AK mittels einer Biegevorrichtung über den Zellrahmen gebogen. Dieser Vorgang könnte eventuell eine Hauptursache der Entstehung von Spalten zwischen den AK sein. Durch das Umbiegen der beiden AK über den Zellrahmen entsteht ein Spalt zwischen dem Ober- und Unterblech. Dies resultiert aus den unterschiedlichen Rückfederverhalten der AK und weil aufgrund des Zellrahmens kein Überbiegen unter den AK möglich ist. Der obere Ableiter besteht aus beschichtetem Kupfer und der untere Ableiter aus Aluminium. Durch deren verschiedene Materialeigenschaften federn diese nach dem Biegen unterschiedlich weit zurück. Dieser Umstand wird noch verstärkt, da das Oberblech stärker zurückfedert als das Unterblech und somit ein noch größerer Spalt zwischen beiden entsteht.

4. Auflegen des Niederhalters auf die AK

Nach dem Spannen und Umbiegen der AK wird der Niederhalter der Vorrichtung auf die AK aufgelegt und verspannt. Im aktuellen IST-Stand werden dabei alle AK mit einem durchgängigen Niederhalter gespannt. Dabei summieren sich die einzelnen Spannkkräfte und es kommt, vor allem bei Batteriemodulen mit mehr als 10 Zellen, zur Aufbiegung des Niederhalters. Infolgedessen werden die am äußeren Rand befindlichen AK gut gespannt, die AK in der Mitte jedoch schlecht. Im Bild 11 ist dieser Sachverhalt deutlich zu erkennen.



Bild 11: Spannvorrichtung während Druckverteilungstest an einem 27 Zeller Batteriemodul
[18]

1 Chemische Druckmessfolie

4 Batteriemodul

2 Druckbild der Spannmaste

5 Spannmaste im Niederhalter

3 Niederhalter der Vorrichtung

Die äußeren AK wurden flächig mit entsprechender Spannkraft gespannt, was ist an der roten Einfärbung der Druckmessfolie zu erkennen ist. Die mittig liegenden AK wurden kaum gespannt, zu erkennen ist das an der Einfärbung der Druckmessfolie. Anhand der roten Einfärbung der Druckmessfolie ist das Negativ der Spannmaske zu erkennen. Diese Spannmaske presst die beiden Ableiterbleche zusammen und spannt diese während des Laserschweißvorgangs. Zu sehen sind diese als Pos. Nr.: 5 Bild 13 auf Seite (XX). Eingesetzt sind die Spannmasken in den Niederhaltern Pos. Nr.: 3. Zum Ausgleich der Höhentoleranzen der Zellrahmen sind diese Spannmasken gefedert. Daraus folgt allerdings auch eine Abhängigkeit der Spannkraft zur Höhe bzw. der Höhentoleranz der jeweiligen Pouchzelle.

5. Schweißen aller AK

Nach dem Spannen der AK werden alle Ableiter nacheinander verschweißt. Durch den Einsatz einer Remote Laseroptik werden die hohen Anforderungen bzgl. der Schweißgeschwindigkeit und Schweißnahtqualität erfüllt, denn nur durch eine gute Verbindung der AK kann ein geringer Widerstand und hohe Festigkeit gewährleistet werden und somit eine hohe Effizienz und Lebensdauer der Batterie.

6. Aufschweißen des BMS

Zuletzt werden auf die bereits miteinander verschweißten AK ein Batterie Management System aufgeschweißt. Dieses dient der Überwachung der einzelnen Zellen und sorgt für die einwandfreie Arbeit der einzelnen Zellen als eine komplette Batterie.

3.4 Biegen der Ableiterkontakte

Wie in Kapitel „3.3. Elektrische Kontaktierung“ bereits angesprochen, ist das Biegen der AK über den Zellrahmen ein wichtiger Prozessschritt vor der Verschweißung der AK. Durch das Umbiegen der AK über den Zellrahmen entsteht eine Winkeldifferenz der beiden AK und somit ist dieser Prozessschritt einer der Hauptursachen für Spalte.

Das Biegen wird, wie auch das Laserschweißen, in die Fertigungsverfahren nach DIN 8580 eingeteilt. Dabei gehört das Biegen zur Hauptgruppe des Umformens. Unterschieden wird anhand entsprechender Werkzeugbewegung während des Umformprozesses. Zum Einen das Biegen mit geradliniger Werkzeugbewegung, zum Anderem das Biegen mit drehender Werkzeugbewegung. Dabei besitzen die Biegeverfahren mit geradliniger- oder drehender Werkzeugbewegung nochmals mehrere Untergruppen.

Beim Biegen der AK handelt es sich um eine geradlinige Werkzeugbewegung der Untergruppe freies Biegen. Von freiem Biegen ist die Rede, wenn die gewünschte Form nicht durch die Geometrie der einzelnen am Biegeprozess beteiligten Werkzeuge erzeugt wird, sondern durch die Position und die Krafrichtung der Werkzeuge zum Werkstück. [19 S. 121]

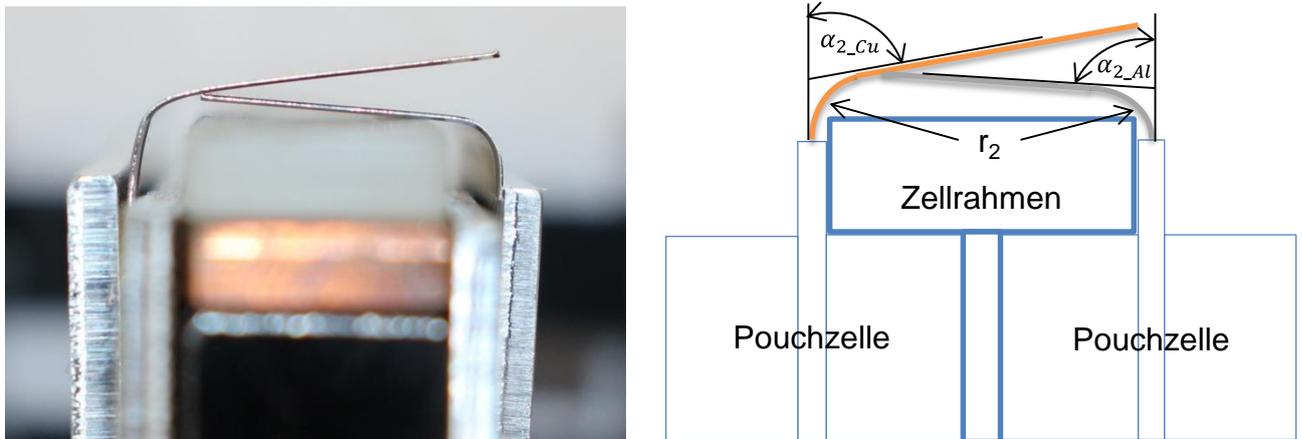


Bild 12: Gebogene AK in SV und schematische Darstellung

Im Bild 12 links sind die von Hand gebogenen AK in der SV zu sehen. Auf beiden Bildern ist deutlich die Winkeldifferenz des oberen zum unteren Ableiter zu sehen.

Berechnung der Rückfeder und Winkeldifferenz der AK

Werkstoff unterer (Cu) Ableiter:	CuZn33-R29
Werkstoff oberer (Al) Ableiter:	EN AW-Al99,0
Biegeradius am Werkstück:	$r_2 = 5 \text{ mm}$
Blechdicke Al und Cu Ableiter:	$s = 0,3 \text{ mm}$
Biegewinkel vor Rückfederung:	$\alpha_1 = 90^\circ$

Verhältnis für Rückfederungsfaktor [20]:

$$\frac{r_2}{s} = \frac{5 \text{ mm}}{0,3 \text{ mm}} = 16,67 \quad [1]$$

Tabelle 1: Rückfederungsfaktor k_R zur Berechnung der Rückfederung [20]

Werkstoff der Biegeteile	Rückfederungsfaktor k_R für das Verhältnis r_2/s										
	1	1,6	2,5	4	6,3	10	16	25	40	63	100
DC04	0,99	0,99	0,99	0,98	0,97	0,97	0,96	0,94	0,91	0,87	0,83
DC01	0,99	0,99	0,99	0,97	0,96	0,96	0,93	0,90	0,85	0,77	0,66
X12CrNi18-8	0,99	0,98	0,97	0,95	0,93	0,89	0,84	0,76	0,63	–	–
E-Cu-R20	0,98	0,97	0,97	0,96	0,95	0,93	0,90	0,85	0,79	0,72	0,6
CuZn33-R29	0,97	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,89	0,86	0,83	0,77	0,73
CuNi18Zn20	–	–	–	0,97	0,96	0,95	0,92	0,87	0,82	0,72	–
EN AW-Al99,0	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,97	0,97	0,96	0,95	0,93
EN AW-AlCuMg1	0,98	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97	0,96	0,95	0,93	0,91	0,87
EN AW-AlSiMgMn	0,98	0,98	0,97	0,96	0,95	0,93	0,90	0,86	0,82	0,76	0,72

Nach Tabelle 1 Gewähltes Verhältnis:

$$\frac{r_2}{s} \text{ gewählt} = 16$$

Rückfederungsfaktor Al Ableiter:

$$k_{R_{Al}} = 0,97$$

Rückfederungsfaktor Cu Ableiter:

$$k_{R_{Cu}} = 0,89$$

Biegewinkel Al Ableiter nach Rückfederung [20]:

$$\alpha_{2_{Al}} = \alpha_1 \cdot k_{R_{Cu}} \quad [2]$$

$$\alpha_{2_{Al}} = 90^\circ \cdot 0,97 = 87,3^\circ$$

Biegewinkel Cu Ableiter nach Rückfederung [20]:

$$\alpha_{2_{Cu}} = \alpha_1 \cdot k_{R_{Al}} \quad [3]$$

$$\alpha_{2_{Cu}} = 90^\circ \cdot 0,89 = 80,1^\circ$$

Winkeldifferenz zwischen den Ableitern:

$$\Delta_\beta = \alpha_{2_{Al}} - \alpha_{2_{Cu}} \quad [4]$$

$$\Delta_\beta = 87,3^\circ - 80,1^\circ$$

$$\Delta_\beta = 7,2^\circ$$

Das Ergebnis aus Rechnung Nummer 4 zeigt, dass durch die verschiedenen Ableitermaterialien eine Winkeldifferenz von rechnerisch $7,2^\circ$ zustande kommt. Diese muss mit Hilfe der zu entwickelnden Spannvorrichtung vermieden bzw. beseitigt werden. Ist das nicht der Fall, folgt aus der Winkeldifferenz ein Spalt, welcher den Laserschweißprozess nachweislich negativ beeinflusst.

3.5 Fertigungsmittel Vorrichtung

In der Fertigung besitzen Vorrichtungen aller Art einen hohen Stellenwert. Es sind Fertigungsmittel bzw. technische Hilfsmittel, welche dauerhaft die Qualität in der Serienfertigung sichern. Laut DIN 6300 werden Vorrichtungen wie folgt definiert: „Fertigungsmittel, das Werkstücke während des formändernden Fertigungsverfahrens in einer bestimmten Lage, zum Werkstück gerichtet, fixiert.“ [21 S. 6]

Begriffliche Grundlagen:

Bestimmen

Das Bestimmen eines Werkstückes führt zur eindeutigen Festlegung der Werkstückposition innerhalb der Spannvorrichtung und in den drei Koordinatenachsen. Somit ist der Freiheitsgrad = 0. Realisiert wird dies über die Bestimmflächen der Spannvorrichtung, welche sich während der Bearbeitung mit den Bestimmflächen des Werkstückes kontaktieren.

Spannen

Durch das Bestimmen des Werkstückes in der Vorrichtung wurde eine definierte Lage des Werkstückes erreicht. Um diese Lage dauerhaft aufrechtzuerhalten ist es notwendig, das Werkstück in dieser definierten Lage mittels definierter Spannkraft zu spannen. Die Spannkraft sollte dabei dosierbar sein, um Beschädigungen am Werkstück zu verhindern.

Positionieren

Die Positionierung dient dazu, die Spannvorrichtung reproduzierbar in eine definierte und bestimmte Lage zu bringen. Dies bezieht sich auf die Lage der Vorrichtung auf dem Maschinentisch zum Werkzeug. [22 S. 9]

Bezugebene

Hierbei handelt es sich um eine Ebene am Werkstück, welche in Folge der Maßantragungen festgelegt wurde. Anhand jener Ebene sind die Einzelheiten des herzustellenden Werkstückes vermaßt, d.h. von dieser Ebene aus werden Funktionsmaße angetragen. Bezugsebenen sind somit funktionsbedingt.

Bestimmebene

Gemeint ist die Ebene, in welcher die Bestimmung des Werkstückes in der Spannvorrichtung vorgenommen wird, z.B. die Ebene gegen welche das Werkstück während der Bearbeitung durch die dabei auftretenden Bearbeitungskräfte gepresst wird. Bestimmebenen sind somit fertigungsbedingt. [22 S. 9;23]

Grundlegend werden Vorrichtungen wie im Bild 13 unterteilt. Die zu entwickelnde Spannvorrichtung zählt zu den Sondervorrichtungen, dabei zur Untergruppe der Fügevorrichtungen und genauer zu den Schweißvorrichtungen. Wie eingangs zitiert, dient eine Vorrichtung zur Fixierung des Werkstückes. Wird das Werkstück in der Vorrichtung gespannt, so nennt man diese Werkstückspanner. Im Folgenden wird eine solche werkstückspannende Vorrichtung vereinfacht als Spannvorrichtung bezeichnet.

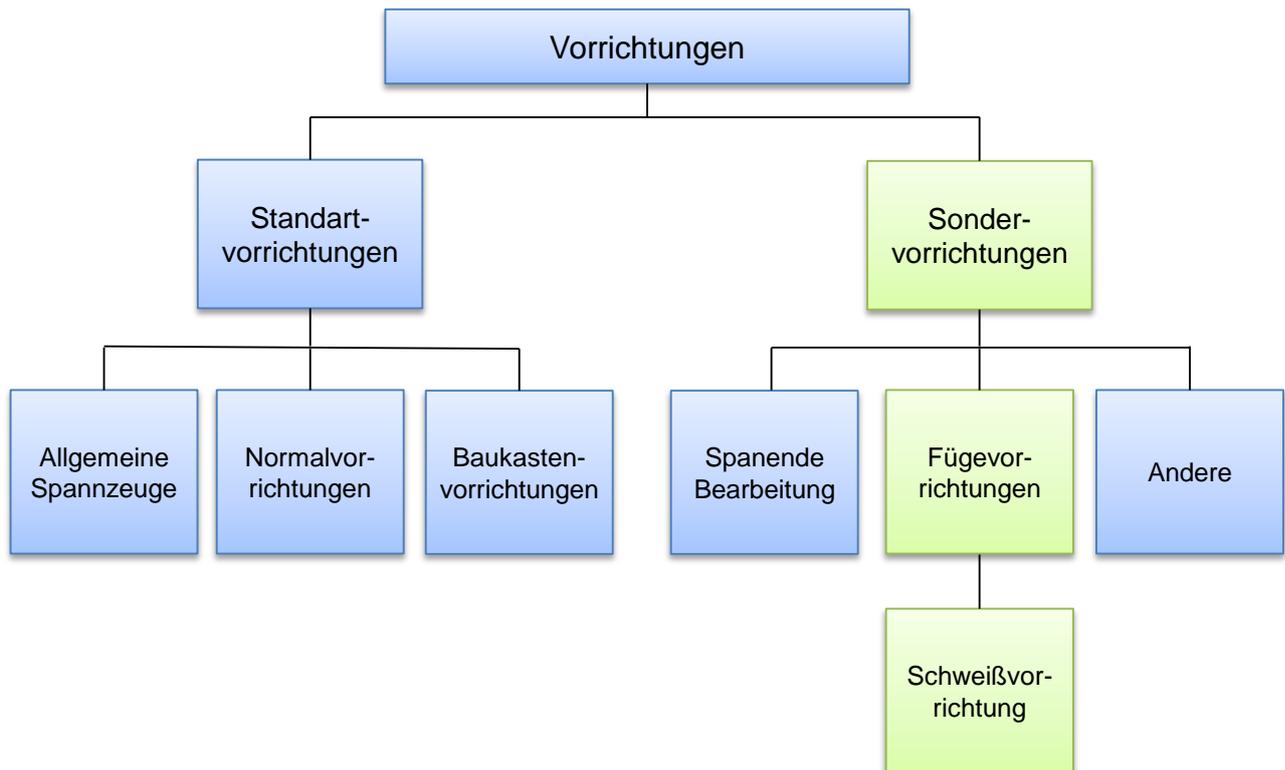


Bild 13: Einteilung von Vorrichtungen nach [23 S. 2]

Aufgabe einer Spannvorrichtung ist das Aufnehmen und Festhalten des Werkstückes auch unter, auf das Werkstück einwirkenden, Bearbeitungskräften. Im Fall einer SV müssen im Vergleich zu einer Bohr- oder Fräsvorrichtung kaum bis keine Bearbeitungskräfte aufgenommen werden.

Um das sichere spannen eines Werkstückes in der Vorrichtung zu gewährleisten ist es notwendig, alle sechs Freiheitsgrade des Werkstückes zu bestimmen. Im Bild 14 Auf Seite 19 sind die drei translatorischen und drei rotatorischen Freiheitsgrade eines Körpers im Raum aufgezeigt.

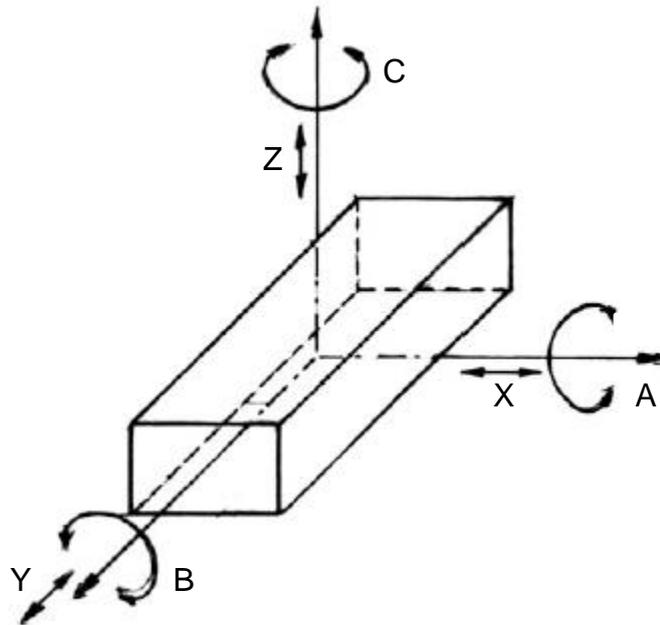


Bild 14: Mögliche Bewegungen eines Werkstückes in einem dreidimensionalen Koordinatensystem [23 S. 15]

Ein Werkstück hat im Raum maximal sechs mögliche Freiheitsgrade. Es kann in den Raumachsen X, Y und Z translatorisch bewegt (verschoben) und um die Achsen A, B und C rotatorisch bewegt (gedreht) werden. Während der Bearbeitung müssen dem Werkstück in der Spannvorrichtung so viele Freiheitsgrade entzogen werden, wie von den maßlichen Vorgaben beschrieben. Diese Freiheitsgrade gilt es, in einer Spannvorrichtung genau zu bestimmen um somit eine reproduzierbare Lage des Werkstückes in der Spannvorrichtung zu gewährleisten.

Realisiert wird dies durch Bezugs- und Bestimmebenen und das Aufbringen einer definierten Spannkraft auf das Werkstück in der Spannvorrichtung. Aus physikalischer Sicht können Werkstücke mittels Stoff-, Form-, und Kraftschluss gespannt werden. Der Stoffschluss mit Adhäsion und Kohäsion durch Klebstoff wird dabei selten angewandt. Hingegen findet der Formschluss und Kraftschluss oder auch eine Paarung aus beiden Spannarten im Regelfall seine Anwendung. Beim Formschluss wird mittels einer Geometrie, die dem Werkstück ähnelt oder ein Negativ dessen ist, gespannt. Im Fall des Kraftschlusses wird die Kraft entweder punktuell oder flächig aufgebracht. Sehr oft erweist sich die Kombination der beiden Verfahren als vorteilhaft. Egal ob Stoff-, Form-, oder Kraftschluss - alle drei benötigen das Einwirken einer Kraft. Diese Kraft kann entweder durch: *Spannen mit Handkraft* z.B.: Spannschrauben, Exzenter-, Keil-, oder Kniehebelspanner etc, oder durch *Spannen mit maschineller Kraft*, z.B. Druckluft, Magnetkraft oder Vakuum erzeugt werden. [24 S. 35]

Wichtig ist auch die Anordnung der Spannelemente, damit diese nicht im Bearbeitungsraum (Laserbereich) oder der Messtechnik im Weg stehen.

4 Methoden der Spaltdetektion

Zu Beginn der Diplomarbeit war noch unklar, in welche Richtung sich die Thematik entwickelt. Grundsätzlich gibt es zwei mögliche Varianten zur Detektion eines Spaltes zwischen zwei Dünnblechen. Die direkte und die indirekte Variante, welche jeweils Vor- und Nachteile aufweisen.

Die Begrifflichkeit der direkten und indirekten Spaltdetektion leitet sich aus der Messtechnik ab, bei der man zwischen direkten und indirekten Messverfahren unterscheidet.

Direkte Messverfahren

Bei direkten Messverfahren wird der gemessene Wert „direkt“ mittels eines Grundnormals bestimmt. Somit wird der Messwert direkt am zu messendem Objekt bestimmt, z.B. das Messen eines Spaltes mit dem Messschieber und dem direkten Ablesen des Anzeigewertes. [25]

Indirekte Messverfahren

Bei indirekten Messverfahren wird der gesuchte Messwert einer Messgröße mittels einer anderen physikalischen Größe ermittelt. Bei solchen Messverfahren muss allerdings der physikalische Zusammenhang der jeweiligen Größen bekannt sein. Im Anschluss kann dieser Zusammenhang durch Formeln oder Versuche und deren Auswertung sichergestellt werden. [25]

Im Folgenden sollen die beiden prinzipiellen Möglichkeiten der Spaltdetektion kurz erläutert werden. Bei der direkten Spaltdetektion wird auf zwei mögliche Varianten eingegangen und deren Vor- und Nachteile genannt.

Bei der indirekten Spaltdetektion wird ein mögliches Vorgehen beschrieben. Ebenso wird der, für die Messungen notwendige, Prüfstand dargestellt und die zur Auswertung benötigte elektronische Druckmessfolie erläutert.

4.1 Direkte Spaltdetektion

Bei der direkten Spaltdetektion wird durch ein geeignetes Messsystem direkt der Spalt zwischen den AK gemessen. Somit gibt das jeweilige Messverfahren einen direkten Wert, z.B. den Höhenunterschied der beiden AK, aus. Über den dabei ausgegebenen Messwert und die jeweiligen Abmessungen und deren Toleranzen kann berechnet werden, welcher Spalt sich zwischen den Blechen befindet. Es gibt mehrere verschiedene Möglichkeiten, diese Spaltmessung zu realisieren. In Bild 15 ist die Variante mittels Linien Laser abgebildet. Dabei wird Laserlicht seitlich auf die AK geworfen und mittels Sensor auf der gegenüberliegenden Seite ausgewertet. Je nachdem, wie viel Fläche auf dem Bildsensor bestrahlt wird, kann mittels Bildauswertungssoftware eine Entscheidung über das Spaltbild getroffen werden.

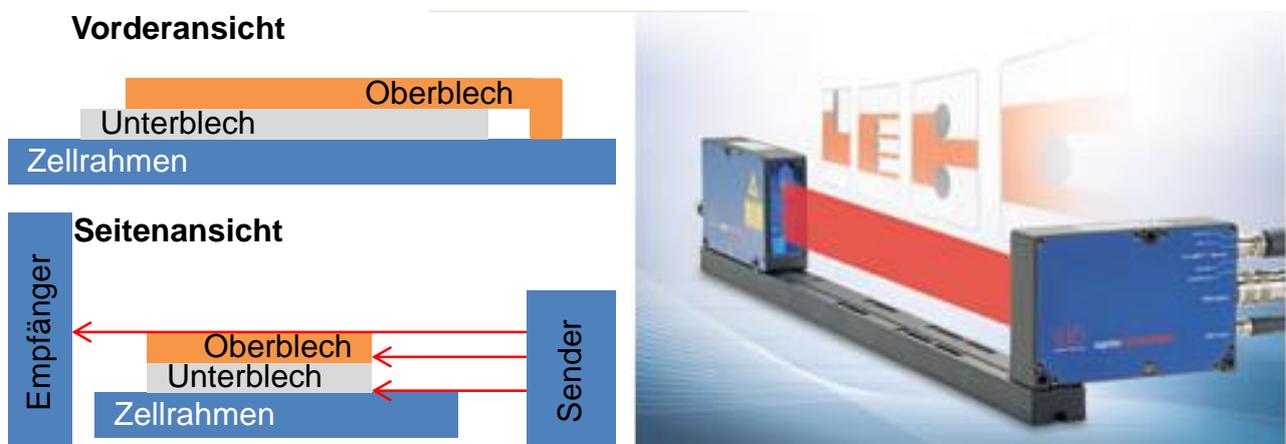


Bild 15: Möglichkeit der Spaltdetektion mittels Durchlichtverfahren [26]

Die in Bild 15 dargestellte Möglichkeit der Spaltdetektion gehört zu den photoelektrischen Messverfahren und beruht auf dem Prinzip des Durchlichtverfahrens. Dabei sind die Senderlichtquelle und der Empfänger räumlich voneinander getrennt. Um mit diesem System eine Spaltmessung über den kompletten Schweißbereich zu ermöglichen, müssten sich entweder die AK gegenüber der Lichtschranke bewegen oder umgekehrt. Ohne eine solche Relativbewegung zwischen Messsystem und AK ist die Messung auf den Bereich der Laserstrahlbreite begrenzt.

Nachteil bei dieser Variante ist vor allem die Störanfälligkeit bei bspw. einem Grad an den Rändern der AK. Sofern solch ein Grad vorhanden ist, wird die Detektierung stark beeinträchtigt oder gar unmöglich. Ebenso benötigt diese Variante hohen Platzbedarf, ist anfällig gegenüber Schmutz und benötigt eine entsprechende Software zur Auswertung. Jeder dieser Punkte allein sorgt für eine eingeschränkte Prozessstabilität, alle zusammen für eine hohe wahrscheinliche Ausfallrate des Messsystems, weshalb sich gegen ein solches System entschieden wurde.

Eine weitere Möglichkeit der direkten Spaltdetektion bieten 3D Kamerasysteme. Mit solch einem Kamerasystem ist es möglich, die Höhenprofile der AK zu erfassen, zu visualisieren und auszuwerten. In Bild 16 ist ein solches System dargestellt.

Vorderansicht

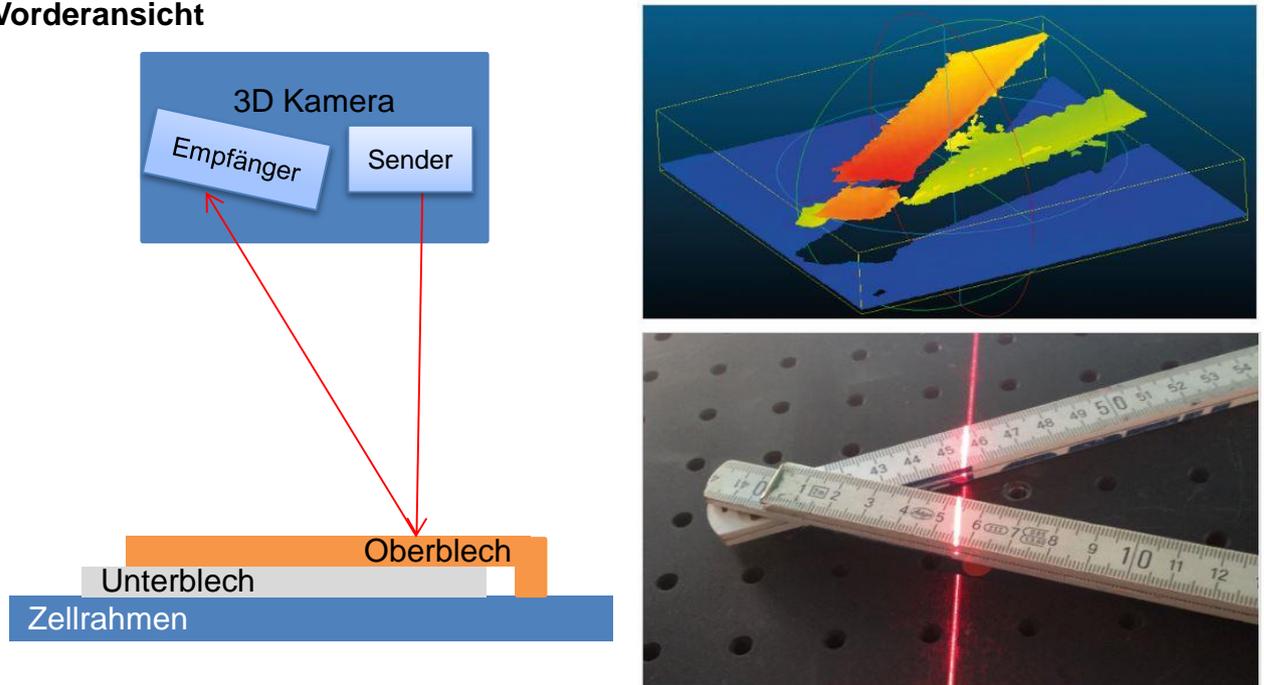


Bild 16: Möglichkeit der Spaltdetektion mittels Auflichtverfahren [27]

Die in Bild 16 gezeigte 3D Kamera arbeitet mit dem Auflichtverfahren. Dieses gehört ebenfalls zu den photoelektrischen Messverfahren. Die Berechnung des Abstandes erfolgt dabei über die Berechnung der Zeitdifferenz, die zwischen dem Senden und Empfangen des Laserimpulses verstreicht.

Allerdings ist es der Kamera nicht möglich, zu unterscheiden, ob sich der Störfaktor Spalt zwischen den AK befindet, oder unterhalb. Hinzu kommt noch, dass dieses System anfällig gegenüber Schmutz ist. Da beim Laserschweißprozess, trotz Absaugung, viel Schmutz in Form von Schmauch und Schweißspritzen entsteht, ist diese Art der Detektion eher ungeeignet. Noch erschwerend kommen die hohen Anschaffungskosten und die lange Anschaffungsdauer hinzu.

Aus den oben genannten Gründen wurde die Variante der direkten Spaltdetektion nicht weiter verfolgt und sich auf die indirekte Methode konzentriert.

4.2 Indirekte Spaltdetektion

Mit der Entwicklung einer taktilen Spannvorrichtung soll die Prozessstabilität erhöht werden. Um dies zu realisieren, ist es notwendig, eine Aussage über den Spalt liefern zu können. Somit soll ermittelt werden, ob und wie die indirekte Spaltdetektion realisiert werden könnte. Im Anschluss soll ein solches System in die zu entwickelnde taktile Spannvorrichtung eingebracht werden.

Wie in Kapitel 4 „Methoden der Spaltdetektion“ beschrieben, wird bei indirekten Messverfahren die gesuchte Größe mittels einer anderen physikalischen Größe ermittelt. Es soll die gesuchte Größe Spalt, durch einen Rückschluss von der Spannkraft oder dem Spannweg zur dabei belasteten Fläche ermittelt werden. Um zu prüfen, ob ein solcher Zusammenhang besteht, sollen Versuche an einem extra dafür gefertigten Prüfstand durchgeführt werden. Mit diesem Prüfstand und den dadurch ermittelten Messwerten sollen Rückschlüsse gezogen und ein System zur indirekten Detektion entwickelt werden.

Mit einfacher Messtechnik ist die Erfassung der Spannkraft und des Spannweges möglich. Ebenso kann durch die elektronische Druckmessfolie die belastete Fläche in Abhängigkeit der Spannkraft ermittelt und ausgegeben werden. Da die belastete Fläche zwischen zwei AK eine Aussage über den Spalt liefert, soll ermittelt werden, ob es einen festen Zusammenhang zwischen der Spannkraft und dem zu erwartenden Spalt gibt.

Spannkraft

Die Spannkraft oder auch Druckkraft ist jene Kraft, durch die das Oberteil der Vorrichtung auf die AK gespannt wird. Die Spannkraft ist ein wichtiger Einflussparameter für den Prozess des Laserschweißens. Der Versuchsaufbau soll eine stets reproduzierbare Spannkraft erzeugen, um die Auswertung der verschiedenen Versuche bei gleichbleibenden Bedingungen zu gewährleisten.

5 Gewählte Methode – Indirekte Spaltdetektion

Um eine prozesssichere Verschweißung zu gewährleisten müssen diverse Grenzparameter eingehalten werden. Die meisten dieser Parameter werden bereits überwacht und, wenn notwendig, nachgeregelt. Nicht der Fall ist dies allerdings bei der Störgröße Spalt. Der Spalt wird aktuell noch nicht ermittelt bzw. detektiert.

Um dies möglich zu machen, wurden bereits zwei Varianten der Spaltdetektion vorgestellt und die Entscheidung für die indirekte Spaltdetektion getroffen. Dabei sollen Versuche in einem dafür entwickelten Versuchsstand durchgeführt werden. Ziel dabei ist es, einen möglichen Zusammenhang von Spannkraft auf den dabei vorliegenden Spalt zu erlangen und somit die Prozessstabilität während des Schweißprozesses zu verbessern.

Dieser Versuchsstand ist in Bild 17 zu sehen. Im Inneren des, aus Aluminiumprofilen bestehenden, Gestells befindet sich eine SV zum Spannen und Schweißen von AK. Die CAD Daten des, im Bild 17 dargestellten, Versuchsstands ist als Anhang auf dem Datenträger zu finden.

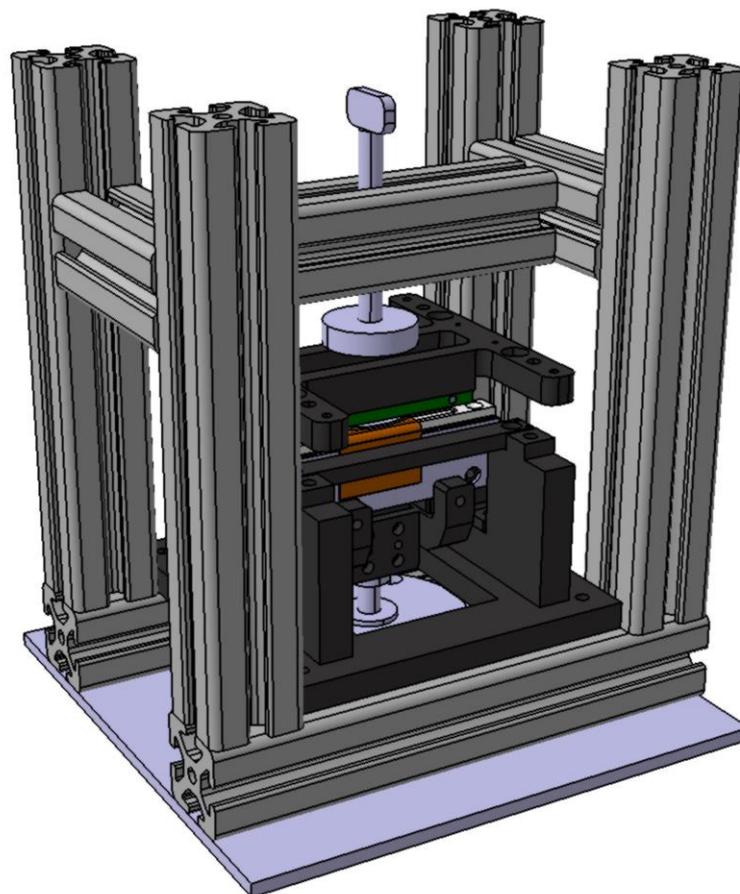


Bild 17: Konzept Versuchsvorrichtung Kraft-Spalt Ermittlung

Mit dem Versuchsstand wird es ermöglicht, eine statisch gleichbleibende Druckkraft zu erzeugen. Mittels einer Kraftmessdose wird die Spannkraft aufgenommen und liefert eine Aussage über die aktuell vorliegende Spannkraft. Während des Aufbringens der Spann-

kraft muss deren Auswirkung auf den Spalt ausgewertet werden. Diese Auswertung erfolgt mittels elektronischer Druckmessfolie und Makroaufnahmen.

Auswertung durch Elektronische Druckmessfolie

Zur Erhöhung der Prozessstabilität beim Laserschweißen von Dünoblechen bedarf es einer Analyse der Störgröße Spalt. Wie im Kapitel „Geplante Methoden und Vorgehen zur Problemlösung“ bereits beschrieben, soll ein möglicher Zusammenhang von Spannkraft und Spalt untersucht werden. Diese Untersuchung und Auswertung soll durch die elektronische Druckmessfolie von Tekscan erfolgen.

Mit der elektronischen Druckmessfolie ist eine Echtzeitauswertung der vorhandenen belasteten Fläche zwischen zwei beliebigen Bauteilen möglich. Im hier vorliegenden Anwendungsfall befindet sich die Druckmessfolie zwischen den beiden AK. Anhand der Softwareoberfläche von Tekscan kann während des Messvorgangs eine Auswertung der belasteten Fläche erfolgen. Diese Auswertung liefert dann einen Rückschluss der Druckkraft zur belasteten Fläche und somit eine Aussage über den vorliegenden Spalt.

Funktionsprinzip

Bei der elektrischen Druckmessfolie von Tekscan handelt es sich um einen Matrixsensor auf piezorestiver Basis. Matrixsensoren kommen dabei zum Einsatz, da die Anordnung der Piezoelemente auf der Folie in Form einer Matrix aufgebaut ist. Ebenso ist die Verschaltung der Piezoelemente eine Matrixschaltung, demnach werden die gleichen Elemente in Reihen und Spalten angeordnet. [28]

Diese Reihen und Spalten des Sensors sind im Bild 18 auf Seite 26 gekennzeichnet. Links im Bild 18 auf Seite 26 ist die komplette Sensorfläche zu sehen, dabei sind in jeweils abwechselnder Reihenfolge seitlich die Kontakte der Reihen angebunden. Mittig oben sind dann jeweils die Spalten angebunden. Rechts im Bild 18 auf Seite 26 sind die Reihen (blau und rot) und die Spalten (grün) eingezeichnet. Durch die Teilung des Sensors in jeweils 44 Reihen und Spalten auf einer Fläche von 83,9 x 83,9 mm entsteht eine Matrix mit 1936 Messpunkten. [29]

An jedem einzelnen dieser Messpunkte befindet sich piezoelektrisches Material, welches bei Belastung eine geringe Spannungsänderung erzeugt. Die Software verarbeitet diese Spannungsänderung und generiert auf der Bildschirmoberfläche einen druckabhängigen Anzeigewert. Je nach Fläche und Druckkraft wird die belastete Fläche in einem unterschiedlichen Farbton angezeigt.

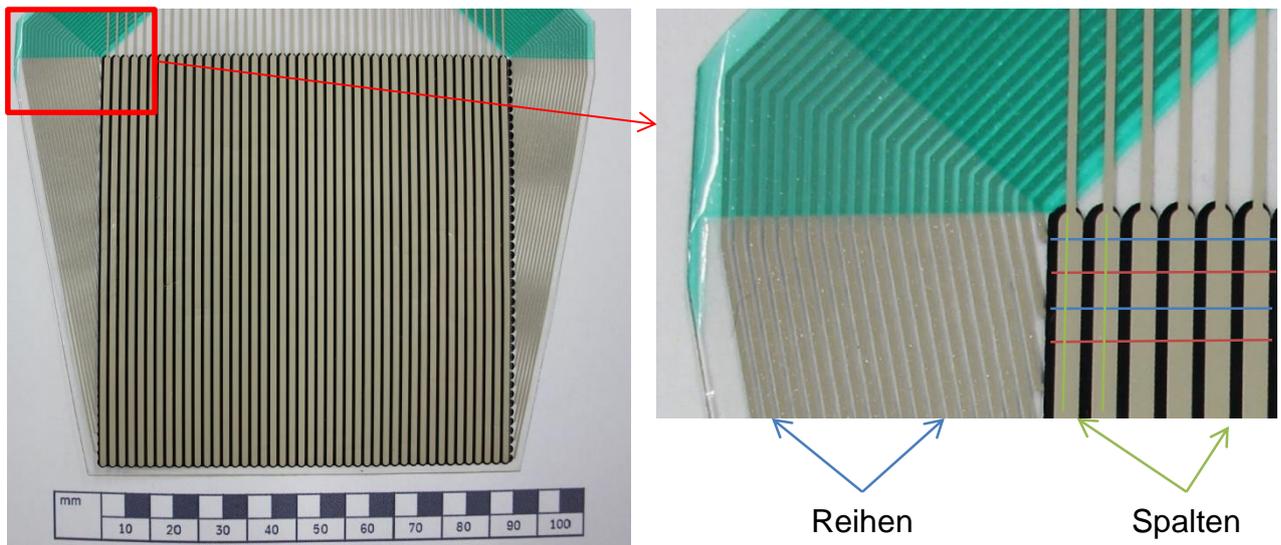


Bild 18: Tekscan Druckmessfolie – Sensor Typ 5076

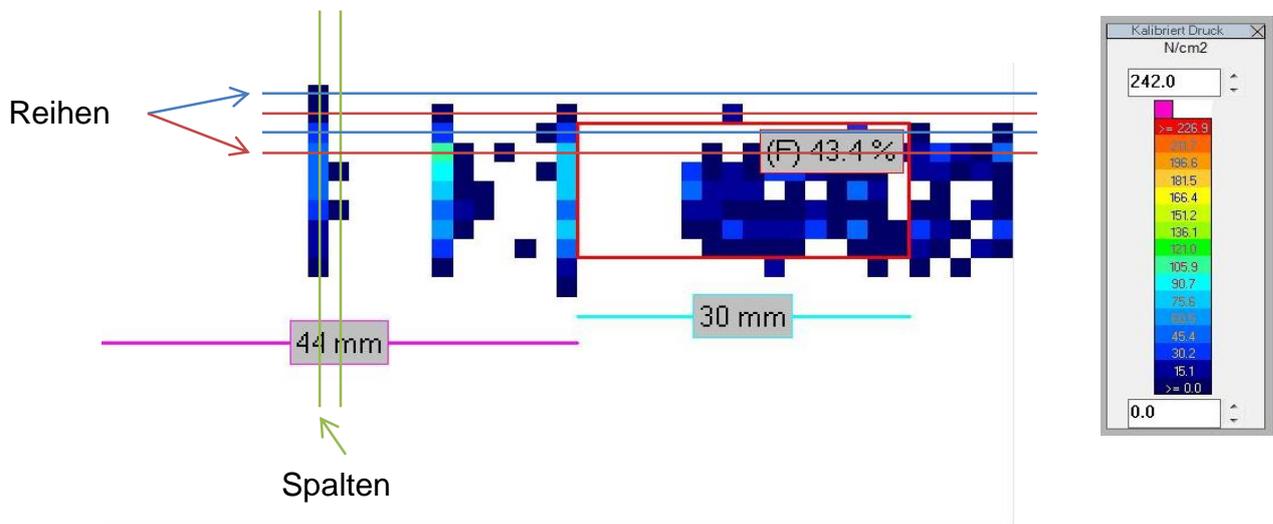


Bild 19: Tekscan Software Oberfläche

Im Bild 19 sind genau wie in Bild 18 die Reihen und Spalten eingezeichnet. Ebenso wird eine Legende des kalibrierten Druckes angezeigt. Anhand des Farbtones der einzelnen Punkte/ Pixel kann eine Aussage über die dort auftretende Druckkraft getroffen werden.

Diese punktuelle und druckkraftabhängige Auswertung wird durch die, in den Schnittpunkten der Reihen und Spalten liegenden, Piezoelemente realisiert. Dabei wird auf den Piezoeffekt zurückgegriffen. Dieser wurde im Jahr 1880 von den Brüdern Jacques- und Pierre Curie entdeckt. Er beruht darauf, dass in Folge einer Verformung in einem piezoelektrischen Material eine Verschiebung der Ladungs-Schwerpunkte der Elementarzelle stattfindet. Wird diese Verschiebung der Ladungsschwerpunkte über alle Elementarzellen des Materials addiert, führt dies zu einer messbaren elektronischen Spannung. Diese Spannung wird mittels Messverstärker verstärkt und anschließend in der Software als Druckpunkt angezeigt. [30]

6 Vorversuche zur Definition des Grenzparameters – Spalthöhe

Zum Anfertigen einer vollständigen Anforderungsliste ist es notwendig, alle prozessrelevanten Parameter für die Spannvorrichtung zu validieren. Diese dienen später der genauen Beschreibung und Festlegung der jeweiligen Prozessgrenzen, damit der Anforderungsliste den Funktionsumfang der Spannvorrichtung vorgeben.

Die Spalthöhe ist für den Schweißprozess ein wichtiger Parameter. Bei bspw. einem zu großen Spalt kann die Anbindung des Oberbleches an das Unterblech nicht gewährleistet werden. Die AK können somit nicht miteinander verschweißt werden, dadurch besitzen sie keine stoffschlüssige Verbindung und es kann kein Elektrodenstrom fließen. Entweder die AK können durch Nachschweißen/ Nacharbeit noch verschweißt werden, oder die fehlerhaft geschweißten AK inkl. ihrer Zellen müssen entsorgt werden. Die Folge eines zu großen Schweißspaltes und dadurch der fehlerhaften Anbindung zwischen den AK ist in Bild 20 zu sehen. Die AK konnten durch den zu großen Spalt keinen Stoffschluss der Schweißverbindung erzeugen.

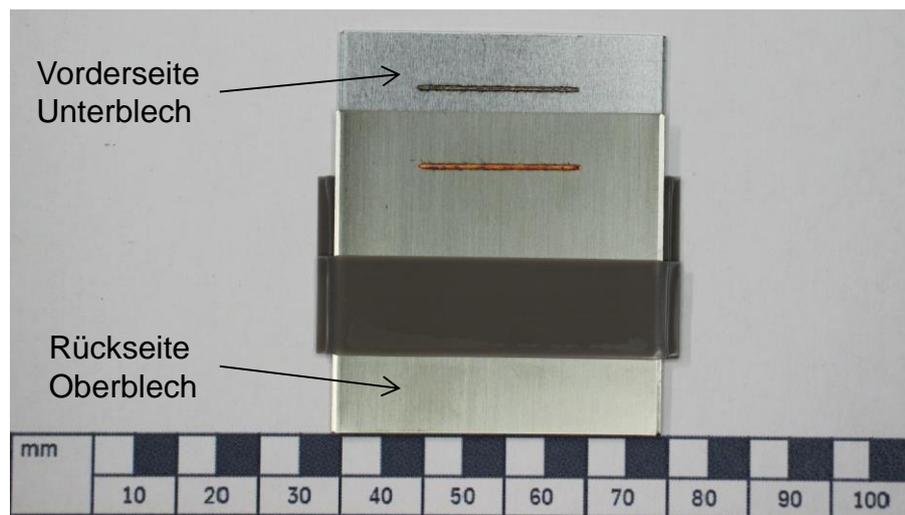


Bild 20: Fehlerhafte Verschweißung durch zu großen Schweißspalt

6.1 Versuchsaufbau – Spalthöhe

Im Folgenden wird der Versuchsaufbau zur Bestimmung der maximal zulässigen Spalthöhe beschreiben. Die Durchführung der Schweißversuche findet in der ABL von tk SY statt. Verschweißt werden dabei die jeweils 0,3 mm dicken Ableiterbleche mit verschiedenen Spalthöhen. Die Versuche beginnen mit 0,00 mm Spalt und in 0,02 mm Schritten bis zum Ende bei 0,12 mm Spalt.

In Bild 21 ist das Innere der ABL zu sehen. Auf dem Maschinentisch aufgebaut ist die SV mit der darauf zu schweißenden AK dargestellt. Ebenfalls zu sehen ist ein Laser Abstandsmesser mit entsprechender Ableseelektronik. Dieser wird benötigt, um beim Einsetzen der verschiedenen hohen Unterlegbleche den Fokusshift zu verhindern. Unter Fokusshift versteht man die Änderung des Laserstrahldurchmessers (Spotdurchmesser) infolge einer Veränderung der Brennweite. In der schematischen Darstellung in Bild 21 ist der Zusammenhang von Brennweite und Spotdurchmesser dargestellt.

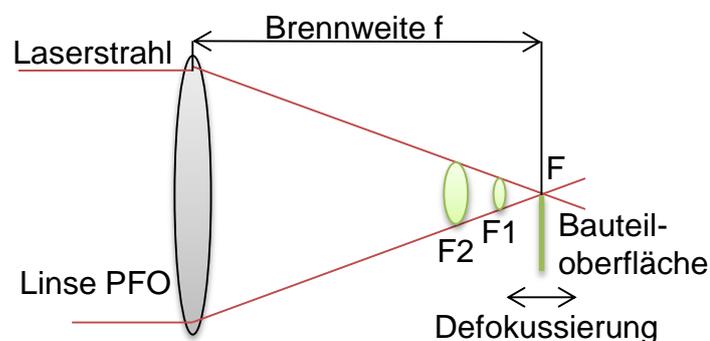


Bild 21: Schematische Darstellung des Spotdurchmessers in Abhängigkeit der Brennweite

Um die Veränderung des Spotdurchmessers und somit die Veränderung des Energieeintrages zu verhindern, wird die Brennweite, also der Abstand zwischen Optik und Bauteil, mittels Laserabstandsmessung überwacht und entsprechend nachjustiert.

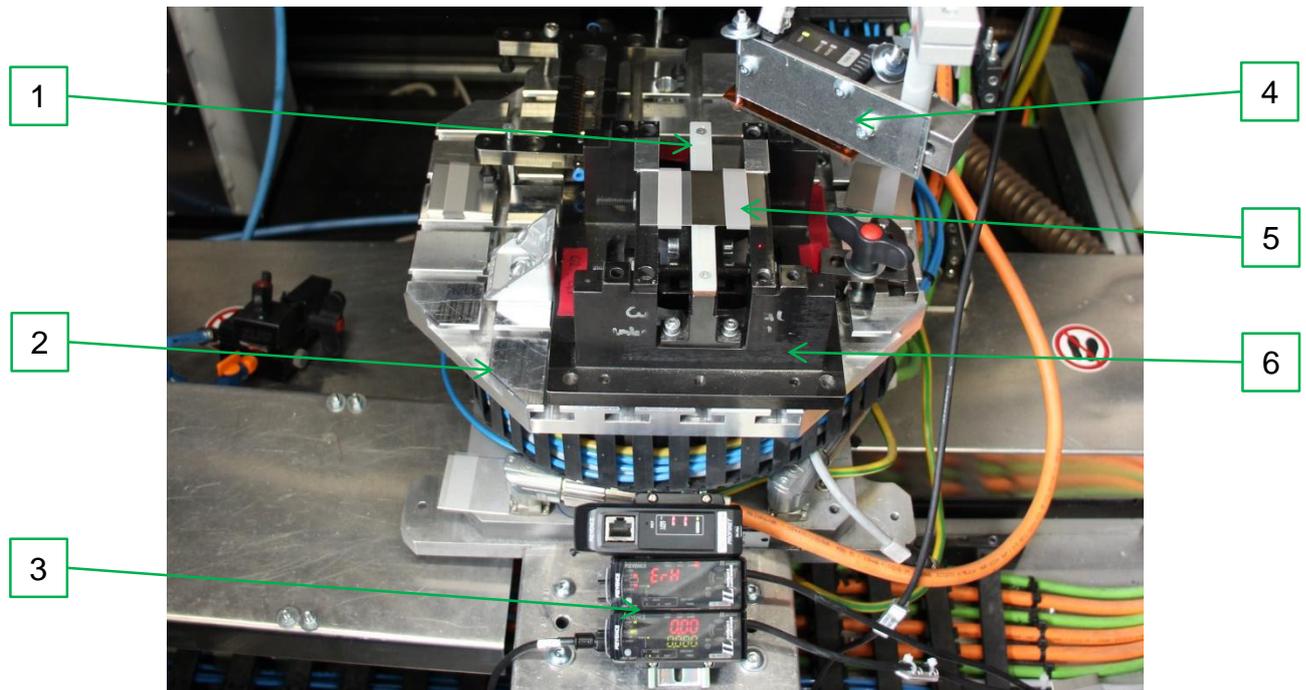


Bild 22: Innerer Aufbau ABL mit SV

- | | |
|--------------------------------|-----------------------|
| 1 Auflageschiene für AK. | 4 Laserabstandsmesser |
| 2 Maschinentisch der ABL | 5 AK |
| 3 Anzeigegerät Abstandsmessung | 6 Laser SV |

Um den Einfluss der Spalthöhe auf den Schweißprozess zu ermitteln, ist es notwendig, einen definierten Spalt zwischen Ober- und Unterblech zu erzeugen. Da die AK beim horizontalen Übereinanderlegen keinen Spalt aufweisen, muss dieser künstlich erzeugt werden. Das Erzeugen eines künstlichen Spaltes wird mit Unterlegblechen realisiert. Diese Unterlegbleche bestehen aus dünner Folie, welche verschiedene Stärken besitzt. Dabei werden die Bauteile wie folgt gestapelt (Reihenfolge von unten nach oben): Unterer Ableiter – Unterlegblech links und rechts – Oberer Ableiter. Zu sehen ist dieser Aufbau schematisch in Bild 23. Die Unterlegbleche müssen zweiteilig ausgeführt sein, um in der Mitte einen Prozessbereich zum Laserschweißen zu erzeugen. Dieser Prozessbereich ist in Bild 23 und in Bild 24 auf Seite 30 grün eingezeichnet.



Bild 23: Schematische Darstellung des inneren Versuchsaufbaus

In Bild 24 links sind die beiden Unterlegbleche zu sehen. Diese erkennt man an den roten Klebestreifen. Die roten Klebestreifen erfüllen zwei Funktionen, zum einen dienen sie der besseren Handhabung und zum anderen ist die Spalthöhe darauf ersichtlich. Auf Bild 24 rechts ist der, durch die Unterlegbleche künstlich erzeugte, Spalt zu erkennen.

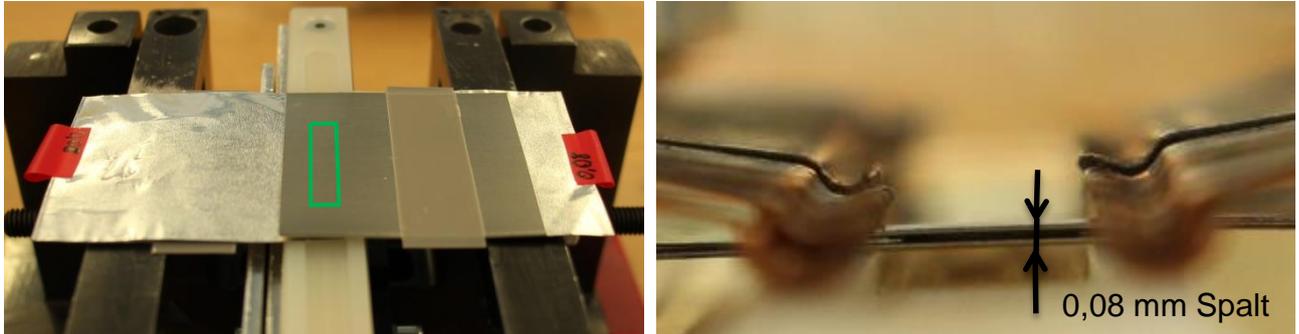


Bild 24: Künstlich erzeugter Spalt zwischen Ober- und Unterblech

Durch den, somit genau definierten, künstlichen Spalt kann in der späteren Auswertung ein Rückschluss von Spalthöhe auf die stoffliche Anbindung der Schweißnähte erfolgen. Anhand von Zugversuchen wird die Zugfestigkeit der Schweißnähte, abhängig ihrer Spalthöhe, untersucht. Aus den daraus gewonnenen Erkenntnissen kann die maximal zulässige Spalthöhe $S_{h \max}$ festgelegt werden.

6.2 Versuchsdurchführung – Spalthöhe

In Kapitel 3.1 „Versuchsaufbau – Spalthöhe“ wurde der Messaufbau zur Ermittlung der Spalthöhe aufgezeigt. Bei der Versuchsdurchführung werden die einzelnen Schritte beschrieben, welche zu den späteren Messergebnissen führen. Zu Beginn wurden durch mehrere Schweißversuche und deren Auswertung die notwendigen Schweißparameter bestimmt. Dafür wurden eine Vielzahl an Ableiterblechen mit einer Variation von Laserleistung, im Bereich von 2500-5000 W und Vorschubgeschwindigkeit von 400 bis 600 mm/s) geschweißt. Einstellgrößen wie Fokusbrenndurchmesser, Spannkraft etc. wurden dabei nicht verändert. Die so ermittelten Prozessparameter sind Tabelle 2 zu entnehmen. Diese sind es auch, mit welchen bei der Durchführung der Schweißungen gearbeitet wurde.-

Tabelle 2: Prozessparameter Schweißversuche

Benennung	Formelzeichen	Wert	Einheit	Quelle
Laserleistung	P	3500	W	Versuche
Vorschubgeschwindigkeit	v	505	mm/s	Versuche
Streckenenergie	S	693	J/m	Berechnung Im Anhang Anlage 3
Anschläge Spannweg SV	S_w	17,5	mm	Erfahrungswerte tk SY
Brennweite	f	345	mm	Typenschild
Kollimation	k	138	mm	Typenschild
Durchmesser LLK	d_k	75	μm	Typenschild
Fokusbrenndurchmesser	d_0	0,188	mm	Berechnung im Anhang Anlage 3

Um die ermittelten Messwerte miteinander vergleichen zu können, ist es notwendig, alle unter den gleichen Prozessbedingungen aufzunehmen. Zur Realisierung dieser Reproduzierbarkeit wurde ein Versuchsplan aufgestellt. Dieser dient als Handbuch und beschreibt das Vorgehen zur Ermittlung der Messdaten. In Tabelle 3 auf Seite 32 ist dieser Versuchsplan detailliert aufgeführt.

Begonnen wurden die Schweißversuche ohne künstlich erzeugten Spalt. Dabei wurden 48 Proben geschweißt. Die erste Charge mit 24 Proben dient der Auswertung mittels Thermografie und Zugversuch. Die zweite Charge dient als spätere Referenz und bleibt nach dem Schweißen unberührt.

Tabelle 3: Versuchsplan zur Ermittlung der Spalthöhe

Schritt	Durchführung/ Handlung
1	Inbetriebnahme der Maschinen
2	Aufbau der Vorrichtungen
3	Einstellung der Schweißparameter
4	Einstellung der Nebenaggregate
5	Probenvorbereitung
5.1	Einlegen des Unterbleches
5.2	Positionieren der Unterlegbleche zur Spalterzeugung
5.3	Einlegen des Oberbleches
5.4	Anbringen des Oberteils (Niederhalteres) der SV
5.5	Festspannen des Oberteils (mittels 2 M6 Schrauben)
5.6	Justieren des Fokusabstandes
6	Schweißvorgang
6.1	Laserprogramm "DA R. Kreßner" auf Maschine spielen
6.2	Tür der Laseranlage schließen und Schließung quittieren
6.3	Starten des Schweißvorgangs
6.4	Absaugvorgang abwarten (2 Min.)
6.5	Oberteil der SV entnehmen und verschweißte Probenbleche entnehmen
7	Wiederholung
7.1	jeweils 3 gleiche Proben schweißen (Wiederholung ab Schritt 6)
7.2	neue Probe mit anderem Spalt schweißen (Wiederholung ab Schritt 5)

6.3 Versuchsauswertung – Spalthöhe

Die geschweißten Proben gilt es nun auszuwerten und die dabei gewonnenen Erkenntnisse und daraus resultierenden Anforderungen an die SV in die Anforderungsliste einfließen zu lassen. Bei der Auswertung der geschweißten Proben finden zwei Verfahren Anwendung, die Thermografie und der Zugversuch.

6.3.1 Auswertung mittels Thermografie

Bei der Auswertung mittels Thermografie handelt es sich um ein zerstörungsfreies Prüfverfahren zur Ermittlung der Anbindungsfläche zwischen Ober- und Unterblech. Für die Auswertung werden die Proben im Messbereich der Anlage positioniert, die Messung gestartet und die Messdaten automatisch mitgeloggt. Dabei wird das Bauteil in der Thermografieanlage mittels Laser erwärmt. Die von der Oberfläche der Probe emittierte Infrarotstrahlung wird von einer Wärmebildkamera (Infrarotkamera) räumlich und zeitlich aufgezeichnet. Eine fehlerhafte Anbindung zwischen dem Ober- und Unterblech der Proben wird dabei durch unterschiedliche thermische Verhalten aufgezeigt. Eine Auswerteinheit wertet die aufgenommenen Signale aus und zeigt dann räumlich aufgelöste Fehler an. Zu sehen sind diese räumlich aufgelösten Fehler in Bild 26 auf Seite 35. [31] [32]

Zum Kalibrieren der Thermografieanlage bedarf es einer Referenz oder auch Referenzprobe, welche eine spezielle Spaltgestaltung aufweist. Zu Beginn der 20 mm langen Schweißnaht besitzt die Probe keinen Spalt. Am Ende der Probe jedoch einen Spalt von 0,2 mm. Somit wurde sichergestellt, dass die Schweißnaht am Ende nicht anbinden kann. Dadurch war es möglich, die Einstellungen der Thermografieanlage auf den Anwendungsfall zu kalibrieren. Im Bild 25 ist diese Referenzprobe nach dem Zugversuch zu sehen. Dabei ist gut zu erkennen, dass zu Beginn der Schweißnaht eine Anbindung der AK hergestellt wurde zum Ende hingegen keine Anbindung erfolgt ist, da dort ein mit 0,2 mm zu großer Spalt vorlag.



Bild 25: Referenzprobe nach Zugversuch

Nach der Durchführung der Messversuche gibt die Auswertelektronik ein PDF Dokument aus, welches sich in Anlage 4 im Anhang befindet.

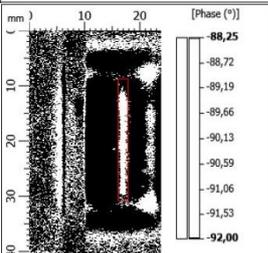
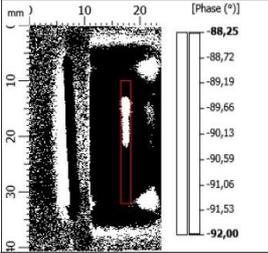
Name	Classification	Appearance	Photo	Measurement Image	Joined Area	Comment
2-000	<input checked="" type="checkbox"/>				26,01 mm ²	
1-REFERENZ	<input checked="" type="checkbox"/>				12,186 mm ²	

Bild 26: Ausschnitt Auswertungsdokument der Thermografie

Zum besseren Verständnis wurden zwei ausgewählte Schweißnähte in Bild 26 aufgeführt. Bei der oberen Probe „2-000“ handelt es sich um die 2 von 3 Proben mit $S_h = 0,02\text{mm}$. Bei der unteren Probe im Bild 25 handelt es sich um die Referenz oder auch Referenzprobe.

Für jede Probe wurde die Messung 3-mal durchgeführt um Messschwankungen auszugleichen und eine empirische Varianz zu erzeugen. Die so ermittelten Messwerte wurden in die Auswertsoftware geladen und analysiert. Die aufgenommenen Messwerte sind in Tabelle 4 zu sehen.

Tabelle 4: Auswertung der Schweißnähte mittels Thermografie

Proben Nr.:	Spalthöhe S_h [mm]	Mittelwert $A_{\text{angeb.}}$ [mm ²]	Standartabweichung Stabw. $A_{\text{angeb.}}$ [mm ²]
1...3	0,00	23,93	1,91
4...6	0,02	18,57	1,50
7...9	0,04	19,21	1,37
10...12	0,06	22,19	0,51
13...15	0,08	21,66	0,47
16...18	0,10	20,60	1,03
19...21	0,12	8,67	3,37
22...24	Referenz	13,28	2,15

Die Messwerte der Thermografie aus Tabelle 4 auf Seite 34 sind in Bild 27 noch einmal visualisiert. Die Standardabweichungen (Stabw.) wurden an die jeweiligen Messwerte angetragen.

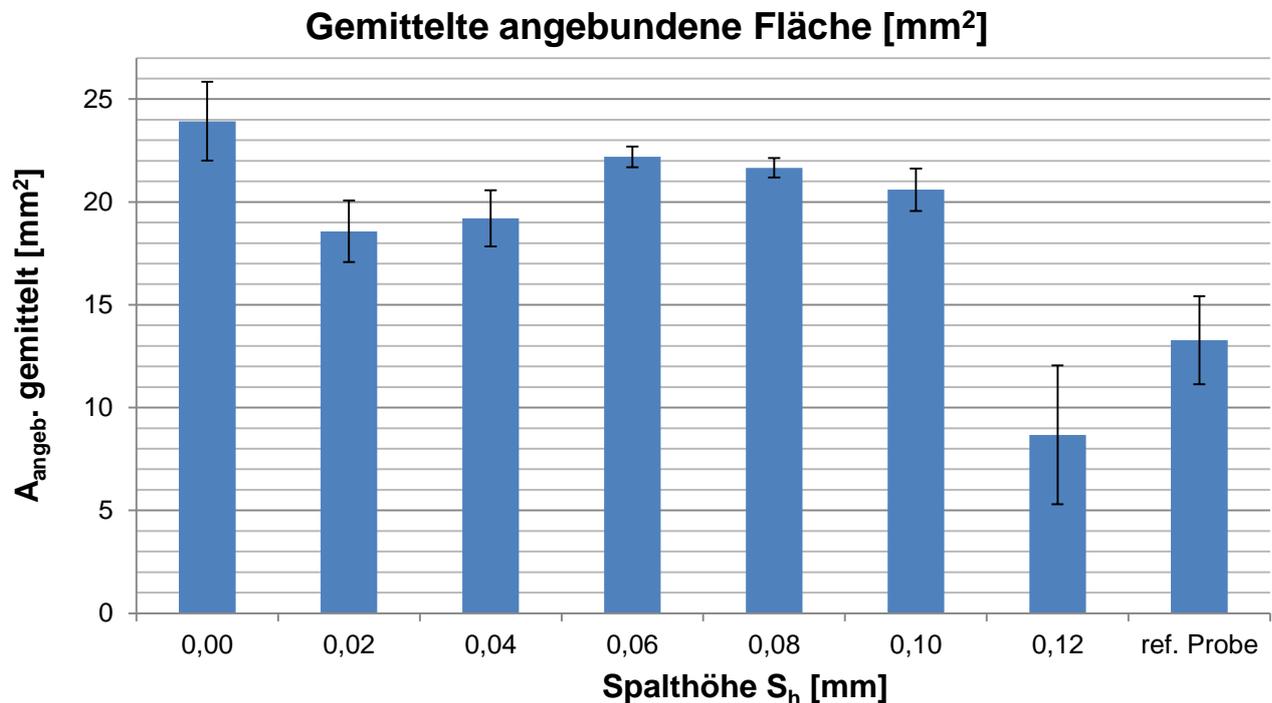


Bild 27: Gemittelte angebundene Fläche in Abhängigkeit der Spalthöhe

Gut zu erkennen ist, wie sich die unterschiedlichen Spalthöhen auf die Verschweißungen auswirken. Die größte gemittelte angebundene Fläche erreichen die Proben mit Nullspalt. Demzufolge ist auch für spätere Schweißungen ein Spalt von 0,00 mm anzustreben.

Entgegen der Erwartung ist kein annähernd linearer Abfall der angebondenen Fläche mit zunehmendem Schweißspalt zu sehen. Die angebundene Fläche nimmt zwar im Vergleich zum Nullspalt ab, aber nicht linear. Bei einem Schweißspalt von 0,06 mm ist erneut ein Anstieg der angebondenen Fläche zu sehen. Trotz diesem nicht linearen Verhalten wird der Nullspalt als ideal angesehen. Entsprechend sollte die zu entwickelnde Spannvorrichtung genau jenen Nullspalt erzeugen.

6.3.2 Auswertung mittels Zugversuche

Im Anschluss an die Thermografie werden die dort erlangten Erkenntnisse noch durch die Auswertung mittels Zugversuche referenziert. Später werden die Messergebnisse dieser beiden Messverfahren korreliert.

Der Zugversuch ist ein genormtes Verfahren zur Werkstoffprüfung. Dabei können unter anderem die Bruchdehnung, die Streckgrenze und die Zugfestigkeit ermittelt werden. Im hier vorliegenden Fall spielt nur die Zugfestigkeit R_m eine Rolle, da diese einen direkten Rückschluss auf die Festigkeit der Schweißnaht zulässt. Die ermittelte Zugfestigkeit und die Versagensart der Schweißproben sind in Tabelle 5 auf Seite 37 aufgelistet.

Materialversagen

Als Materialversagen bezeichnet man das Versagen des Bauteils. Dies tritt auf, wenn die Schweißnaht eine höhere Festigkeit als das Bauteil besitzt. Materialversagen ist dem Nahtversagen stets vorzuziehen, da somit nachgewiesen wird, dass die Schweißnaht haltbar ist und eine höhere Festigkeit als das zu verschweißende Material aufweist. Zu sehen ist ein solches Materialversagen in Bild 28.

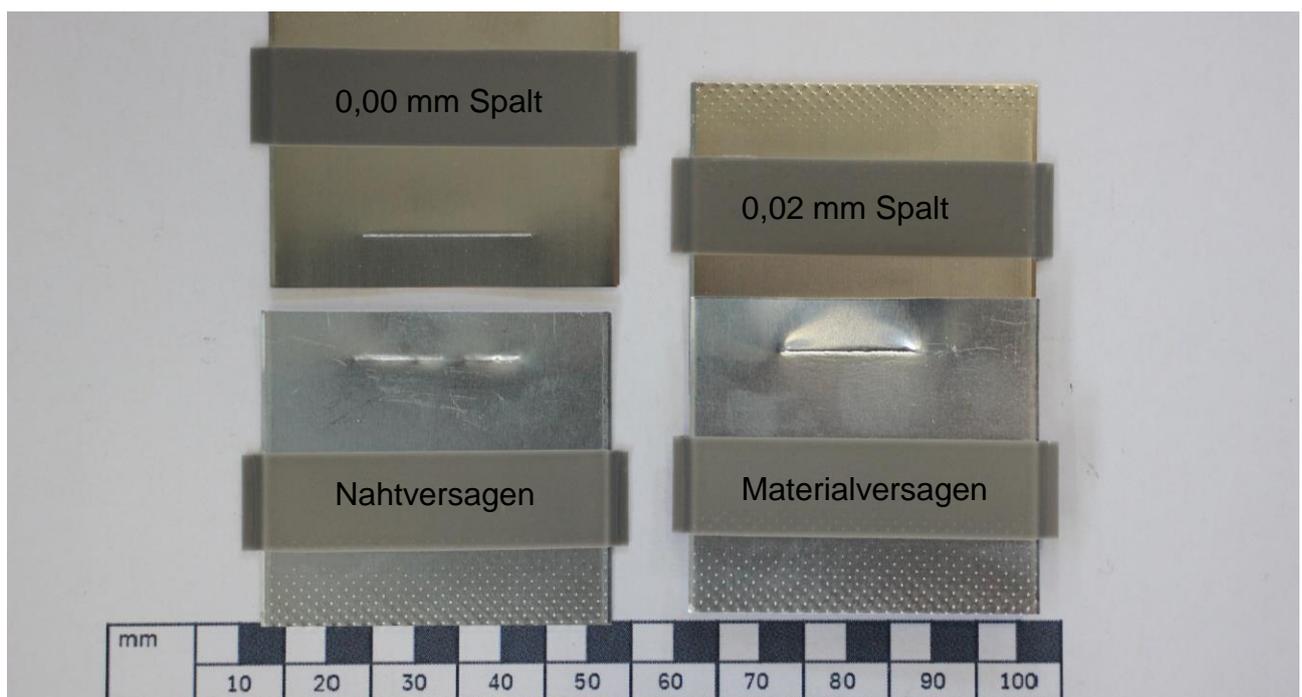


Bild 28: Nahtversagen und Materialversagen infolge des Zugversuches

Nahtversagen

Als Nahtversagen bezeichnet man das Versagen der Schweißnaht. Dies kann mehrere Gründe haben, bspw. kleine Poren oder Verunreinigungen in der Schweißnaht, welche deren Festigkeit reduzieren. Diese Fehler können nach dem Zugversuch mittels Röntgen, Ultraschall oder teilweise auch visuell festgestellt werden. In Anlage 5 im Anhang sind die verschiedenen Fehlertypen noch einmal ausführlich aufgeführt.

Tabelle 5: Auswertung der Schweißnähte mittels Zugversuch

Proben Nr.:	Spalthöhe S_h [mm]	Mittelwert R_m [N]	Standardabweichung Stabw. R_m [N]	Versagensart der Schweißnaht
1...3	0,00	570	25	Nahtversagen
4...6	0,02	607	37	Materialversagen
7...9	0,04	632	20	Materialversagen
10...12	0,06	609	2	Materialversagen
13...15	0,08	532	24	Materialversagen
16...18	0,10	518	13	Materialversagen
19...21	0,12	381	90	Naht-/ Materialversagen
22...24	Referenz	363	24	Materialversagen

Analog zur Versuchsauswertung der Thermografie zeichnet sich auch bei den Zugversuchen kein annähernd linearer Abfall der Zugfestigkeitswerte durch Zunahme der Spalthöhe ab. Ebenso sind verschiedenen Versagensarten der Zugproben, in Abhängigkeit der Spalthöhe, zu sehen. Gründe dafür können sein:

- *Intermetallische Phase Cu-Al*
- *Nicht reproduzierbare Nahtgeometrie*
- *Nicht reproduzierbare Nahtposition*
- *Nicht gleichbleibende Spannkraft über die verschiedenen Spalthöhen*
- *Entgasungsspalt mit zunehmender Spalthöhe*
- *Biegemoment während des Zugversuches mit zunehmender Spalthöhe*

Die genauen Ursachen und Gründe für die Messwerte und auch die unterschiedlichen versagensarten der Proben während des Zugversuches können durch die Analyse mittels Schliff erfolgen. Diese wurden jedoch noch nicht durchgeführt und können als Untersuchungsgegenstand für weiterführende Arbeiten vorgemerkt werden.

In Bild 29 auf Seite 37 sind die Werte aus Tabelle 5 noch einmal visualisiert. Dabei ist gut zu erkennen, dass sich die unterschiedlichen Spalthöhen auf die Zugfestigkeit der Proben auswirken. Anhand dessen und der Werte aus Tabelle 5 sollte man annehmen, dass die höchste Zugfestigkeit der Proben mit 0,04 mm Spalt auch das beste Schweißergebnis sei. Dem ist allerdings nicht zwingend so, da auch die Versagensart der Schweißnaht eine wichtige Rolle bei der Bewertung spielt.

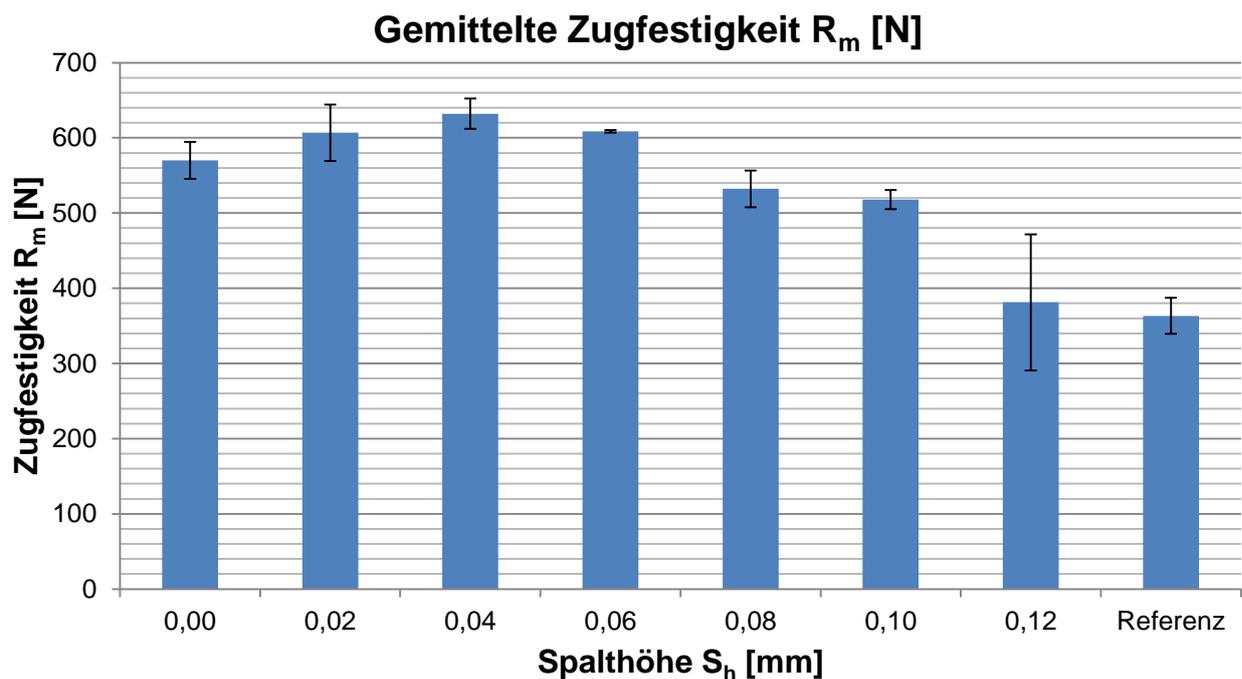


Bild 29: Gemittelte Zugfestigkeit R_m in Abhängigkeit der Spalthöhe

6.3.3 Zusammengefasste Auswertung Thermografie und Zugversuch

Die nach der Thermografie durchgeführten Zugversuche dienen im Wesentlichen zur Referenzierung und Bestätigung der Thermografieergebnisse. Um einen festen Grenzwert für die Auswertung der beiden Messverfahren zu finden, wurden die Messergebnisse der Zugfestigkeit und der angebundenen Fläche miteinander korreliert. Bei einer Korrelation handelt es sich um den statistischen Zusammenhang zweier Datensätze, in diesem Fall der beiden Datensätze der beiden Prüfverfahren, welche auch in Tabelle 6 auf Seite 39 zu sehen sind. [30]

Tabelle 6: Einzelne Messwerte der Thermografie- und Zugversuche

Proben Nr.:	Spalthöhe S_h [mm]	Angebundene Fläche $A_{\text{angeb.}}$ [mm ²]	Zugfestigkeit R_m [N]
1	0,00	24,42	543,018
2		25,98	575,532
3		21,38	591,549
4	0,02	18,25	635,844
5		20,56	564,621
6		16,61	620,013
7	0,04	19,87	651,648
8		20,45	633,105
9		17,31	611,49
10	0,06	21,81	609,702
11		22,91	609,303
12		21,86	606,786
13	0,08	22,07	504,477
14		20,99	549,705
15		21,91	542,355
16	0,10	21,04	505,791
17		21,58	516,516
18		19,17	531,111
19	0,12	12,39	440,52
20		4,22	277,26
21		9,40	425,913
22	Ref.	12,16	336,177
23		11,39	381,081
24		16,28	372,672

Die Messwerte der Thermografie und der Zugversuche aus Tabelle 6 wurden korreliert. Die zusammengefassten und korrelierten Messwerte beider Prüfverfahren sind in Tabelle 7 zu sehen. Dabei wurde noch die jeweilige Stabw. berechnet und in Bild 31 auf Seite 39 an den zugehörigen Messwerten angetragen.

Sowohl anhand der Messdaten in Tabelle 7 als auch in den beiden Diagrammen im Bild 30 auf Seite 39 ist zu sehen, dass sich ein Grenzbereich für die Klassifizierung zwischen i.O. und n.i.O. aufzeigt. Um Unklarheiten bei der Spaltdetektierung vorzubeugen, wurde ein fester Grenzwert von 16,5 mm² Anbindungsfläche und 500 N Zugfestigkeit gewählt.

Tabelle 7: Zusammengefasste Versuchswerte mit deren Grenzwert

	n.i.O.	i.O.	Grenzbereich		Gewählter Grenzwert
R_m [N]	406,87	577,92	483,93	532,11	<u>500</u>
Stabw. [N]	77,06	45,81			
$A_{\text{angeb.}}$ [mm ²]	11,81	21,01	16,05	18,78	<u>16,5</u>
Stabw. [%]	4,24	2,23			

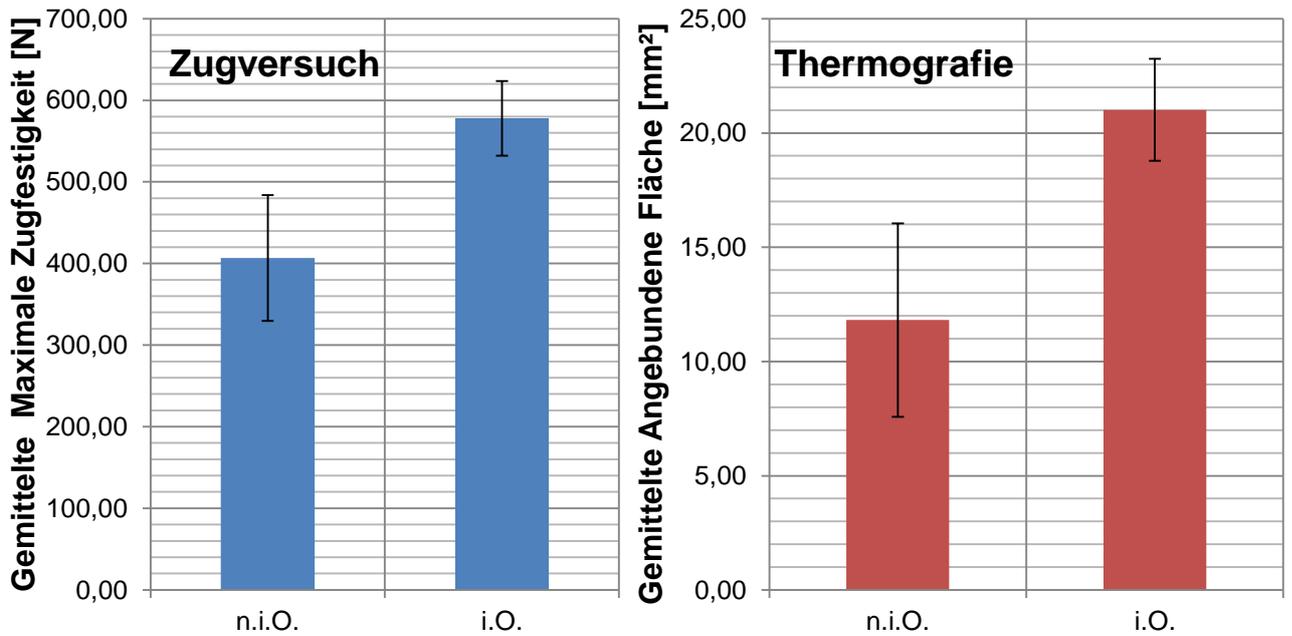


Bild 30: Korrelierte Messdaten der Zug- und Thermografieversuche

Nach dem bestimmen eines festen Grenzwertes erfolgt die Auswertung der Messwerte beider Prüfverfahren. In Bild 31 und Bild 32 auf Seite 40 ist zu sehen, wie der Grenzwert von 16,5 mm² bzw. 500 N die aufgenommenen Messwerte der Thermografie und der Zugversuche in zwei Kategorien teilt. Dafür ist der Grenzwert in Form einer blauen Bild 31 und einer roten Bild 32 horizontalen Linie in das Diagramm eingezeichnet.

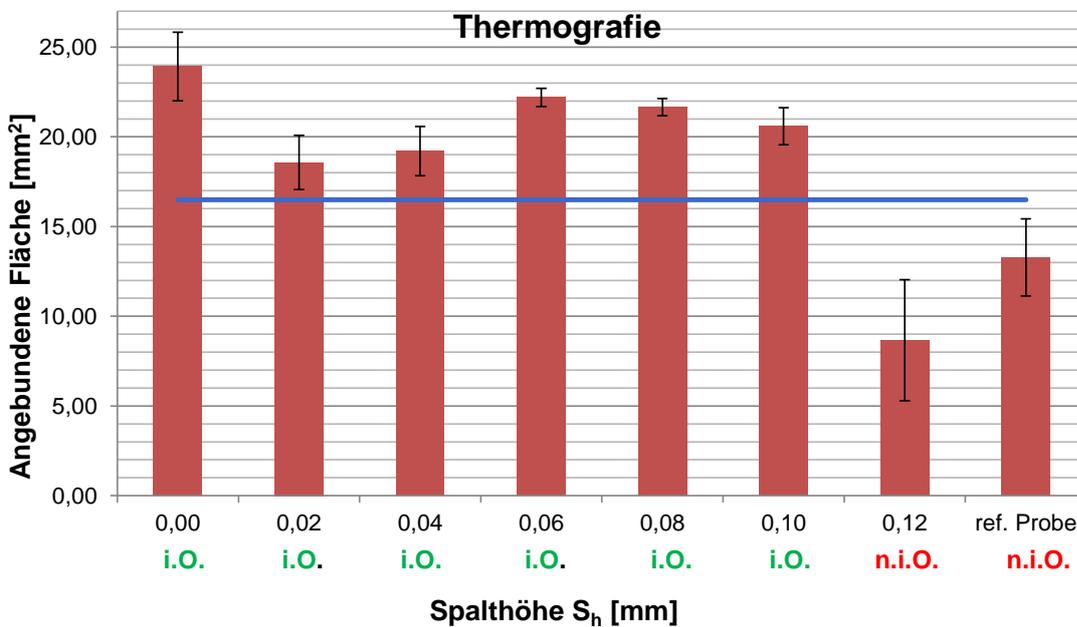


Bild 31: Kategorisierung der Thermografie Messwerte mittels eines festgelegten Grenzwerts

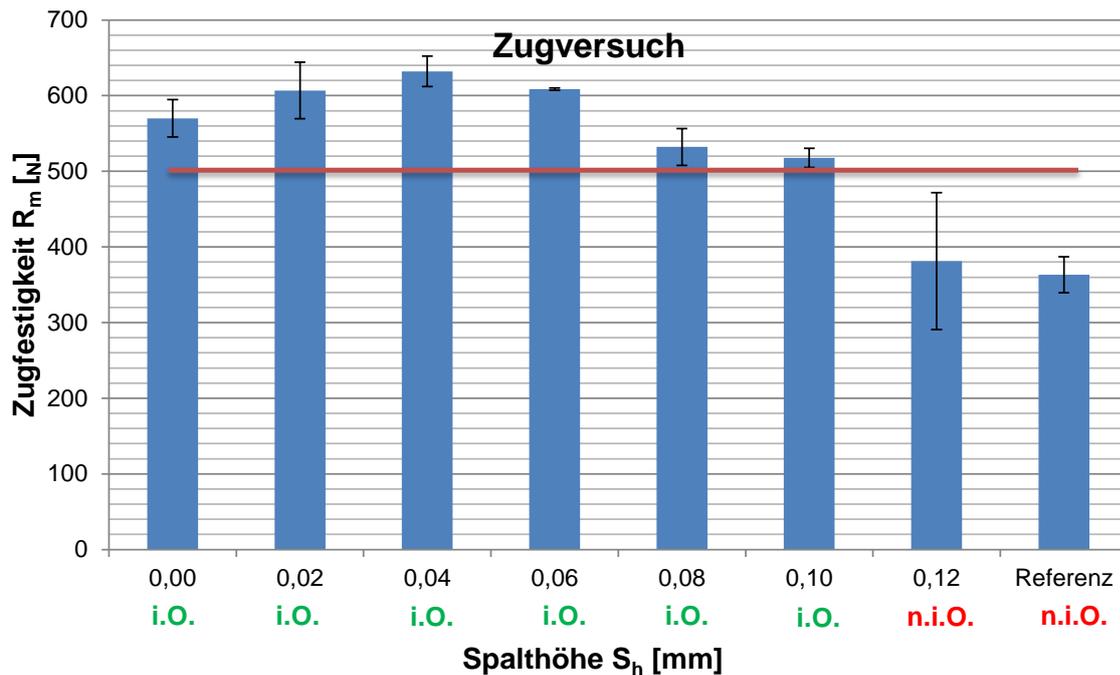


Bild 32: Kategorisierung der Zugversuch Messwerte mittels eines festgelegten Grenzwerts

Infolge dieser Auswertung und der Bestimmung des Grenzwertes kann klar definiert werden, bis zu welcher Spalthöhe die Verschweißung i.O bzw. n.i.O. ist. Für die Entwicklung der taktilen Spannvorrichtung wird somit festgelegt, dass bis zu einer Spalthöhe $\leq 0,10$ mm die Verschweißung als i.O. anzunehmen ist. Bei einer Spalthöhe $\geq 0,10$ wird die Verschweißung als n.i.O. deklariert. Damit ist die zu detektierende Spalthöhe von min. 0,1 mm definiert.

7 Vorversuche zur Definition des Grenzparameters – Spannkraft

Wie im Kapitel 4 „Methoden der Spaltdetektion“ bereits beschrieben, wurde sich für die indirekte Variante entschieden. Wie auch die Spalthöhe, ist die Spannkraft, welche Rückschluss auf den Spalt liefern soll, ein wichtiger Parameter für die Entwicklung einer taktilen Spannvorrichtung. Bei einer zu geringen Spannkraft kann es zu einem Spalt kommen, welcher das Schweißergebnis und die Schweißnahtgüte negativ beeinflusst. Im Folgenden werden der notwendige Versuchsaufbau und die dafür benötigten Messmittel beschrieben. Im Anschluss wird die Versuchsdurchführung mittels eines Versuchsplanes erklärt und die Versuche letztendlich ausgewertet.

Für die Versuche zur Ermittlung eines Zusammenhangs zwischen Spannkraft und zu erwartendem Spalt wurde eigens ein Prüfstand entwickelt und gefertigt. Mit diesem Prüfstand ist es möglich, wiederholgenau eine konstante Spannkraft auf die, im Prüfstand befindliche, SV aufzubringen. Neben dem Aufbringen einer konstanten Spannkraft ist es auch möglich, variable Spannkraftwerte einzustellen. Somit können Spannkraften von 0-100 N beliebig aufgebracht werden. Die Obergrenze von 100 N Spannkraft wurde seitens tk SY gegeben. Da die AK auf dem Zellrahmen aufliegen, darf nur eine begrenzte Spannkraft aufgebracht werden. Bei einer zu hohen Spannkraft kann es zur Deformation oder zur Beschädigung am Zellrahmen u. o. an der im Zellrahmen befindlichen Pouchzelle kommen.

7.1 Versuchsaufbau – Spannkraft

Der Versuchsaufbau zur Ermittlung eines Zusammenhangs zwischen Spannkraft und zu erwartendem Spalt ist in Bild 33 dargestellt. Der Prüfstand besteht aus mehreren Komponenten, welche nummeriert sind.

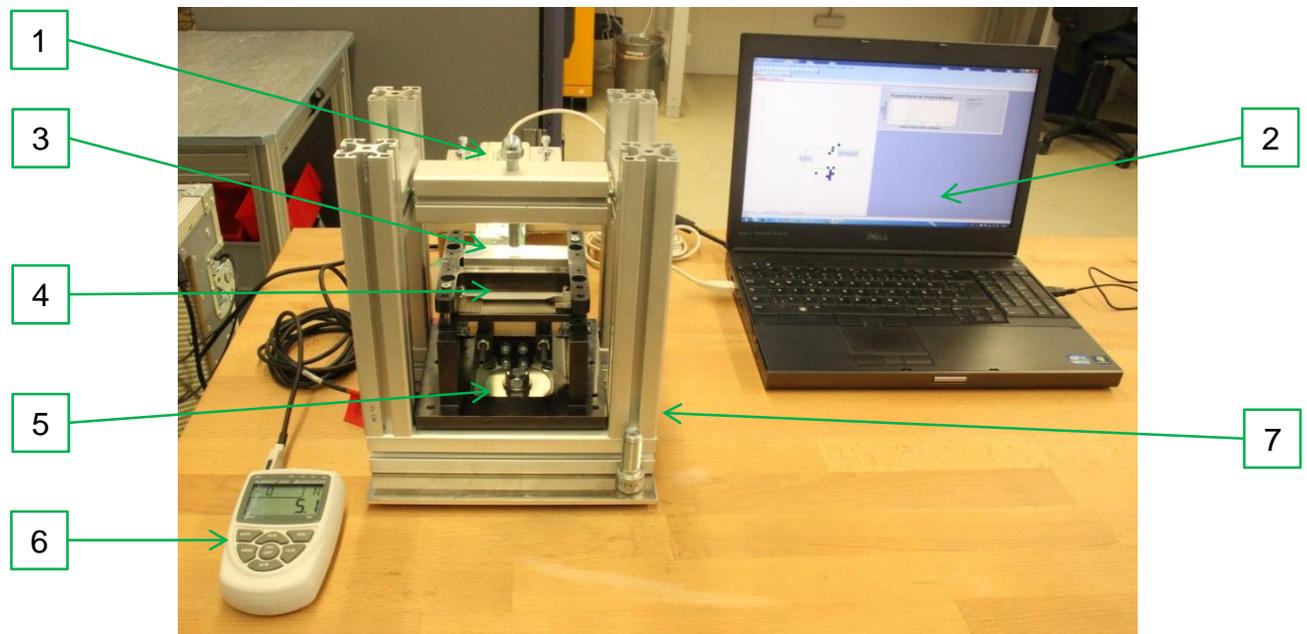


Bild 33: Aufbau Prüfstand mit Auswertelektronik

- | | |
|--|-------------------------------------|
| 1 Messgerät Elektronische Druckmessfolie | 5 Kraftmessdose |
| 2 Tekscan Software | 6 Auswertgerät Kraftmessdose |
| 3 Elektronische Druckmessfolie | 7 Prüfstand zur Grenzwertermittlung |
| 4 Schweißvorrichtung tk SY | |

Mit dem in Bild 33 dargestellten Prüfstand wurden die Vorversuche zur Definition der Grenzparameter – Spannkraft durchgeführt. Analog zur Ermittlung der Grenzwerte für die Spalthöhe, ist es auch hier notwendig, einen definierten Spalt zwischen den AK zu erzeugen. Dieser wird mittels eines Unterlegbleches, zu sehen in Bild 34, erzeugt. Somit soll untersucht werden, mit welcher Spannkraft welcher Spalt vermieden werden kann. Diese Versuche werden mit zwei verschiedenen Spannvarianten durchgeführt.

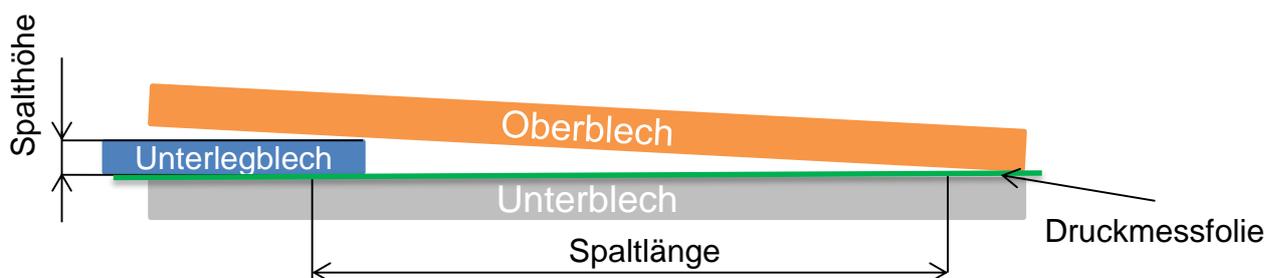


Bild 34: Schematische Darstellung des inneren Versuchsaufbaus

Im Bild 35 ist der Versuchsaufbau im Inneren der SV zu sehen. Das linke Bild zeigt den inneren Aufbau, dabei werden die Bauteile wie folgt gestapelt (Reihenfolge von unten nach oben): Unterer AK – elektronische Druckmessfolie – Unterlegblech links – oberer AK. Auf dem rechten Bild ist die Tekscan Software Oberfläche zu sehen.

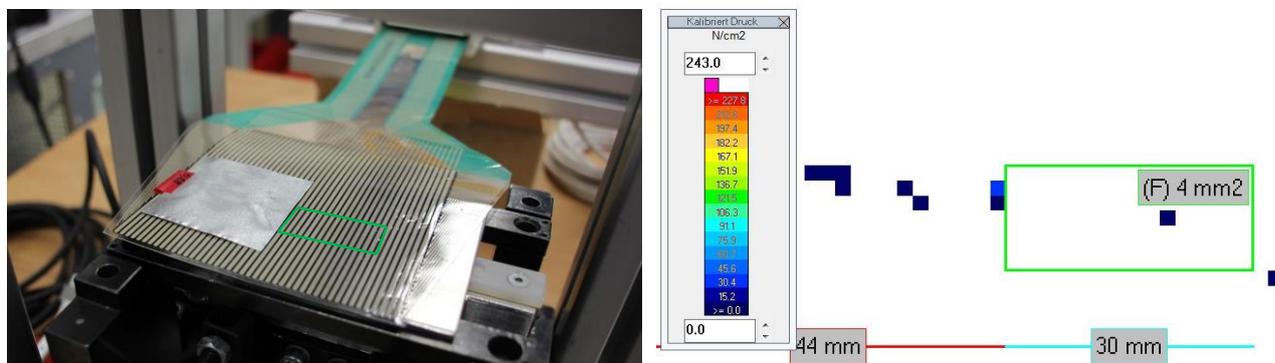


Bild 35: Aufbau Druckmessfolie mit Prozessfenster

Sowohl im linken als auch im rechten Bild ist ein grünes Prozessfenster eingezeichnet. Es stellt den Laserschweißbereich dar, in welchem später die Schweißnaht liegt. In diesem definierten Bereich findet die eigentliche Auswertung statt. Im linken oberen Bereich des Prozessfensters kann die interne belastete Fläche abgelesen werden, aktueller Anzeigewert ist (F) 4mm². Mittels dieses Ablesewertes wird später eine Aussage über die belastete Fläche und folglich über den vorliegenden Spalt getroffen. Um diese Aussage über den vorliegenden Spalt zu referenzieren, wird mittels eines Makroobjektives und einer Spiegelreflexkamera ein seitliches Bild des Spaltes aufgenommen. Anhand einer aufgezeichneten Skala am Unterblech können diese Bilder später vermessen werden und dadurch die jeweiligen Messwerte der Druckmessfolie referenzieren. In Bild 36 links sind der Versuchsaufbau mit der Spiegelreflexkamera und rechts das markierte Unterblech zu sehen. Das Unterblech wurde seitlich mit blauer Farbe lackiert und danach wurden in 2 mm Schritte Markierungen angezeichnet.

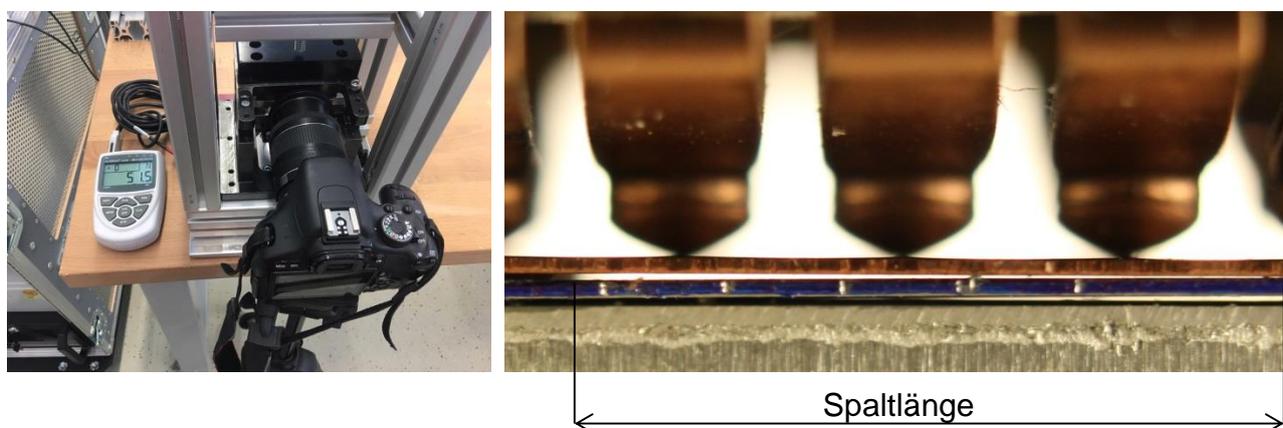


Bild 36: Aufnahme des seitlichen Spaltes

7.2 Versuchsdurchführung – Spannkraft

Analog der Versuchsdurchführung zur Ermittlung des Grenzwertes der Spalthöhe wird auch bei der Ermittlung der Spannkraft mit einem Versuchsplan gearbeitet. In Tabelle 8 ist die Vorgehensweise zur Durchführung der Versuche zur Spannkraft Schritt für Schritt beschrieben.

Tabelle 8: Versuchsplan zur Ermittlung der Spannkraft

Schritt	Durchführung/ Handlung
1	Inbetriebnahme der Geräte
2	Kalibrieren der Druckmessfolie
3	Einstellung der Auswertelektronik
4	Probenvorbereitung
4.1	Einlegen des Unterbleches
4.2	Positionieren der Unterlegbleche zur Spalterzeugung
4.3	Einlegen des Oberbleches
4.4	Anbringen des Oberteils (Niederhalters) der SV
5a	Messvorgang – Elektronische Druckmessfolie
5.1a	Aufbringen der jeweiligen Prüfkraft (10...20...100 N)
5.2a	Anzeigewert der Auswertbox in Excel Tabelle Exportieren
5.3a	Bild der Druckverteilung aufnehmen und abspeichern
5b	Messvorgang – Makro Aufnahmen
5.1b	Aufbringen der jeweiligen Prüfkraft (10...20...100 N)
5.2b	Bild der Spaltlänge aufnehmen
5.3b	Spaltlänge via Gimp vermessen und in Excel Tabelle eintragen
6	Wiederholung
6.1	Jeweils 3 gleiche Proben für statische Zwecke prüfen und auswerten (Wiederholung ab Schritt 4)
6.2	Neue Probe mit anderer Prüfkraft und auswerten (Wiederholung ab Schritt 4)

Bei den Versuchen zur Ermittlung des Grenzwertes der Spannkraft wurde mit drei Varianten gearbeitet. Diese wurden bei den Versuchen im direkten Vergleich miteinander bewertet. Das jeweilige Vorgehen war dabei gleich. In Bild 37 auf Seite 45 sind die drei Spannvarianten zur Versuchsdurchführung zu sehen.

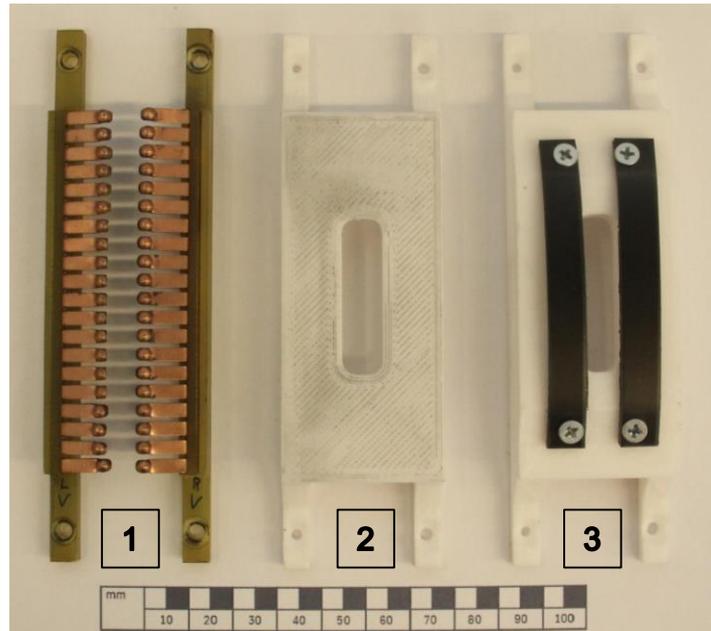


Bild 37: Spannmasken zur Durchführung der Messversuche

Spannvariante 1: im Folgenden als Feuerherdt bezeichnet, da der Hersteller dieser Kupferzangen Feder die Firma Feuerherdt ist.

Spannvarinate2: im Folgenden als Festauflage bezeichnet, da diese starre Spannmaske den aktuellen Ist-Stand widerspiegelt.

Spannvarinate3: im Folgenden als Blattfeder bezeichnet, da die Optik und Funktionsweise an eine Blattfeder erinnert.

Zuerst wurde die jeweilige Spannvariante in das Oberteil der SV eingebaut. Der Prüfstand wurde vorbereitet und die Proben eingelegt. Im Anschluss wurde wie in Tabelle 8 auf Seite 45 vorgegangen und die Versuche durchgeführt.

Neben der Untersuchung zwischen Spannkraft und belasteter Fläche wurden im Zuge der Messversuche auch verschiedene Spannkonzpte überprüft. Begonnen wurde dabei mit der Spannvariante 2 (Festauflage), diese feste Spannmaske stellt den bereits in Kapitel 4.3 beschriebenen Ist-Stand dar. Ausgehend von den dabei ermittelten Messdaten kann eine Aussage über die mögliche Steigerung der Prozessstabilität infolge anderer Spannmaskenkonzepte getroffen werden.

7.3 Versuchsauswertung – Spannkraft

Für die Auswertung der Versuche zur Ermittlung der Spannkraft und zur Prüfung des Zusammenhangs zwischen Spannkraft und belasteter Fläche fanden zwei Auswertverfahren Anwendung. Zum Einen wurden mittels Kamera und Makroobjektiv Bilder aufgenommen und diese mit entsprechender Bildbearbeitungssoftware namens Gimp vermessen, zum Anderen wurde anhand der elektronischen Druckmessfolie die belastete Fläche ausgewertet. Wie bei der Versuchsauswertung der Spalthöhe werden zwei Messverfahren angewandt, welche sich gegenseitig als Referenz dienen.

7.3.1 Auswertung mittels elektronischer Druckmessfolie

Bei der Auswertung durch die elektronische Druckmessfolie wird sich auf die belastete Fläche konzentriert. Eine hohe belastete Fläche ist für den Schweißprozess zwingend erforderlich, sie stellt sicher, dass die zu fügenden Bleche flächig aufeinander liegen und dass während des Schweißprozesses wenig Verzug infolge der Wärmezufuhr entsteht.

Im Bild 35 auf Seite 43 ist die Druckmessfolie und dessen Ausgabeoberfläche/ Softwareoberfläche zu sehen. Anhand dieser kann die aufgebrachte Druckkraft und die dabei belastete Fläche zwischen den AK ausgewertet werden. Diese Werte dienen als Messwerte des im Bild 38 dargestellten Diagramms. Dabei ist die belastete Fläche in Abhängigkeit von der aufgebrachten Druckkraft abgebildet. Ebenso sind die jeweiligen Stabw. an den einzelnen Messwerten angetragen.

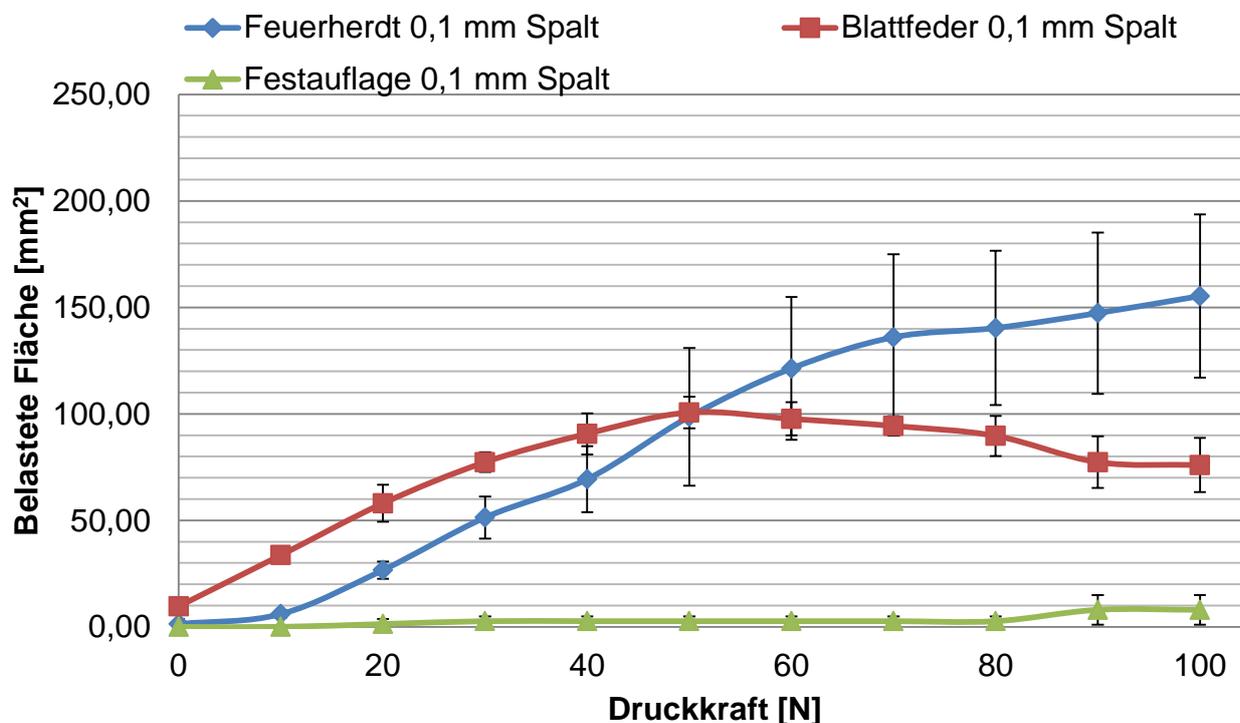


Bild 38: Abhängigkeit der belasteten Fläche von der aufgebrachten Druckkraft

Wie im Diagramm im Bild 38 Seite 46 zu erkennen, beginnen alle drei Spannvarianten mit einer ähnlich belasteten Fläche. Die Ist-Stand Variante verändert sich kaum und bleibt über den kompletten Messbereich von 100 N im untersten Bereich der belasteten Fläche. Bei den Varianten Feuerherdt und Blattfeder hingegen steigt die belastete Fläche relativ gleichbleibend bis zu einer Erhöhung der Druckkraft auf etwa 50 N. Dort ist ein Abfallen der belasteten Fläche der Spannvariante Blattfeder zu erkennen. Im Vergleich dazu steigt die belastete Fläche der Feuerherdt Variante weiter an, bis zum Ende des Messbereiches bei 100 N.

Blattfeder

Dieses Abfallen der belasteten Fläche lässt sich durch die Geometrie der Blattfeder erklären. Bis zur Druckkraft von etwa 50 N ist die Druckfläche punktuell auf der Mittelachse der Blattfeder. Die Mittelachse (rot) der Blattfeder ist im Bild 39 zu sehen. Infolge der Erhöhung der Druckkraft biegt sich die Blattfeder komplett durch, bis diese etwa gerade und flächig auf den AK aufliegt. Im Anschluss daran biegt sich die Blattfeder weiter, bis aus der flächigen Auflage zwei punktuelle Auflagen werden. Diese sind so weit von der Mittelachse entfernt, dass sie außerhalb des Messbereiches liegen. Somit liegt die belastete Fläche außerhalb des definierten Prozessfensters und die dabei generierte Druckfläche wird nicht mit in die Auswertung einbezogen.

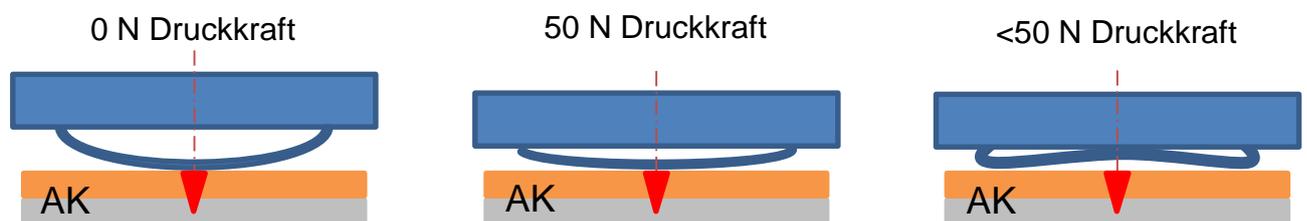


Bild 39: Verhalten der Spannvariante Blattfeder infolge der Druckkraft

Feuerherdt

Im Vergleich zur Blattfeder gibt es bei Feuerherdt kein komplettes Durchbiegen und somit auch keine örtliche Änderung der Druckfläche. Ebenso bleibt die Belastungsfläche gleich, da alle Feuerherdt Elemente unabhängig von Ihrem Gegenüber bzw. Nachbarn arbeiten. Zu sehen ist dieser Sachverhalt im Bild 40. Der Anstieg der Belastungsfläche erklärt sich durch die Federsteifigkeit der Feuerherdtdedern, welche sich im Messbereich bis 100 N nicht komplett durchbiegen.

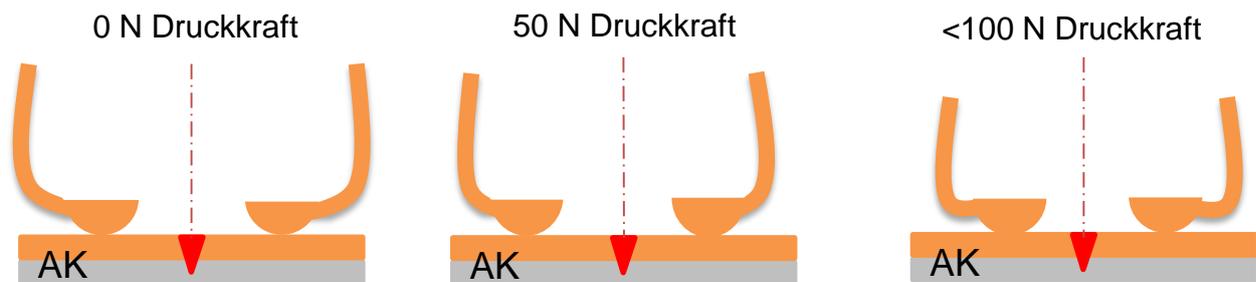


Bild 40: Verhalten der Spannvariante Feuerherdt infolge der Druckkraft

Festauflage

Bei der Festauflage verhält es sich ganz anders, da keine Elastische Verformung auftritt. Durch die starre, unnachgiebige Auflage findet nur eine schlechte Druckverteilung statt. Da die Druckpunkte außerhalb des Prozessfensters liegen, ist die belastete Fläche so gering. Auch mit Erhöhung der Druckkraft ändert sich dies nicht.

7.3.2 Auswertung mittels Makroaufnahmen

Um die, mit der Messfolie ermittelten, Messwerte zu referenzieren, wurden von den Proben bei entsprechender Druckkraft Silhouette - Makroaufnahmen angefertigt. Durch die seitliche Betrachtung und einer leichten Beleuchtung in Richtung Kameraobjektiv ist der vorhandene Spalt gut zu erkennen. Im Anschluss an die Aufnahmen werden diese mittels Gimp vermessen und die Daten in Excel eingefügt. Anhand der Messwerte wurde das Diagramm in Bild 41 auf Seite 50 erzeugt. Dabei ist die Spaltlänge in Abhängigkeit von der Druckkraft abgebildet. Ebenso abgebildet sind die Stabw. der einzelnen Messwerte, die als schwarze Linien an den jeweiligen Probenpunkten angezeigt werden.

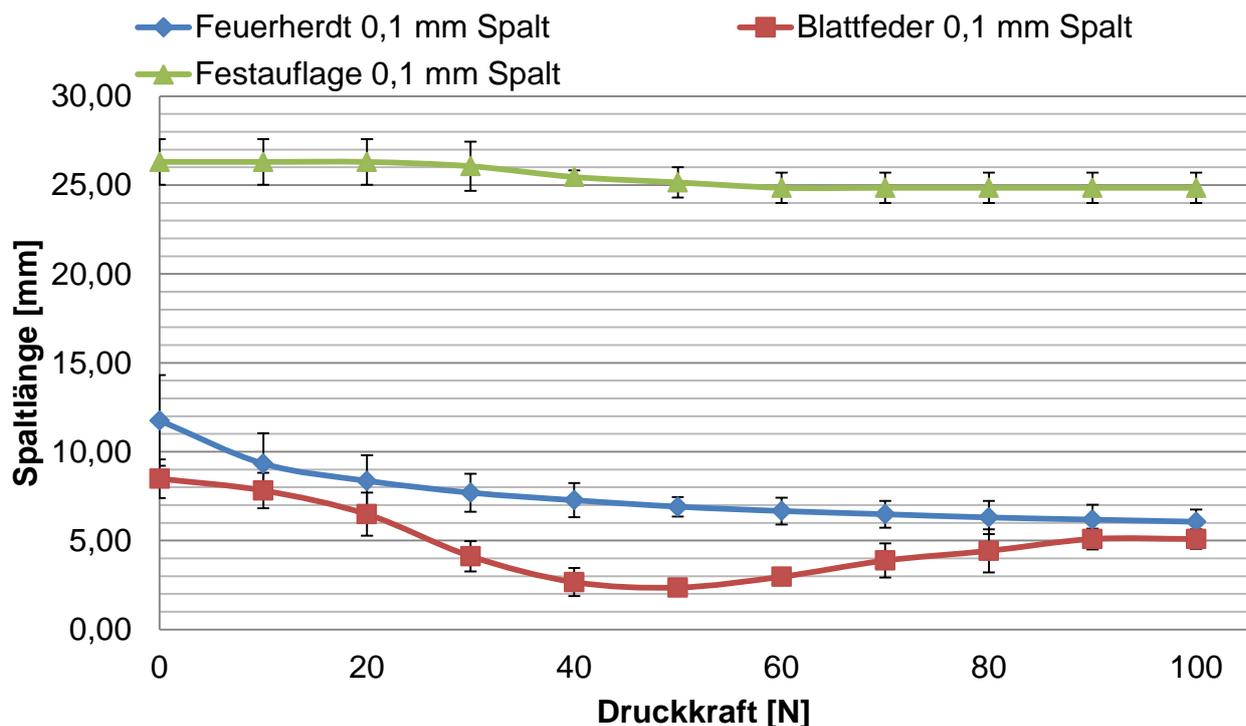


Bild 41: Abhängigkeit der Spaltlänge zur aufgebrachten Druckkraft

Im Bild 41 ist gut ersichtlich, dass sich die Spaltlänge mit zunehmender Druckkraft verringert. Dieser Zusammenhang ist bei der Festauflage kaum bis gar nicht zu erkennen, bei der Feuerherdt - Variante annähernd linear und bei der Blattfeder - Variante nicht linear. Die Messwerte zeigen, dass die Blattfeder - Variante bei einer Druckkraft von etwa 50 N die kürzeste Spaltlänge aufweist. Mit steigender Druckkraft nimmt die Spaltlänge jedoch wieder zu. Dieses Verhalten erklärt sich wie auch bei der belasteten Druckfläche durch die Geometrie der Blattfeder und deren elastischer Verformung. Die Ursache dafür wurde bereits in Kapitel 7.3.1 „Auswertung mittels elektronischer Druckmessfolie“ auf Seite 47 genau beschrieben.

Anhand der geringen Spaltlänge der Blattfedervariante bei 50 N Druckkraft sollte anzunehmen sein, dass dabei die höchste Wahrscheinlichkeit für eine spaltfreie Schweißung vorliegt. Da allein diese optische Messverfahren und dessen Messwerte keine sichere Aussage über den tatsächlich vorhandenen Spalt gibt, werden die Messdaten der Makroaufnahmen und die der elektronischen Messfolie miteinander verglichen und auf Plausibilität geprüft.

7.3.3 Zusammengefasste Auswertung Makroaufnahmen und elektronische Druckmessfolie

Um eine sichere und referenzierte Aussage über den vorliegenden Spalt zwischen den AK zu treffen, ist es notwendig, mindestens zwei voneinander unabhängige Messverfahren zu verwenden. Im Falle der hier vorliegenden Versuche sind das die Bildaufnahme und somit optische Auswertung und die Aufnahme der belasteten Fläche, welche eine elektronische

Auswertung darstellt. Anhand der gemessenen Spaltlänge und der belasteten Fläche lässt sich eine Aussage über den Zusammenhang von Spannkraft zu erwartendem Spalt geben und damit der Grundstein für die Entwicklung der taktilen Spannvorrichtung legen.

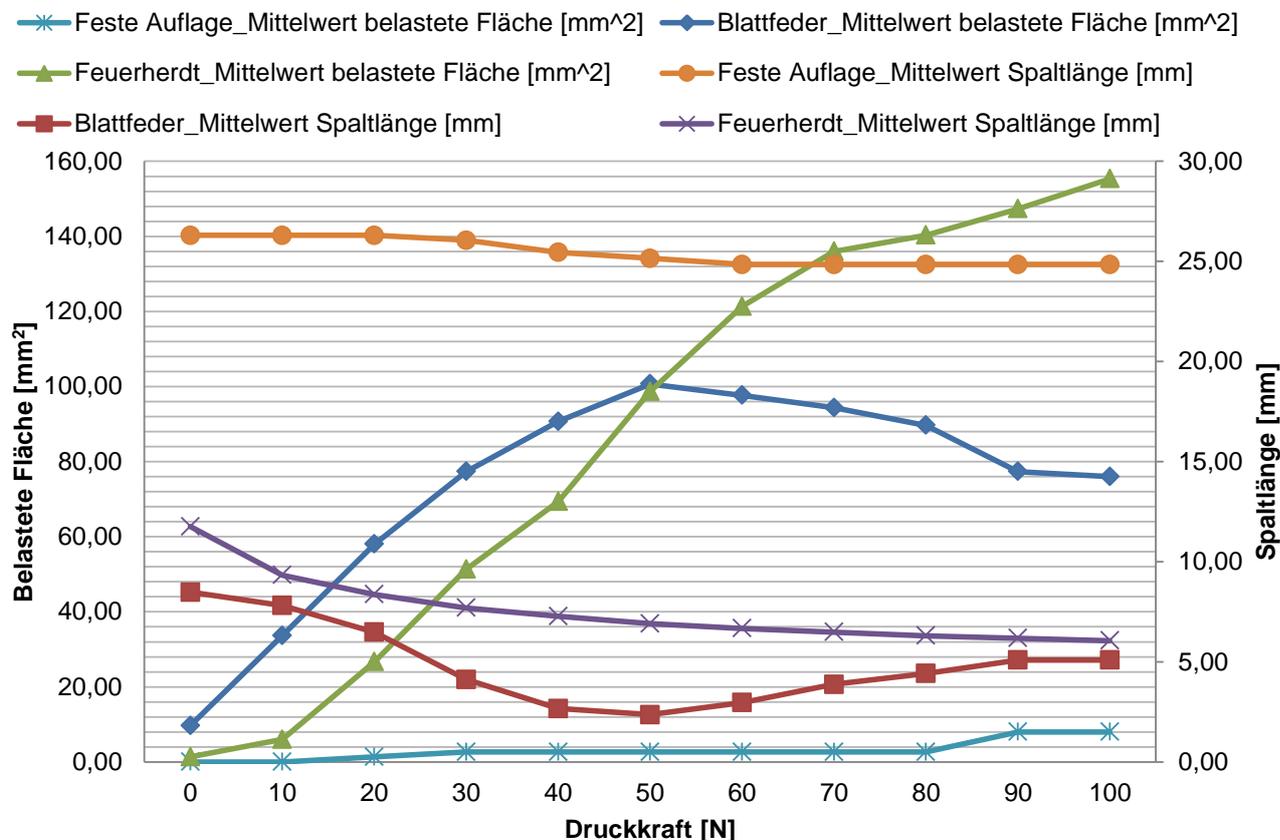


Bild 42: Mittelwerte für Spaltlänge und belastete Fläche beider Spannvarianten

Im Bild 42 ist der Zusammenhang von Spaltlänge und belasteter Fläche zu sehen. Die Festaufgabe, welche den Ist-Stand repräsentiert, weist mit einer mittleren Spaltlänge von 24,85 mm und der mittleren belasteten Fläche 2,67 mm² die mit Abstand geringsten Messwerte auf. Im Vergleich dazu stellen die Blattfeder- und Feuerherdtvariante eine signifikante Verbesserung dar.

Die Blattfedervariante liefert ihr bestes Spannergebnis bei etwa 50 N. Dabei ist die mittlere Spaltlänge mit 2,36 mm und die mittlere belastete Fläche mit 100,67 mm². Im Vergleich dazu ist die Feuerherdt Variante bei der mittleren Spaltlänge mit 6,06 mm etwas schlechter, wohingegen die mittlere belastete Fläche mit 155,33 mm² wiederum besser ist. Wie bereits im Kapitel 7.3.1 Auswertung mittels elektronischer Druckmessfolie erläutert, ist eine hohe/ große belastete Fläche für den Schweißvorgang unerlässlich.

Anhand der zahlreichen Messwerte und der Auswertung derer lässt sich sagen, dass kein direkter (messbarer) Zusammenhang zwischen Spannkraft und Schweißspalt besteht. Somit ist die These, dass durch das Messen der Spannkraft Rückschluss auf den vorliegenden Spalt getroffen werden kann, nicht korrekt. Allerdings zeigten die Versuche, dass unter optimalen Spannbedingungen mit reproduzierbarer Spannkraft Spalt weitestgehend verhindert werden kann. Weiterhin kann die Prozessstabilität erhöht werden, wenn statt einer Festauflage eine Elastisch verformbare Spannmaske verwendet wird. Bei den Versuchen hat sich dabei die Feuerherdt - Variante als zielführend herausgestellt. Die Feuerherdt - Variante liefert im Vergleich zur Festauflage eine signifikant größere belastete Fläche bei einer wesentlich geringeren Spaltlänge.

Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse lässt sich ebenso sagen, dass eine permanente Spannkraftüberwachung sinnvoll ist, da die jeweiligen getesteten Varianten unterschiedliche optimale Spannkräfte aufweisen. Mittels einer taktilen Spannvorrichtung kann die Spannkraft überwacht und reguliert werden. Dadurch kann direkt Einfluss auf die Spannkraft und somit auch auf die Störgröße Spalt genommen werden. Die Versuche zeigen, dass die belastete Fläche abhängig von Spannmaske und Druckkraft ist. Mit der Feuerherdt - Spannmaske und einer entsprechend überwachten und gesteuerten Druckkraft kann die Prozessstabilität somit deutlich erhöht werden.

8 Definierte Grenzparameter aus Vorversuchen

In den vorherigen Kapiteln wurden die Parameter und die Grenzwerte für die Anforderungsliste festgelegt. Diese sind in Tabelle 10 nochmals zusammengefasst. Sie dienen dem Entwickeln der Spannvorrichtung und möglicher Systeme zur Spaltdetektion.

Tabelle 9: Prozessparameter aus Vorversuchen

Benennung	Formelzeichen	Wert	Einheit	Quelle
Laserleistung	P	3500	W	Versuche
Vorschubgeschwindigkeit	v	505	mm/s	Versuche
Streckenenergie	S	693	J/m	Berechnung im Anhang Anlage 3
Brennweite	f	345	mm	Typenschild
Durchmesser LLK	dk	75	µm	Typenschild
Fokusbildmesser	d ₀	0,188	mm	Berechnung im Anhang Anlage 3
Max. Spalthöhe	S _{h max.}	0,10	mm	Versuche
Max. Spannkraft	F _{sp max}	100	N	Versuche
Ideale Spannkraft Variante 1 – Feuerherdt	F _{opt.V1}	100	N	Versuche
Ideale Spannkraft Variante 2 – Blattfeder	F _{opt.V2}	50	N	Versuche

Nach dem Definieren der Grenzparameter durch Versuche und deren Auswertung werden diese in die Anforderungsliste eingepflegt. Die dabei gewonnenen Grenzparameter dienen als Systemgrenzen für die Entwicklung einer taktilen Spannvorrichtung.

9 Methodisches Konstruieren nach VDI 2221 und VDI 2222

Zur Herstellung eines Produktes, welches den Wirtschaftlichen und Technischen Anforderungen der Problemstellung gerecht werden soll, ist es vorteilhaft; auf bewährte Entwicklungs- u. Konstruktionsmethoden zurückzugreifen. Diese bewährten Methoden zur Entwicklung und Konstruktion sind in der VDI 2221 und VDI 2222 zu finden. Die Gestaltung des Entwicklungsprozesses nach VDI 2221 – Entwicklung technischer Systeme und Produkte ist im Bild 43 zu sehen.

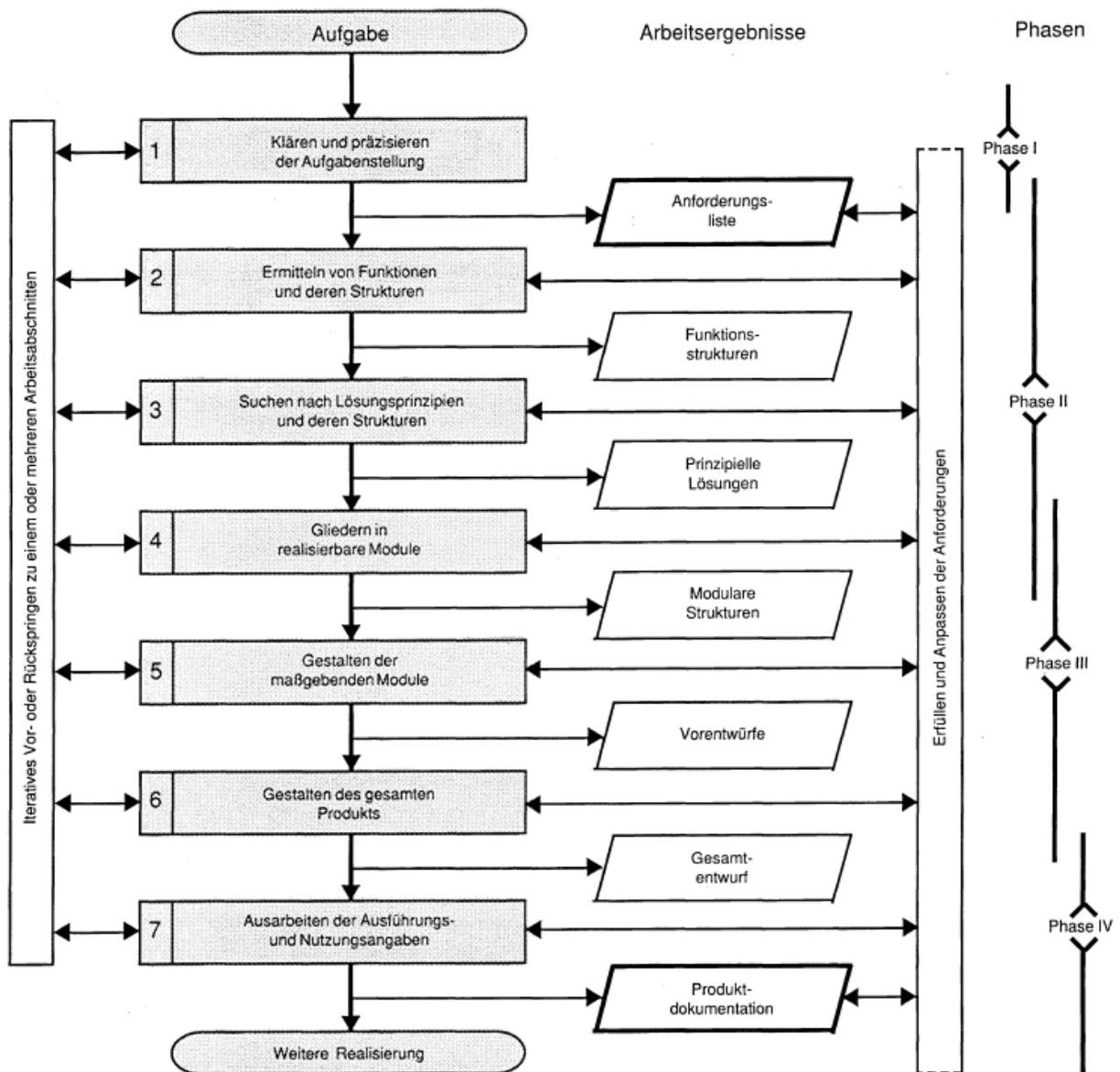


Bild 43: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren nach VDI 2221 [33]

Anhand des Generellen Vorgehens in Bild 43 werden die nachfolgenden Gliederungspunkte unterteilt. Dabei sollen Arbeitsergebnisse von der Anforderungsliste bis hin zum Gesamtentwurf erstellt werden.

1. Arbeitsschritt

Alle Anforderungen an das Produkt müssen festgehalten werden, das bedeutet alle verfügbaren Informationen werden zusammengetragen und in einer Anforderungsliste schriftlich niedergeschrieben. In Folge des Entwicklungsprozesses kann es zu einzelnen Änderungen kommen, die in der Anforderungsliste zusätzlich ergänzt werden.

Die Anforderungen für die Entwicklung einer taktilen Spannvorrichtung wurden einerseits durch die Firma tk SY festgelegt und andererseits im Zuge dieser Diplomarbeit ergänzt. Die Anforderungsliste ist in Tabelle 11 auf Seite 56 niedergeschrieben.

2. Arbeitsschritt

In diesem Schritt werden Teilfunktionen, welche die Spannvorrichtung erfüllen, formuliert. Aus diesen Formulierungen werden Funktionsstrukturen gebildet, die als Grundlage der Suche nach Konstruktionslösungen dienen.

3. Arbeitsschritt

Im dritten Arbeitsschritt werden Lösungsprinzipien für die in Schritt 2 aufgestellten Funktionsstrukturen gesucht. Dabei werden chemische, physikalische oder auch andere Effekte gewählt und durch z.B. Wirkgeometrien oder Wirkbewegungen realisiert.

4. Arbeitsschritt

Dieser Arbeitsschritt dient der Unterteilung prinzipieller Lösungen in realisierbare Module. Dieser Schritt ist vor allem bei komplexen Problemstellungen sinnvoll. Für den vorliegenden Fall der Spannvorrichtung ist er allerdings nicht zwingend notwendig.

5. Arbeitsschritt

Beginnend mit dem fünften Schritt werden erste konkrete Entwürfe der einzelnen Module des zu entwickelnden Produkts gestaltet, also Module, welche die einzelnen Teilfunktionen der Spannvorrichtung erfüllen.

6. Arbeitsschritt

Im sechsten Arbeitsschritt werden die konkreten einzelnen Module zu einem Gesamtentwurf zusammengefasst. Da für alle Teilfunktionen mehrere Lösungen aufgezeigt wurden, können auch mehrere Gesamtentwürfe entstehen. Die Zusammenfassung der Teilfunktionen kann durch einen morphologischen Kasten geschehen.

9.1 Anforderungsliste

Tabelle 10: Anforderungsliste – Taktile Spannvorrichtung [34]

Ausgabe: 03.06.2019		Anforderungsliste für Taktile Spannvorrichtung					Bl.- Anz.2	Bl.-Nr. 1
Änderung	Forde- rung Wunsch	Anforderung					Verantwortlich	
		<i>Vorgabedaten</i>					R. Kreßner	
	F F F F F F	Erhöhung der Prozessstabilität Zugänglichkeit Laserstrahl zur Schweißstelle Bestimmen und Spannen der SV auf dem Ma- schinentisch Bestimmen und Spannen des Batteriemoduls Spannen der AK durch Niederhalter Ausgabe der Spannkraft					R. Kreßner	
	F F F W W	<i>Geometrie</i> Abmessungen Vorrichtung kleiner Anzahl aufzunehmender Zelle 2 Anzahl aufzunehmender Zellrahmen 3 Erweiterbar zur Aufnahme mehrerer Zellen Erweiterbar zur Aufnahme mehrerer Zellrah- men					R. Kreßner	
	F F	<i>Kräfte</i> Vertikale Spannkraft bis 150 N Keine Verformung der Vorrichtung bei Hand- ling ohne Batteriezelle					R. Kreßner	
	F W W	<i>Energie</i> Versorgungsspannung Messsysteme 12V Spannkrafterzeugung durch E-Mechanik Spannkrafterzeugung durch Pneumatik					R. Kreßner	
	F	<i>Signal</i> Ausgabe Spannkraft als analoges Signal					R. Kreßner	
Änderung	1	2	3	4	5	6	7	
Datum	23.07.19							

Ausgabe: 03.06.2019		Anforderungsliste für Taktile Spannvorrichtung					Bl.- Anz.2	Bl.-Nr. 2
Änderung	Forde- rung Wunsch	Anforderung					Verantwortlich	
23.07.19	F F F F F F	<i>Stoff und Fertigung</i> Werkstoffe nach internen tk SY Standards korrosionsbeständig hitzebeständig bis 100 °C verschleißarm Fertigungsverfahren nach DIN 8580 Toleranzen nach DIN ISO 2768-1					R. Kreßner	
	F W	<i>Instandhaltung</i> wartungsarm einfacher Austausch und Instandsetzung der Verschleißteile					R. Kreßner	
23.07.19	F W	<i>Rechtsfragen</i> Abnahmeprüfung stichprobenartig nach DIN patentfreie Konstruktion					R. Kreßner	
	F	<i>Termin</i> Abgabe Diplomarbeit: 01.10.2019					R. Kreßner	
Änderung	1	2	3	4	5	6	7	
Datum	23.07.19							

9.2 Ermitteln einzelner Funktionen und deren Strukturen

In diesem Kapitel werden aus den zu erfüllenden Anforderungen der Anforderungsliste einzelne Funktionen abgeleitet. Gerade in der Produktneuentwicklung ist es von Vorteil, sich zu Beginn auf die einzelnen Funktionen und deren Strukturen zu konzentrieren. Durch dieses Vorgehen wird der Suchraum erweitert und es bietet die Möglichkeiten für neue innovative Lösungsansätze. Zudem bildet dieses Vorgehen die Grundlage für andere Entwicklungsmethoden bspw. der Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA).

Definiert werden die Funktionen durch die Aufgaben, welche das zu entwickelnde Produkt realisieren soll. Dabei werden zuerst die Hauptfunktion formuliert und anschließend daraus Teilfunktionen und wiederum daraus weitere Teilfunktionen abgeleitet. Das so entstehende Organigramm zeigt in absteigender Reihenfolge die Funktionen des Produktes. Am Bild 44 ist ein solches Organigramm für die Entwicklung einer taktilen Spannvorrichtung abgebildet.

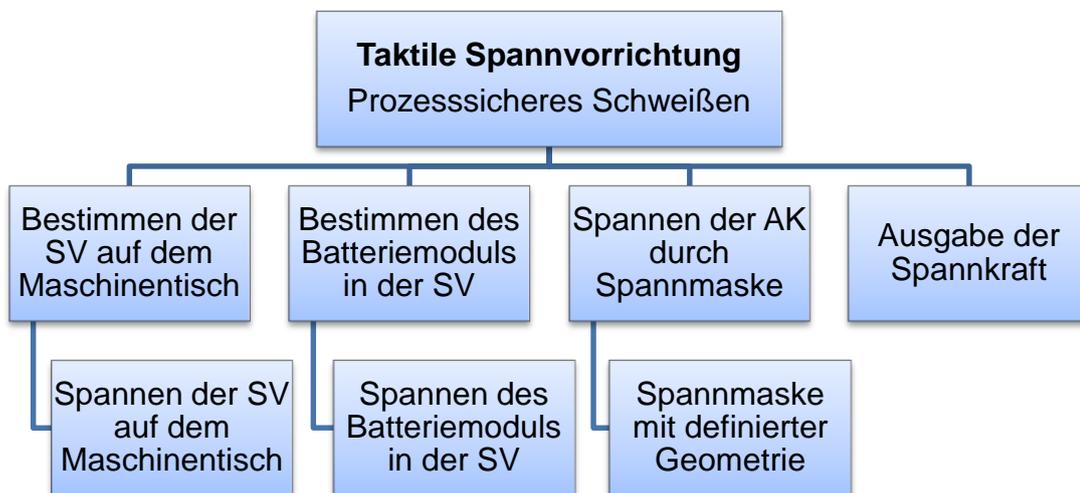


Bild 44: Organigramm der Funktionsstruktur einer taktilen Spannvorrichtung

Die Hauptaufgabe bildet das prozesssichere Schweißen der AK in der ersten Ebene des Organigramms. Zur Realisierung dessen müssen die Funktionen der zweiten Ebene erfüllt werden und wiederum auch die Funktionen der nachfolgenden Ebene. Daraus ergeben sich mehrere einzelne Funktionen, für welche eine Lösung gesucht werden muss. Die Suche nach passenden Lösungen erfolgt dabei unabhängig von den anderen Funktionen.

9.3 Prinzipielle Lösungen der Funktionsstrukturen

Im Anschluss an das Festlegen der Haupt- und Teilfunktionen werden Lösungen für diese gesucht. Die dabei erarbeiteten Lösungen können unter anderem Nebenfunktionen oder auch unerwünschte Eigenschaften aufzeigen. So können Lösungen, welche unerwünschte Eigenschaften mit sich bringen, schon zu Beginn eliminiert werden.

Die einzelnen Lösungsprinzipien können bspw. mit der Methode des „morphologischen Kastens“ analysiert und miteinander kombiniert werden. Die dabei entstehenden Aneinanderreihungen einzelner Lösungsprinzipien ergeben das Gesamtkonzept. Durch verschiedene Lösungsprinzipien ergeben sich jeweils unterschiedliche Varianten an Gesamtkonzepten. Diese können anschließend anhand der zu erfüllenden Haupt- und Teilkriterien mittels einer Variantenbewertung verglichen und bewertet werden. Die Bewertung erfolgt dabei nach DIN 2225. Anhand dieser Bewertung und deren Punktesystem wird eine Entscheidung für das zu entwickelnde Konzept getroffen.

Da die Entwicklung einer taktilen Spannvorrichtung in ihren Funktionen begrenzt und überschaubar ist, werden die prinzipiellen Lösungen für die Hauptkriterien inklusive deren Teilkriterien von Beginn an zusammengefasst. Nachfolgend wird somit kurz die Hauptfunktion und deren Aufgabe beschrieben und dafür 3 Lösungsprinzipien aufgestellt.

Bevor mit der Lösungsfindung begonnen wird, sollten die zu erfüllenden Funktionen noch nach Ihrer auszuführenden Häufigkeit geordnet werden. Gemeint ist damit zum einen ein *einmaliger Vorgang* bspw. das Bestimmen und Spannen der SV auf dem Maschinentisch oder ein *Ständiger Vorgang* bspw. das Bestimmen und Spannen der Pouchzelle in der Vorrichtung.

9.3.1 Bestimmen und Spannen der SV auf dem Maschinentisch

Die zum Schweißen verwendete ABL besitzt einen Nutentisch, auf welchem die zu entwickelnde SV bestimmt und gespannt werden soll. Wichtig ist dabei eine ausreichend hohe Spannkraft, welche ein Verschieben oder Kippen der SV auf dem Maschinentisch ausschließt. Eine genaue Positionierung der Vorrichtung auf dem Maschinentisch ist nicht notwendig, wichtig ist nur die genaue Ausrichtung zum Maschinenkoordinatensystem. Die genaue Ausrichtung des Laserstrahls erfolgt dann über das Verfahren der X und Y-Achse. Dabei wird mittels Pilotlaser oder Kamerasystem der Laserstrahl genau auf den Ableiterkontakten positioniert.

In Tabelle 12 sind drei mögliche Varianten zum Bestimmen und Spannen der Spannvorrichtung auf dem Maschinentisch aufgezeigt.

Tabelle 11: Konzepte zum Bestimmen und Spannen auf dem Maschinentisch

Variante / Funktion	1	2	3
Bestimmen	SV direkt auf Maschinentisch schrauben	Flachspanner	Nutensteine mit aufgeschraubtem Anschlag
Spannen			Schnellspanner

9.3.2 Bestimmen und Spannen des Batteriemoduls in der SV

Bei dem Batteriemodul handelt es sich um zwei Pouchzellen und drei Zellrahmen, welche fest miteinander verbunden sind. Die Ableiter der beiden Pouchzellen müssen mit entsprechender Spannkraft gespannt werden, um dadurch Spalt zu vermeiden und eine prozesssichere Verschweißung zu gewährleisten. Anhand der Tabelle 13 sind 3 verschiedene Varianten zur Lösung der Problemstellung aufgestellt.

Tabelle 12: Konzepte zum Bestimmen und Spannen des Batteriemoduls in der SV

Variante / Funktion	1	2	3
Bestimmen	Federstifte	Fangstift	Gummidruckstücke und Anlageflächen
Spannen	Zylinderschraube	Exzentrerspanner	Kniehebelspanner

9.3.3 Spannen der AK durch definierte Niederhaltergeometrie

Im Kapitel 4: „Vorversuche zur Definition der Grenzparameter – Spannkraft“ wurden bereits zwei mögliche Niederhaltergeometrien vorgestellt und miteinander verglichen. Im Vergleich zu den beiden getesteten Varianten sieht der aktuelle Stand der Technik im AK-Schweißen eine Spannmaske/ Schweißmaske vor, welche federnd gelagert ist. Vorteil der beiden getesteten Varianten ist die federnde und anpassende Form, welche für eine bessere Druckverteilung und somit für ein geringeres Spaltmaß sorgt. Die Ist-Stand Variante sorgt durch eine harte Spannmaske und das ausschließliche Federn in z-Richtung für ein schlechteres Spannergebnis. Anhand der Tabelle 14 sind drei verschiedene Varianten zur Lösung der Problemstellung aufgestellt.

Tabelle 13: Konzepte zum Spannen der AK

Variante Funktion	1	2	3
Niederhalter	Feuerherdt - Variante mit federnden Kupferstücken	Blattfeder - Variante mit Kunststofffederelementen	starre Variante gefedert
Spannkraft aufbringen	Elektrozylinder	Pneumatik Zylinder	mechanisch durch Federkraft

9.3.4 Ausgabe der Spannkraft

Die in Kapitel 7 „Vorversuche zur Definition des Grenzparameter – Spannkraft“ ermittelten Daten liefern die Aussage, dass die Ausgabe der Spannkraft sinnvoll ist. Mit diesem Prozessparameter kann die Prozessstabilität der Verschweißung erhöht werden. Ebenso gibt es für die jeweilige Niederhaltervariante eine optimale Spannkraft $F_{opt.}$, welche zu verwenden ist. Zur Sicherstellung dieser optimalen Spannkraft wird diese anhand der Spannkraftausgabe ermittelt und angepasst. In Tabelle 15 sind drei mögliche Varianten zur Ausgabe der Spannkraft aufgezeigt.

Tabelle 14: Konzepte zur Ausgabe der Spannkraft

Variante Funktion	1	2	3
Ausgabe Spannkraft	Ausgabe mittels Elektronischer Druckmessfolie	Ausgabe durch Dehnungsmessstreifen (DMS) am Niederhalter	Ausgabe durch Kraftmessdose am Pneumatikzylinder

10 Konzept einer taktilen Spannvorrichtung

Anhand des Organigramms Bild 44 auf Seite 42 sind prinzipielle Lösungen zur Lösung der Funktionsstrukturen gebildet worden. Diese Lösungen werden in der Tabelle 16 zusammengefasst. Anhand des morphologischen Kastens werden aus verschiedenen Teillösungen zwei Gesamtlösungen formuliert. Diese werden anschließend konstruiert und kurz mit ihren jeweiligen Vor- und Nachteilen beschrieben. Nachfolgend werden die zwei konstruierten Varianten bewertet und eine Entscheidung über das festzulegende Konzept getroffen.

10.1 Morphologischer Kasten

Tabelle 15: Morphologischer Kasten – Taktile Spannvorrichtung

Parameter	Ausprägung 1	Ausprägung 2	Ausprägung 3
Bestimmen und Spannen der SV auf dem Maschinentisch	direkt auf Maschinentischschrauben	Flachspanner	Nutensteine mit Anschlag und Schnellspanner
Bestimmen und Spannen des Batteriemoduls in der SV	Federstifte Zylinderschraube	Fangstifte Exzentrerspanner	Gummi Druckstücke und Anlageflächen mit Kniehebelspannern
Spannen der AK durch definierte Niederhaltergeometrie	Feuerherdt Variante mit federnden Kupferstücken gespannt durch Elektrozyylinder	Blattfeder Variante mit Kunststoff Feder Elementen gespannt durch Pneumatik Zylinder	Festauflage gefedert gespannt mechanisch durch Federkraft
Ausgabe der Spannkraft	Ausgabe durch Dehnmessstreifen am Niederhalter	Ausgabe durch DMS am Niederhalter	Ausgabe mittels Kraftmessdose am Pneumatikzylinder

Anhand des morphologischen Kastens wurden zwei Alternativen bestimmt. Zum Einen die Spannvorrichtungsvariante 1, welche durch den blauen Strich dargestellt ist, zum Anderen die Spannvorrichtungsvariante 2, welche durch den roten Strich dargestellt wurde.

10.2 Spannvorrichtungsvariante I

Im Bild 45 ist die Variante I dargestellt, die sich aus der blauen Linie des morphologischen Kastens aus Tabelle 16 auf Seite 62 ergibt. Diese Variante wird mittels vier Sterngriffen und T-Nutensteinen auf dem Maschinentisch bestimmt und gespannt. Das Batteriemodul im Inneren wird durch Auflageflächen und Druckstücke bestimmt und mittels Kniehebelspannern gespannt. Die Spannkraft wird durch einen Elektrozyylinder aufgebracht und der Niederhalter durch eine Linearführung geführt. Als Niederhalter dient die Feuerherdt – Variante, deren Spannkraft durch DMS und Drehmomentüberwachung des Elektrozyinders überwacht wird. Zum Bestücken der Vorrichtung werden die Kniehebelspanner geöffnet, die Druckplatte entfernt und das Batteriemodul eingelegt bzw. herausgenommen.

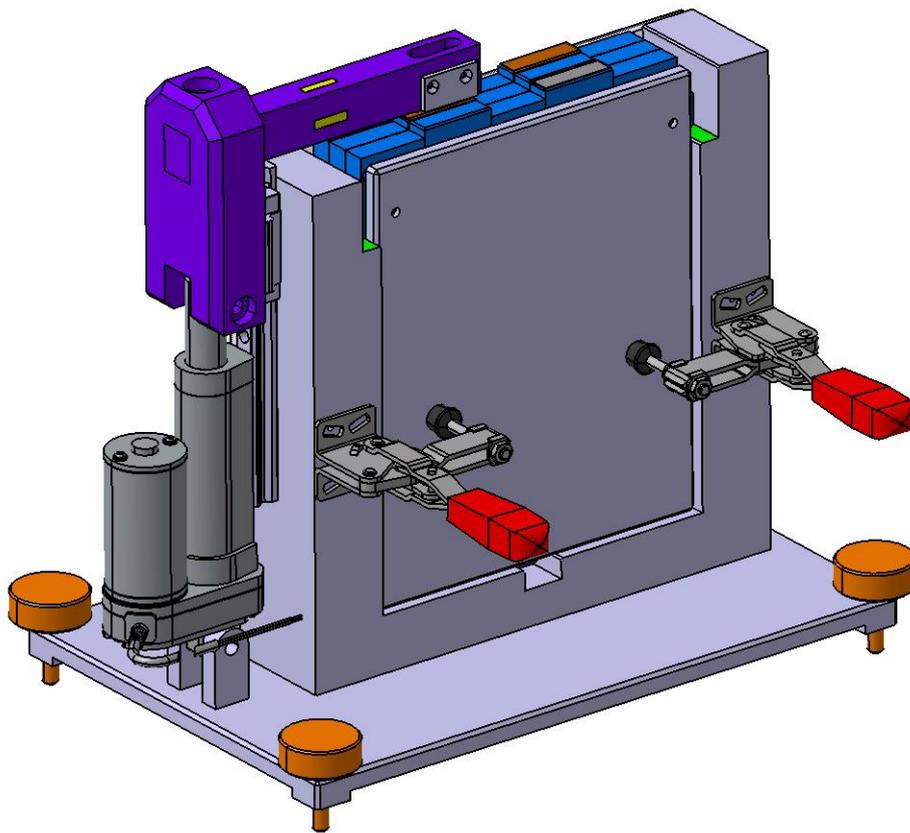


Bild 45: Spannvorrichtung Variante I – Feuerherdt

Vorteile

- leichtes Bestücken der Vorrichtung
- waagrechtes Aufbringen des Niederhalters

Nachteile

- großer Bauraumbedarf durch breites Ausbauen des E Antriebes
- Verschmutzungsgefahr an der Linearführung
- Umrechnung von Biegemoment in Spannkraft nötig

10.3 Spannvorrichtungsvariante II

Im Bild 46 ist die Variante II dargestellt. Sie ergibt sich aus der roten Linie des morphologischen Kastens aus Tabelle 16 auf Seite 62. Diese Variante wird mittels vier Flachspannern auf dem Maschinentisch bestimmt und gespannt. Das Batteriemodul im Inneren wird durch Auflageflächen und Druckstücke bestimmt und durch zwei Sterngriffe gespannt. Die Spannkraft wird durch einen Pneumatik Zylinder aufgebracht und der Niederhalter ist auf einem Umlenkpunkt angebracht. Als Niederhalter dient die Blattfeder - Variante, deren Spannkraft durch eine Kraftmessdose überwacht wird. Zum Bestücken der Vorrichtung werden die Sterngriffe abgeschraubt, die Druckplatte entfernt und das Batteriemodul eingelegt bzw. herausgenommen.

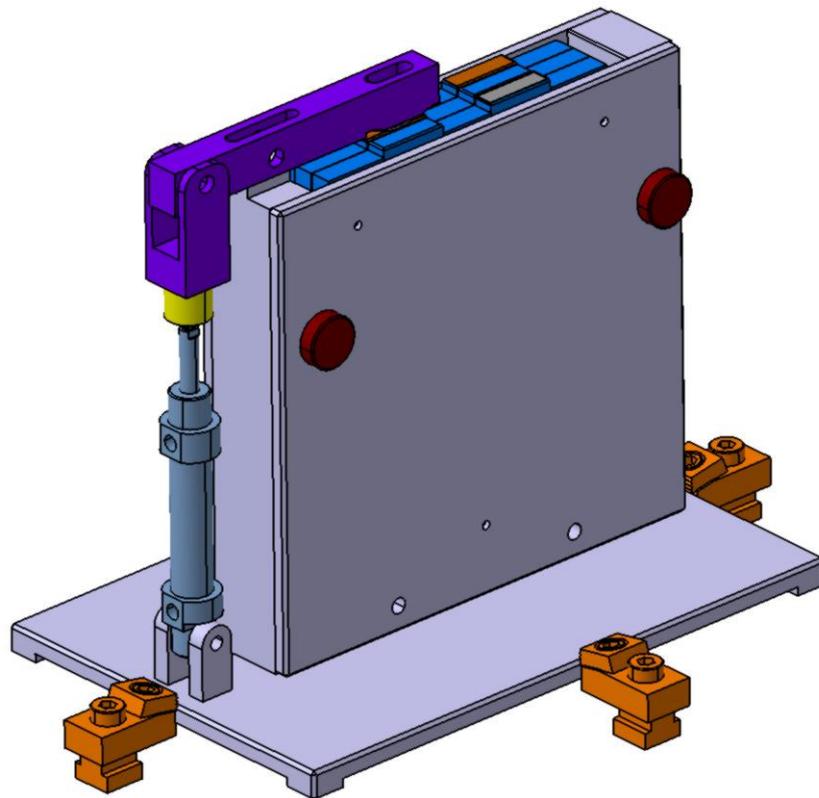


Bild 46: Spannvorrichtung Variante II – Blattfeder

Vorteile

- geringe Spannkraft nötig (50 N)
- direkte Ausgabe der Spannkraft durch Kraftmessdose

Nachteile

- keine definierte waagerechte Auflage des Niederhalters
- hoher regelungstechnischer Aufwand zur Regelung der Spannkraft

10.4 Variantenbewertung

Tabelle 16: Variantenbewertung nach VDI 2225 [35]

Kriterien	Wichtungsfaktoren			Variante			
	f _i	f _j	f = f _i · f _j	I		II	
				p	p · f	p	p · f
a. Funktion	0,4	/	/	/	/	/	/
Erhöhung Prozessstabilität		0,3	0,12	4	0,48	3	0,36
Benötigte Spannkraft		0,2	0,08	1	0,08	3	0,24
Oberflächenbeschädigung		0,1	0,04	1	0,04	2	0,08
Spannkraftausgabe		0,1	0,04	3	0,12	2	0,08
Niederhalterbewegung		0,2	0,08	4	0,32	1	0,08
Bestücken der Vorrichtung		0,1	0,04	3	0,12	2	0,08
b. Kosten	0,2	/	/	/	/	/	/
Entwicklung		0,4	0,08	3	0,24	3	0,24
Herstellung		0,2	0,04	2	0,08	3	0,12
Montage		0,2	0,04	2	0,08	3	0,12
Wartung		0,1	0,02	4	0,08	3	0,06
Recycling		0,1	0,02	3	0,06	3	0,06
c. Montage	0,2	/	/	/	/	/	/
Montage auf Maschine		0,4	0,08	4	0,32	3	0,24
Demontage von Maschine		0,4	0,08	4	0,32	3	0,24
Zusammenbau		0,2	0,04	3	0,12	3	0,12
d. Instandhaltung	0,1	/	/	/	/	/	/
Verschleißteilwechsel		0,3	0,03	4	0,12	2	0,06
Bauteilwechsel		0,3	0,03	3	0,09	3	0,09
Kalibrieren Sensorik		0,4	0,04	4	0,16	2	0,08
e. Geometrie	0,1	/	/	/	/	/	/
Gesamthöhe Vorrichtung		0,3	0,03	3	0,09	3	0,09
Breite Niederhalter		0,3	0,03	3	0,09	3	0,09
Breite Einheit Spannkrafterzeugung		0,4	0,04	2	0,08	3	0,12
Σ	1	/	1	/	3,09	/	2,65

Bewertung nach VDI 2225

sehr gut

gut

ausreichend

gerade noch tragbar

unbefriedigend

p f_i – Wichtungsfaktor, Hauptkriterium

4 f_j – Wichtungsfaktor, Teilkriterium

3

2

1

0

f – Wichtungsfaktor, gesamt

Als Vorzugsvariante wurde die Variante I – Feuerherdt - Variante gewählt.

10.5 Ausgewähltes Konzept

Infolge des Variantenvergleiches und der anschließenden Variantenbewertung wurde eine Vorzugsvariante ermittelt. Diese Vorzugsvariante ist die Spannvorrichtung Variante I. Durch das waagerechte Spannen der Ableiterkontakte und den regelbaren Elektrozyylinder ist bei dieser Variante die größte Steigerung der Prozessstabilität zu erwarten.

Im Folgenden wird genauer auf die Spannvorrichtung Variante I eingegangen. Dabei werden die in Kapitel 10.2 ermittelten Funktionen aufgezählt und die jeweilige Lösung aufgezeigt und beschreiben.

Bestimmen und Spannen der SV auf dem Maschinentisch

Um mögliches Verkippen oder Verschieben während des Rüstprozesses zu vermeiden, wird die Spannvorrichtung fest auf den T-Nuten-Maschinentisch gespannt. Realisiert wird dies über vier Sterngriffe. In Bild 47 ist einer dieser Sterngriffe zu sehen, dieser ist orange gekennzeichnet. Mittels Gewinde werden diese in Nutensteine geschraubt und garantieren so einen festen Sitz der Spannvorrichtung auf dem Maschinentisch.

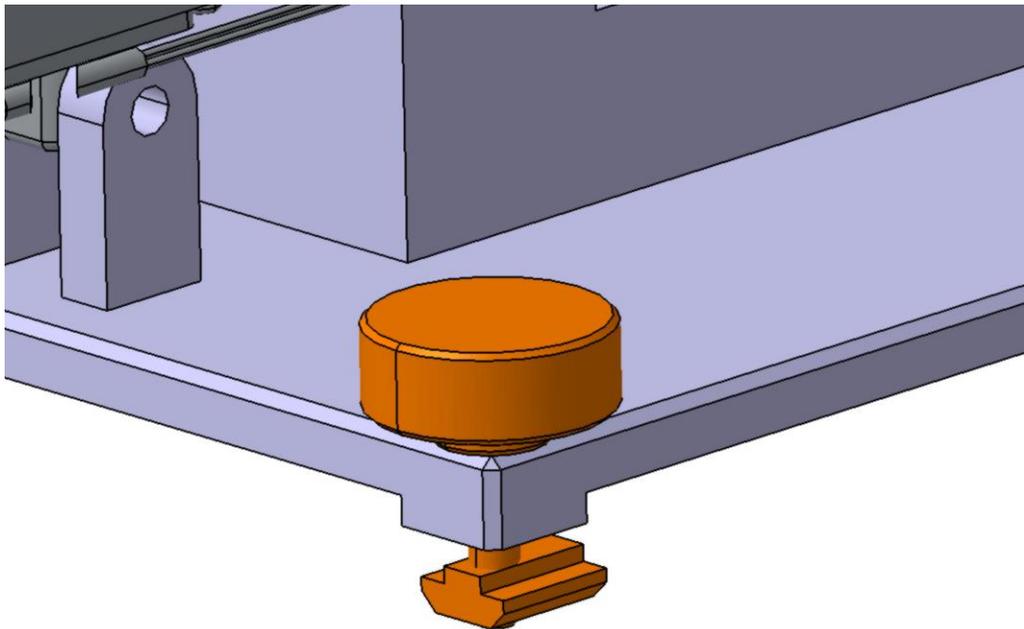


Bild 47: Sterngriff mit Nutenstein zum Fixieren der SV auf den Maschinentisch

Bestimmen und Spannen des Batteriemoduls in der SV

Um eine eindeutige Positionierung zu gewährleisten, müssen alle Freiheitsgrade des Batteriemoduls in der SV eindeutig bestimmt werden. Realisiert wird dies über Bestimmungsebenen in Form von Auf- bzw. Anlageflächen und Druckstücken. Diese sind in Bild 48 links rot gekennzeichnet. Gespannt wird das Batteriemodul dann über eine Druckplatte, welche durch Kniehebelspanner gegen das Batteriemodul gepresst wird.

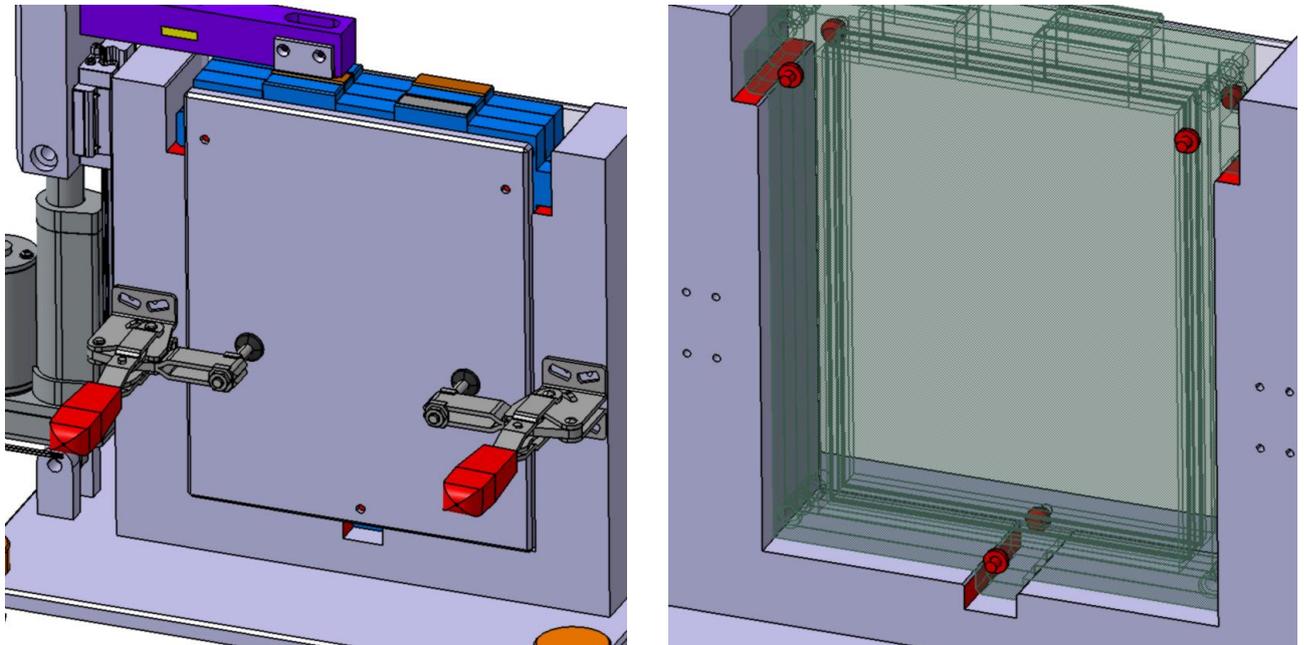


Bild 48: Bestimmen und Spannen des Batteriemoduls in der Spannvorrichtung

Spannen der AK durch definierte Niederhaltergeometrie

In dieser Diplomarbeit wurden mehrere Versuchsreihen durchgeführt. Sie dienen zur Ermittlung von Möglichkeiten zur Steigerung der Prozessstabilität. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse sind in den Entwurf dieser Spannvorrichtung eingeflossen. Mit der Niederhaltervariante Feuerherdt konnten in den Vorversuchen die besten Ergebnisse erzielt werden. Diese sind in Bild 49 auf Seite 68 zu sehen. Die orange dargestellten Feuerherdtfedern (Pos. Nr. 4) sind dabei durch ein Spannstück (Pos. Nr. 3) an den Niederhalter (Pos. Nr. 1) geschraubt. Da die Feuerherdtfedern ein Verschleißteil darstellen, können diese durch die Spannstücke einfach demontiert und getauscht werden.

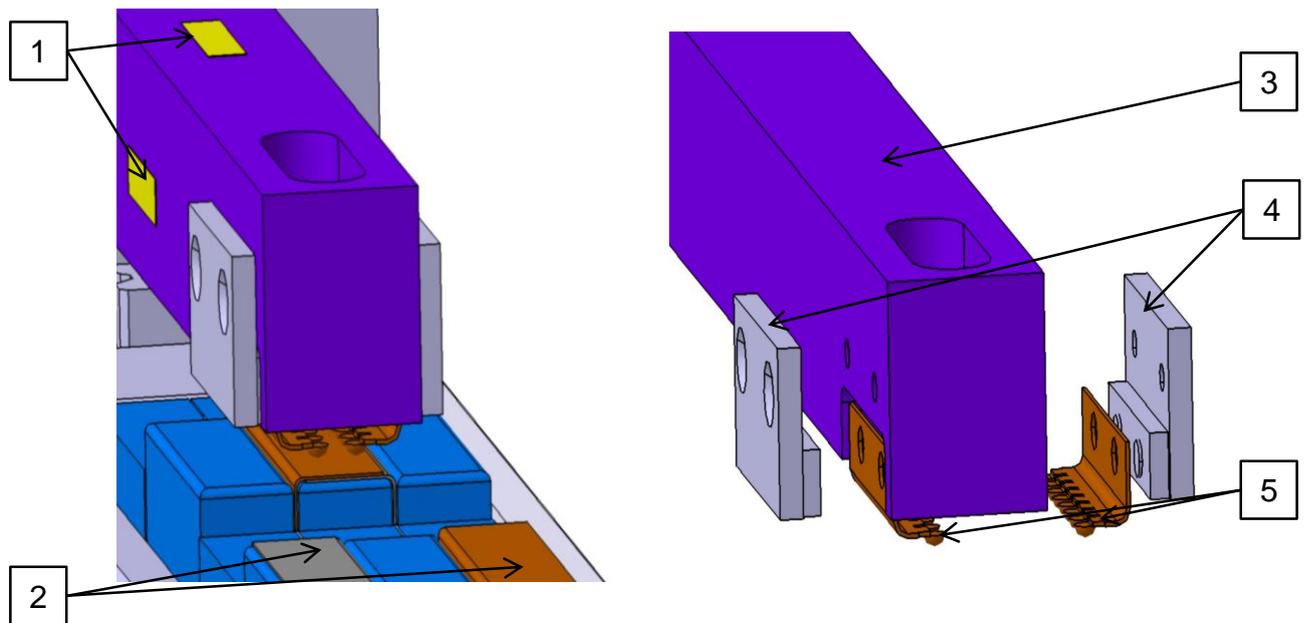


Bild 49: Niederhalter mit Feuerherdt Federn zum Spannen der Ableiterkontakte

1 Dehnmessstreifen

4 Spannstücke

2 Ableiterkontakte

5 Feuerherdtfedern

3 Niederhalter

Befestigt werden die Spannstücke durch vier Senkkopfschrauben am Niederhalter. Bei einem Austausch der Feuerherdtfedern werden die Spannstücke demontiert, die defekten Federn entnommen und ein neues Paar auf die Aufnahmen des Spannstückes gesteckt. Wieder am Niederhalter befestigt, kann ohne zeitintensive Verzögerung weiter geschweißt werden.

Ausgabe der Spannkraft

Neben der Niederhaltergeometrie ist die Spannkraft ein wichtiger Prozessparameter für eine hohe Prozessstabilität während des Schweißvorgangs. Um die Spannkraft dabei dauerhaft überwachen zu können, kommt eine Drehmomentüberwachung der Spindel des Elektrozyinders zum Einsatz. Durch eine speicherprogrammierte Steuerung (SPS) kann über die Ausgabesignale der Drehmomentüberwachung der Elektrozyinder nachreguliert und somit die Spannkraft angepasst werden. Dadurch ist gewährleistet, dass während des Spannens dauerhaft die optimale Spannkraft von 100 N anliegt.

Die hier aufgezeigte Vorzugsvariante vereint die, in der Diplomarbeit gesammelten, Erfahrungen, Grenzwerte und Anforderungen. Eine Prüfung, ob das hier entwickelte Konzept eine Verbesserung der Prozessstabilität während des Laserschweißens bietet, könnte als Aufgabenstellung einer weiterführenden Arbeit genutzt werden.

11 Vorschläge für weiterführende Arbeiten

Die vorliegende Diplomarbeit hat neue Ergebnisse zu Möglichkeiten der Spaltdetektion geliefert. Im Zuge der durchgeführten Versuche und des entwickelten Konzeptes sind weitere mögliche Vorschläge für weiterführende Arbeiten entstanden. Diese sind im Folgenden aufgelistet und werden kurz beschrieben.

Einfluss des Parameters Spannweg ermitteln

Der Spannweg beschreibt den zurückgelegten Weg ab dem Auftreffen des Niederhalters auf die AK bis zum Aufspannen der AK auf den Zellrahmen. Die Detektion des Spannweges könnte ebenso einen Rückschluss auf den Spalt zulassen.

Lösung der Problemstellung durch Biegen der Ableiterkontakte vor dem Verspannen der Pouchzellen zum Batteriepack

Mehrere Einflussfaktoren spielen eine Rolle bei der Entstehung von Spalt zwischen den Ableiterkontakten. Der häufigste Auslöser ist dabei die Entstehung des Spaltes infolge des Biegevorgangs. Durch den Zellrahmen unterhalb der Ableiterkontakte ist kein Überbiegen (Biegen über 90°) der Ableiterkontakte möglich, somit entsteht durch das Rückfedern nach dem Biegen Spalt. Abhilfe könnte eine geänderte Reihenfolge in der Herstellung und Montage der Batteriemodule liefern, wenn die Ableiterkontakte vor dem Verspannen überbogen werden und anschließend auf die gewünschten 90° zurückfedern. Danach werden die Pouchzellen mit den bereits gebogenen Ableiterkontakten verspannt und es ist kein Spalt zwischen den Ableiterkontakten mehr vorhanden.

Detaillieren und Herstellen des taktilen Spannvorrichtungskonzeptes

Als Ergebnis der Versuche, Messdaten und Erkenntnisse ist das Konzept einer taktilen Spannvorrichtung entwickelt worden. Ziel war dabei die Prozessstabilität zu erhöhen. Ziel einer weiterführenden Arbeit könnte das Auskonstruieren und Herstellen dieser Spannvorrichtung sein.

Auswertung der Spannvorrichtung und deren mögliche Erhöhung der Prozessstabilität

Auch die Auswertung und Untersuchungen über den Einfluss auf die Prozessstabilität könnte Raum für weiterführende Arbeiten geben. So könnten nach der Herstellung der taktilen Schweißvorrichtung Schweißversuche und deren Auswertung durchgeführt werden. Anhand dieser Ergebnisse kann anschließend eine Aussage über die Erhöhung der Prozessstabilität geliefert werden.

12 Zusammenfassung

Zielstellung der Diplomarbeit war die Erstellung eines Konzeptes zur Erhöhung der Prozessstabilität beim Laserschweißen. Dafür wurden die möglichen Einflussparameter, welche zur Instabilität des Laserschweißprozesses führen, aufgezeigt und mögliche Lösungen für diese gesucht. Die meisten dieser Einflussparameter können nach aktuellem Stand bereits detektiert und gesteuert werden, so allerdings nicht der Schweißspalt. Anhand einer Situationsanalyse wurden zwei Möglichkeiten zur Spaltdetektion aufgezeigt, die direkte Spaltdetektion und die indirekte Spaltdetektion. Für die weiterführenden Untersuchungen wurde sich auf die indirekte Spaltdetektion festgelegt. Die notwendigen Grenzparameter wurden in verschiedenen Versuchen ermittelt und ausgewertet. Die dabei durchgeführten Schweißversuche zur Ermittlung der maximal zulässigen Spalthöhe sind mittels Thermografie und Zugversuch ausgewertet worden. Ergebnis dabei war der Grenzparameter der maximal zulässigen Spalthöhe von 0,1 mm. Danach sind Versuche zu einem möglichen Zusammenhang zwischen Spannkraft und Spalt durchgeführt und im Zuge dessen drei verschiedene Varianten von Spannmasken getestet worden. Anschließend sind diese Versuche mittels elektronischer Druckmessfolie und Makrofotografien ausgewertet worden. Infolge der Auswertung dieser Versuche wurde festgestellt, dass kein direkter Zusammenhang zwischen Spannkraft und Spalt besteht. Allerdings konnte eine signifikante Verbesserung der Prozessstabilität während des Spannes der AK festgestellt werden. Die Spannmaskenvariante Feuerherdt lieferte deutlich verbesserte Ergebnisse bzgl. der belasteten Fläche und der Spalllänge. Im Vergleich zur Variante der Festauflage, welche den aktuellen Ist-Stand widerspiegelt, konnte die Feuerherdt - Variante wesentlich bessere Ergebnisse erzielen. Diese Erkenntnisse sind in die Anforderungsliste eingeflossen. Anhand der Anforderungsliste wurden zwei Konzepte einer taktilen Spannvorrichtung konstruiert, welche mittels Variantenvergleich und Variantenbewertung bewertet wurden. Aus der Variantenbewertung ist punktemäßig eine Vorzugsvariante hervorgegangen. Diese Vorzugsvariante wurde als ausgewähltes Konzept als CAD Prototyp konstruiert. Diese Entwurfskonstruktion bildet den Abschluss dieser Diplomarbeit und vereint die Anforderungen und die in der Arbeit gewonnenen Grenzparameter und Ergebnisse.

Quellenverzeichnis

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft u. Technik (Hrsg.): Regierungsprogramm Elektromobilität. Einleitung. [Online, Zugriff am 18.07.2019] Verfügbar unter: [https://www.bmbf.de/files/programm_elektromobilitaet\(1\).pdf](https://www.bmbf.de/files/programm_elektromobilitaet(1).pdf)
- [2] SMAC Staatliches Museum für Archäologie Chemnitz. (Hrsg.): Unbekannt: Fotografie mit Bezeichnung: 11.05.2019
- [3] Kramer, M.: Vereinfachter Aufbau eines Batteriepacks. Projekt: Fa. TkSY.
- [4] Schnurr, R.: Ishikawa Diagramm. Ursachen-Wirkungs-Diagramm: [Online, Zugriff am 23.08.2019] Verfügbar unter: <https://www.sixsigmablackbelt.de/ishikawa-diagramm/>
- [5] Kramer, M.: Einflussparameter auf den Laserschweißprozess.
- [6] Kampker, A.; Heimes, H.; Maiser, E.; Michaelis, S.: Flyer Zellherstellung einer Batteriezelle: [Online, Zugriff am 18.07.2019] Verfügbar unter: https://www.pem.rwth-aachen.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaaaaaoqixv
- [7] Elektro auto mobil (Hrsg.): die richtige balance: [Online, Zugriff am 13.08.2019] Verfügbar unter: <https://www.elektroautomobil.com/newsbeitra/die-richtige-balance/>
- [8] Kampker, A.; Heimes, H.; Maiser, E.; Michaelis, S.: Flyer Montageprozess eines Batteriepacks: [Online, Zugriff am 18.07.2019] Verfügbar unter: https://www.vdma.org/documents/7411591/15357859/Batterieproduktionsbroschuren_Auflage3_Modul-+und+Packmontage.pdf/ff5d30f5-442e-4bc1-6976-b9617646e8bf
- [9] Norm DIN 8580 – 2003 – 09 Fertigungsverfahren: Laserschweißen
- [10] Prorawe, R.: Lasertechnik für die Fertigung. Wärmeleitschweißen. 1.Auflage. Berlin: Springer, 2005.
- [11] LavaX GmbH (Hrsg.): Technologieberatung. Wärmeleit- und Tiefschweißen: [Online, Zugriff am 13.08.2019] Verfügbar unter <https://www.lavax.de/de/technologieberatung/laserstrahlschweissen-vakuum>
- [12] Herz, J.: Leifi Physik. Stimulierte (induzierte) Emission: [Online, Zugriff am 13.08.2019] Verfügbar unter: <https://www.leifiphysik.de/atomphysik/laser/grundwissen/stimulierte-induzierte-emission>

- [13] Siebert, C.: Technologietag LZH. Aufbau Scheibenlaser: [Online, Zugriff am 12.09.2019] Verfügbar unter:
<https://www.yumpu.com/de/document/read/48995658/ultrakurzpuls-laser-aaeura-markte-anwendungen-laser-trumpf-laser/28>
- [14] Trumpf GmbH & Co. KG (Hrsg.): Scheibenlaser. TruDisk 5001: [Online, Zugriff am 13.08.2019] Verfügbar unter:
https://www.trumpf.com/de_DE/produkte/laser/scheibenlaser/trudisk/
- [15] Eichler, H. J.; Eichler J.: Laser. optische Strahlführung. 8.Auflage. Berlin: Springer Verlag, 2015
- [16] Hügel, H.; Graf, T.: Laser in der Fertigung. Fokussierende Optiken. 2.Auflage. Stuttgart: Vieweg Teubner, 2009.
- [17] Trumpf GmbH & Co. KG (Hrsg.): Programmierbare Fokussieroptik. PFO 3D: [Online, Zugriff am 13.08.2019] Verfügbar unter:
https://www.trumpf.com/de_DE/produkte/laser/bearbeitungsoptiken/programmierbare-fokussieroptiken/
- [18] Unbekannt: Aufnahme Spannvorrichtung Ableiterschweißen. Projekt: Fa. TkSY.
- [19] Risse, A.: Fertigungsverfahren der Mechatronik. Biegeumformen. 1 Auflage. Berlin : Springer Vieweg 2012
- [20] Fischer, U.; Heinzler, M.; Näher, F.; Paetzold, H.; Gomeringer, R.; Kilgus, R.; Osterle, S.; Stephan, A.: Tabellenbuch Metall. Rückfederung beim Biegen. 44 Auflage. Haan-Gruiten: Europa Lehrmittel, 2008.
- [21] Norm DIN 6300 – 1970 – 06 Vorrichtungen für die Fixierung der Lage von Werkstücken während formändernder Fertigungsverfahren: Benennungen und deren Abkürzungen
- [21] Hesse, S.; Krahn, H.; Eh, D.: Betriebsmittel Vorrichtung. Begriffe und Gliederung. 2 Auflage. Plauen: Hanser, 2012.
- [22] Božina, P.: Vorrichtungen im Werkzeugbau. Begriffe und Einleitung. 1.Auflage. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2013.
- [23] Hesse, S.; Krahn, H.; Eh, D.: Betriebsmittel Vorrichtung. Gestaltung von Vorrichtungen. 2 Auflage. Plauen: Hanser, 2012.
- [24] Ringfeder Power Transmission GmbH (Hrsg.): Messverfahren und Messfehler. direkte- u. indirekte Messfehler: [Online, Zugriff am 18.07.2019] Verfügbar unter:
<https://info.ringfeder.com/engineers-blog-de/messverfahren-und-messfehler>

- [25] Micro-Epsilon (Hrsg.): optpCONTROL 2520. Laserbasierte Zeilenkamera: [Online, Zugriff am 18.07.2019] Verfügbar unter: <https://www.micro-epsilon.de/download/manuals/man--optoCONTROL-2520--de.pdf>
- [26] Laser 2000 GmbH (Hrsg.): L2K 3D Kamera. Scan Kamera für Laserprozesse: [Online, Zugriff am 18.07.2019] Verfügbar unter: https://www.laser2000.de/de/industrielle-kameras/48072-l2k-3d-camera.html#download_anker_link
- [27] Schwarz, A.: Matrixschaltung. LED Matrixschaltung: [Online, Zugriff am 19.08.2019] Verfügbar unter: <https://www.mikrocontroller.net/articles/LED-Matrix>
- [28] Tekscan, Inc.: Pressure mapping sensors. Druckmesssensor 5076: [Online, Zugriff am 19.08.2019] Verfügbar unter: <https://www.tekscan.com/products-solutions/pressure-mapping-sensors/5076?tab=electronics>
- [29] Lumitos Ag.: Chemie Lexikon. Piezoelektrizität. [Online, Zugriff am 19.08.2019] Verfügbar unter: <https://www.chemie.de/lexikon/Piezoelektrizit%C3%A4t.html>
- [30] Hemmerisch, W. A.: Mathe Guru. Korrelation, Korrelationskoeffizient. [Online, Zugriff am 27.08.2019] Verfügbar unter: <https://matheguru.com/stochastik/korrelation-korrelationskoeffizient.html>
- [31] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Zerstörungsfreie Prüfung – Thermografische Prüfung – Teil 1: Allgemeine Grundlagen; Deutsche Fassung EN 16714-1, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2016.
- [32] DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Zerstörungsfreie Prüfung – Thermografische Prüfung – Teil 3: Begriffe; Deutsche Fassung EN 16714-3, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2016.
- [33] VDI Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, Beuth, Berlin, 1993
- [34] Lange, J.: Vorlesung MBK606 Entwicklung einer KFZ-Baugruppe: WHZ 2018
- [35] VDI Richtlinie 2225: Konstruktionsmethodik Technisch-wirtschaftliches Konstruieren. Vereinfachte Kostenermittlung, Beuth, Berlin, 1993

Anhang

Inhaltsverzeichnis des Anhangs

	<u>Seite</u>
Anhang	I
Inhaltsverzeichnis des Anhangs	I
Verzeichnis der Bilder	II
Anlage 1 – Technische Daten Trumpf TruDisk5001	1
Anlage 2 – Technische Daten Trumpf PFO 3D	2
Anlage 3 – Berechnungen zur Prozessparametern	3
Anlage 4 – Auswertung Thermografie	4
Anlage 5 - Nahtfehlertypen beim Laserstrahlschweißen	13
Quellenverzeichnis	16

Verzeichnis der Bilder

<u>Bild</u>	<u>Titel</u>	<u>Seite</u>
Bild A1:	Technische Daten Trumpf TruDisk5001	1
Bild A2:	Technisches Datenblatt Trumpf PFO 3D	2
Bild A3:	Schweißnahtfehler „Riss“ [6]	13
Bild A4:	Schweißnahtfehler „Pore“ als Porennest [6]	13
Bild A5:	Schweißfehler „falscher Freund“ [6]	14
Bild A6:	Fehlertyp „Bindefehler“ [6]	14
Bild A7:	Schweißnahtfehler „Einbrandkerben“ [6]	14
Bild A8:	Schweißnahtfehler „Nahtunterwölbung“ [6]	15
Bild A9:	Schweißnahtfehler „Nahtüberhöhung“ [6]	15

Anlage 1 – Technische Daten Trumpf TruDisk5001

	TruDisk 5001	TruDisk 5001 (neue Generation)	TruDisk 5002
LASERPARAMETER			
LASERLEISTUNG AM WERKSTÜCK	5000 W	5000 W	5000 W
TYP. LEISTUNGSKONSTANZ BEI NENNLEISTUNG	± 1 % bei aktiver Leistungsregelung	± 1 % bei aktiver Leistungsregelung	± 1 % bei aktiver Leistungsregelung
KONTINUIERLICH EINSTELLBARER LEISTUNGSBEREICH	120 W - 5000 W bei aktiver Leistungsregelung	120 W - 5000 W bei aktiver Leistungsregelung	120 W - 5000 W bei aktiver Leistungsregelung
STRAHLQUALITÄT AN DER EINKOPPLUNG IN DAS LLK	4 mm • mrad	4 mm • mrad	8 mm • mrad
NUMERISCHE APERTUR AN DER AUSKOPPLUNG NACH LLK	0,1	0,1	0,1
WELLENLÄNGE	1030 nm	1030 nm	1030 nm
MIN. DURCHMESSER LASERLICHTKABEL	100 µm	100 µm	200 µm
BAUFORM			
BREITE	1600 mm	1175 mm	1600 mm
HÖHE	1550 mm	1430 mm	1550 mm
TIEFE	950 mm	725 mm	950 mm
MAX. ANZAHL LASERLICHTKABEL	4	2	4
MAX. ANZAHL LASERLICHTKABEL BEI GERÄTEGRÖÖE EXTENDED	6	4	6
AUFSTELLUNG			
SCHUTZART	IP54	IP54	IP54
UMGEBUNGSTEMPERATUR	10 °C - 50 °C	10 °C - 50 °C	10 °C - 50 °C

Bild A50: Technische Daten Trumpf TruDisk5001

Anlage 2 – Technische Daten Trumpf PFO 3D

	PFO 1D	PFO 3D
LASERPARAMETER		
WELLENLÄNGENBEREICH	930 nm - 1030 nm ¹	1030 nm ¹
LEISTUNG	bis 8000 W (cw)	bis 8000 W (cw)
NUMERISCHE APERTUR	typ. 0,11 / max. 0,12	typ. 0,11 / max. 0,12
TYP LASERLICHTKABEL	LLK-D, LLK-B	LLK-D
OPTIKKONFIGURATION ^{2 2}		
KOLLIMATION	150 mm	138 mm
BRENNWEITE	150 / 200 / 300 mm	255 / 345 / 450 / 600 / 900 mm
PFO 1D		
Z-HUB BEI OBJEKTIVBRENNWEITE	-	f255: ± 22 mm f345: ± 40 mm f450: ± 70 mm f600: ± 100 mm f900: ± 220 mm
FELDGRÖÖE (ELLIPSE Y X X) BEI OBJEKTIVBRENNWEITE	-	f255: 174 mm x 102 mm (z=0) f345: 240 mm x 140 mm (z=0) f450: 320 mm x 190 mm (z=0) f600: 376 mm x 230 mm (z=0) f900: 525 mm x 340 mm (z=0)
BAUFORM		
ABMESSUNGEN (B X H X T)	227 mm x 562 mm x 229 mm	412 mm x 266 mm x 366 mm
GEWICHT	12,5 kg	35 kg
KOMPATIBILITÄT		
VERFÜGBARE LASER	TruDiode, TruDisk	TruDisk
VERFÜGBARE SENSORIK	-	VisionLine, CalibrationLine, SeamLine Remote, OCT Nahtlageregelung
OPTIONEN		
VERFÜGBARE OPTIONEN	Crossjet, MDE-Düse, Schutzgaszufuhr, Kamerabeobachtung, Sensorikschnittstelle, Beleuchtung, Kassettenmodul, Schutzglasüberwachung	Ausführung als I-PFO, Crossjet, MDE-Düse, Schmauchglocke, Beleuchtung
VERFÜGBARE SOFTWARE-OPTIONEN	-	TruTops I-PFO und TruTops PFO, PFO Smart Teach App

Bild A51: Technisches Datenblatt Trumpf PFO 3D

Anlage 3 – Berechnungen zur Prozessparametern

Berechnungen zu den Werten der Tabelle 2 auf Seite 31 und Tabelle 8 auf Seite 45.

Berechnung Streckenenergie

Laserleistung P:

$$P = 3500 \text{ W} = 3500 \frac{\text{J}}{\text{s}}$$

Vorschubgeschwindigkeit v:

$$v = 505 \frac{\text{mm}}{\text{s}} = 5,05 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Streckenenergie S [1]:

$$S = \frac{P}{v} \quad [1]$$

$$S = \frac{3500 \frac{\text{J}}{\text{s}}}{5,05 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 693,1 \frac{\text{J}}{\text{m}}$$

Berechnung Fokusdurchmesser

Brennweite f:

$$f = 345 \text{ mm}$$

Kollimation k:

$$k = 138 \text{ mm}$$

Durchmesser LLK d_K :

$$d_K = 0,075 \text{ mm}$$

Fokusdurchmesser d_0 [2]:

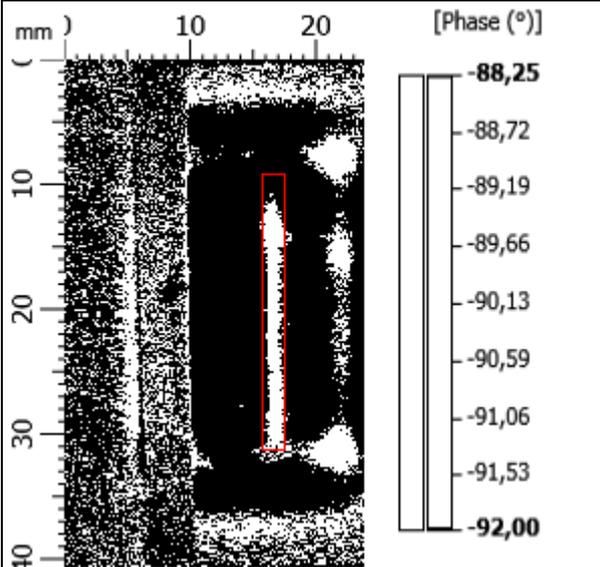
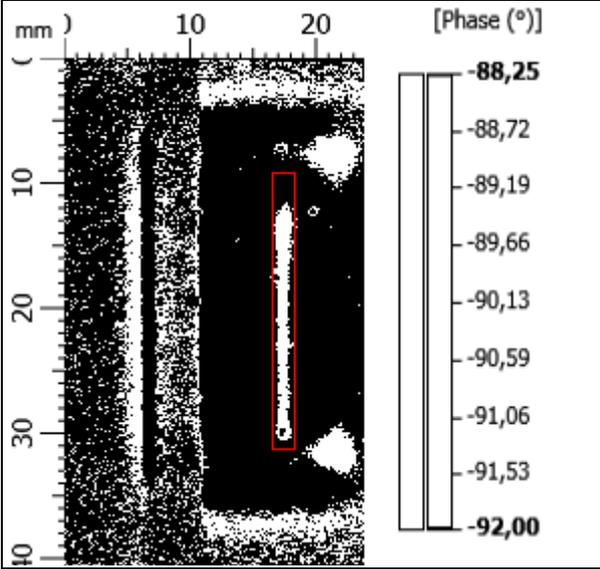
$$d_0 = \frac{f}{k} \cdot d_K \quad [2]$$

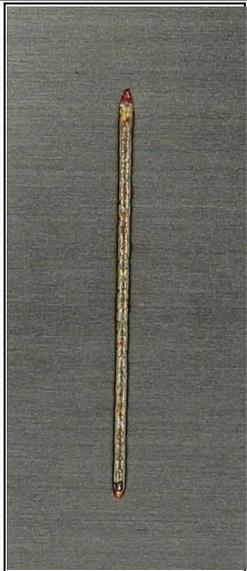
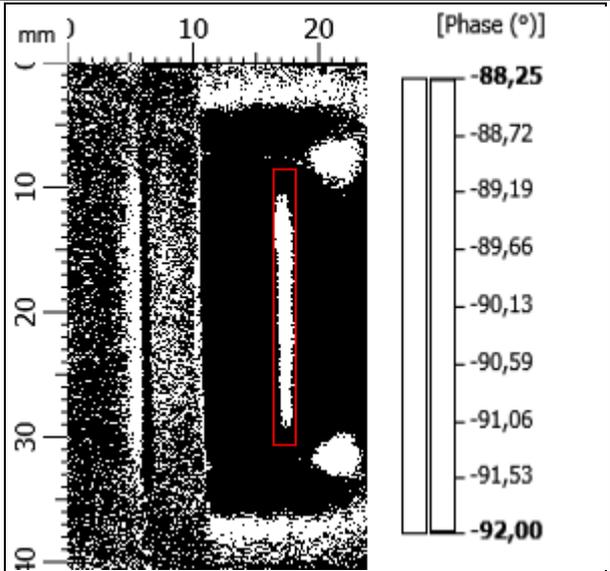
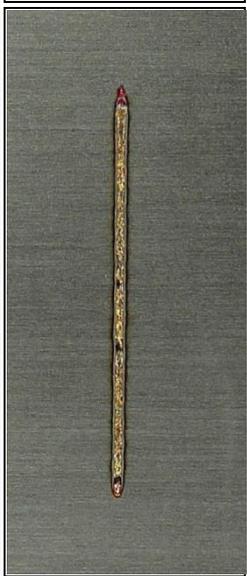
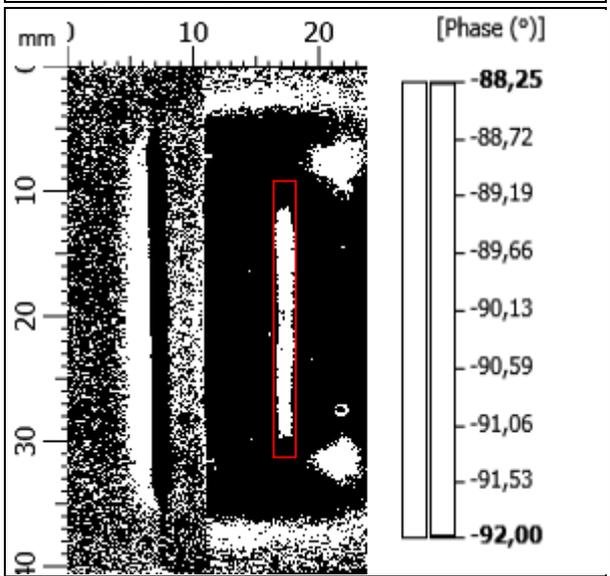
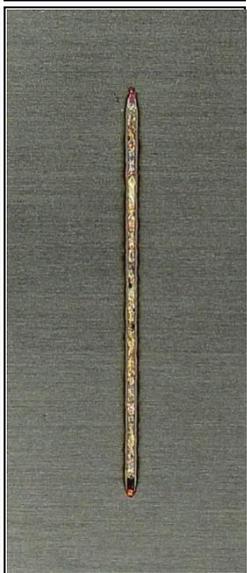
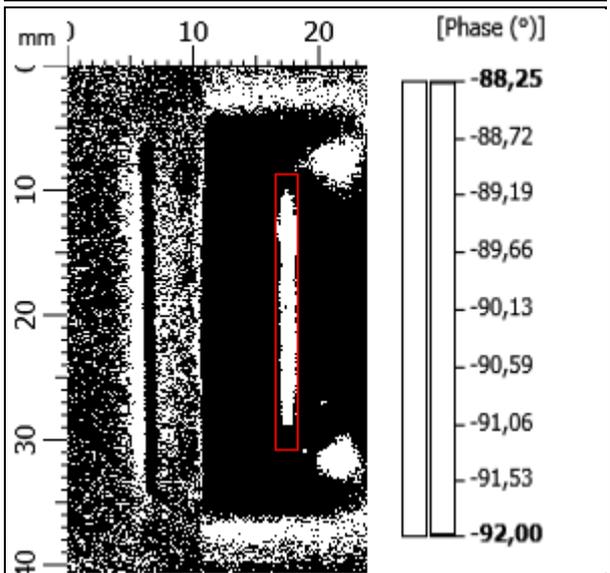
$$\frac{345 \text{ mm} \cdot 0,075 \text{ mm}}{138 \text{ mm}} = 0,188 \text{ mm}^2$$

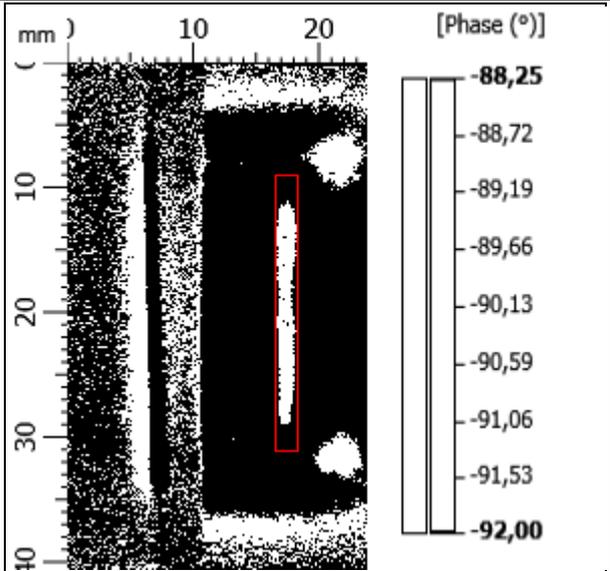
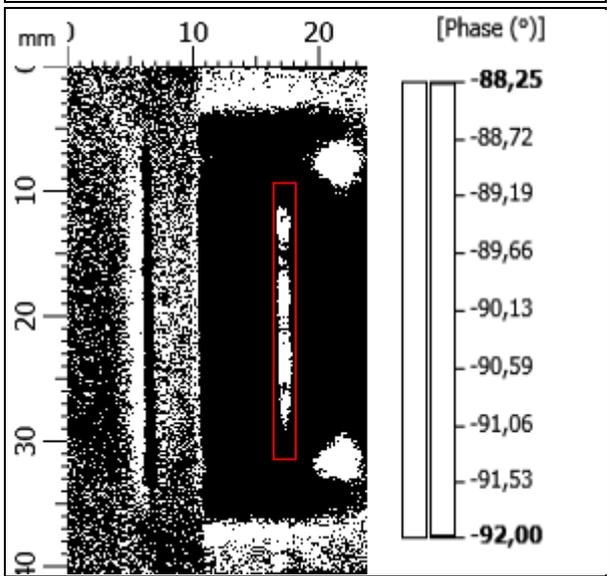
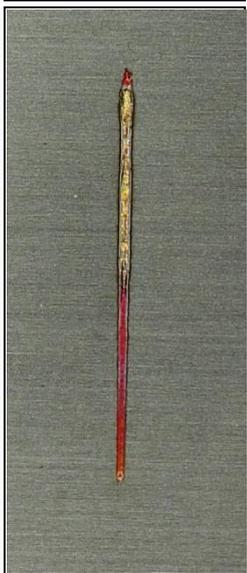
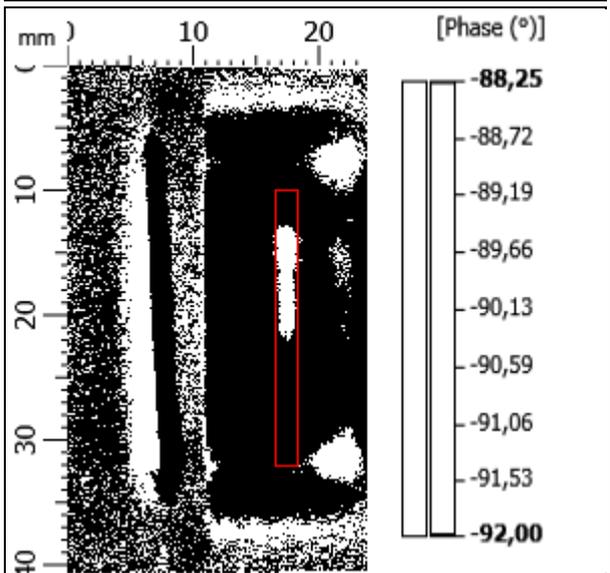
Anlage 4 – Auswertung Thermografie

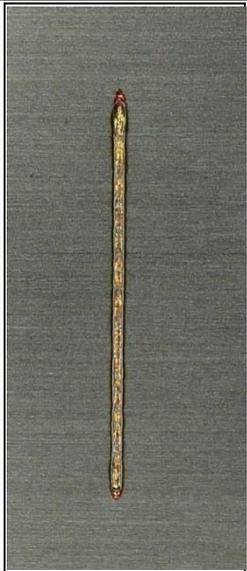
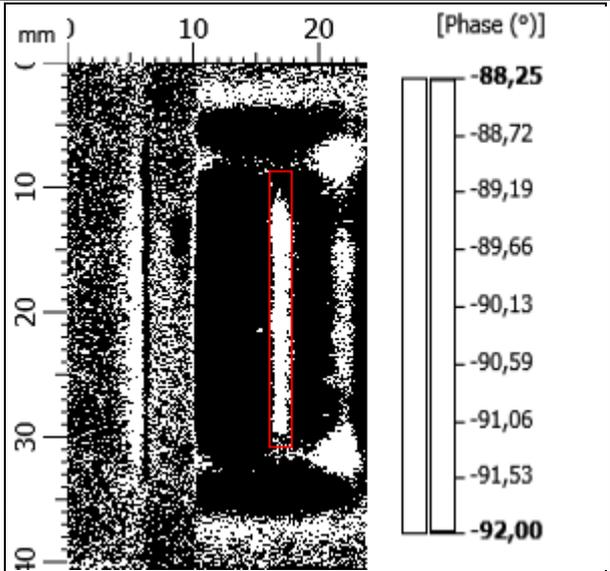
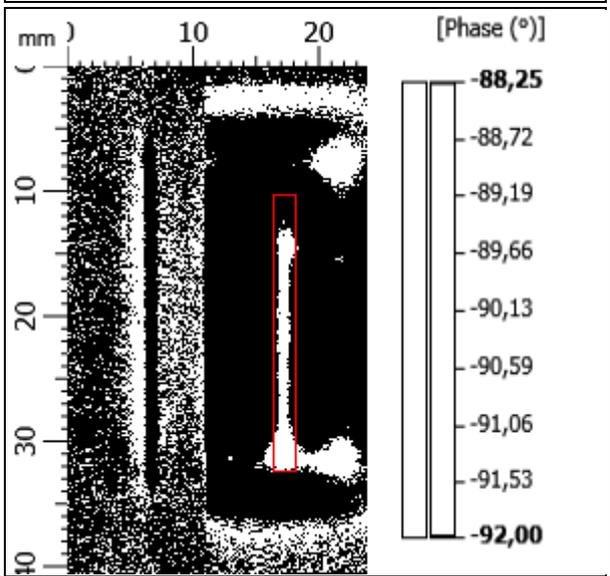
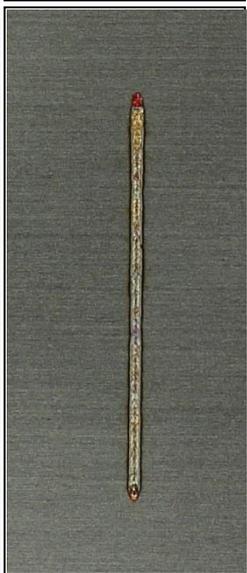
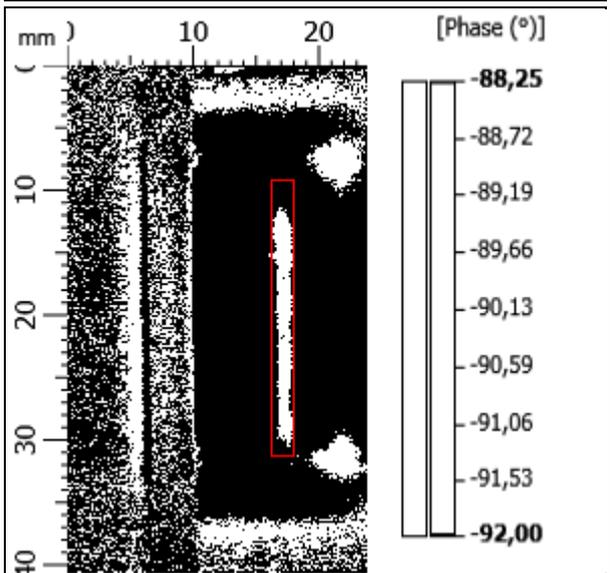
Auswertung der Schweißversuche durch die Thermografie. Nachfolgend werden alle Versuchsproben der Schweißversuche zur Ermittlung des Grenzwertes der Spalthöhe aufgezeigt.

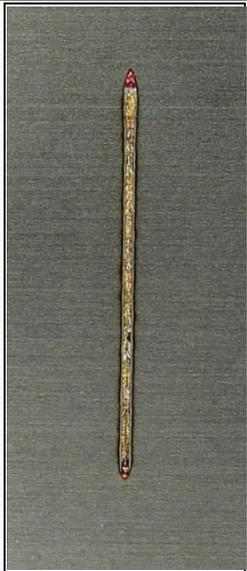
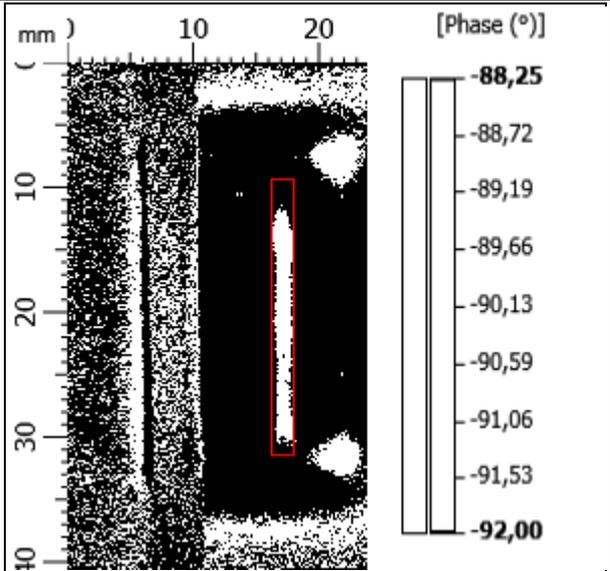
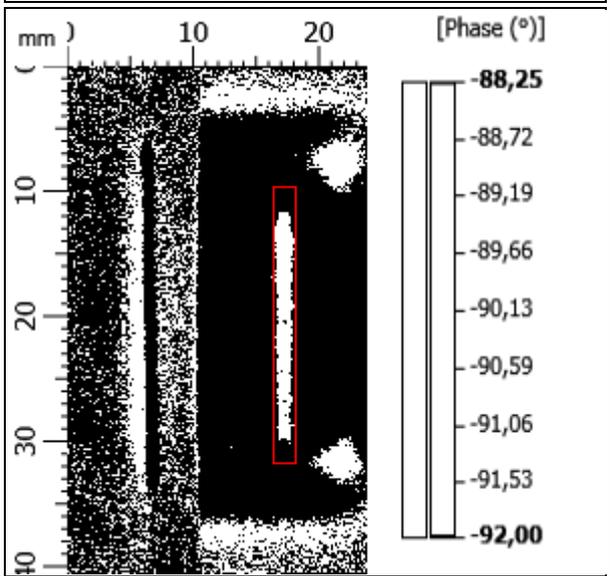
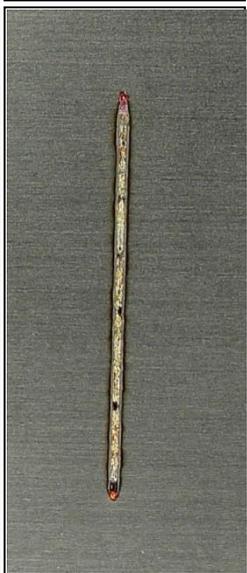
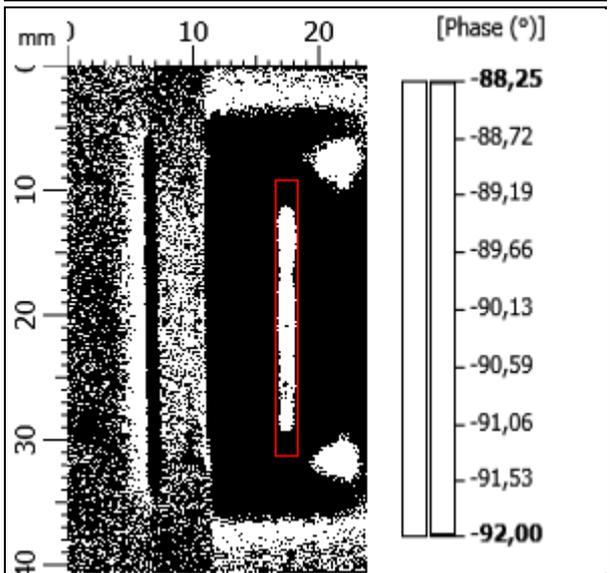
Tabelle A17: Versuchsauswertung Thermografie

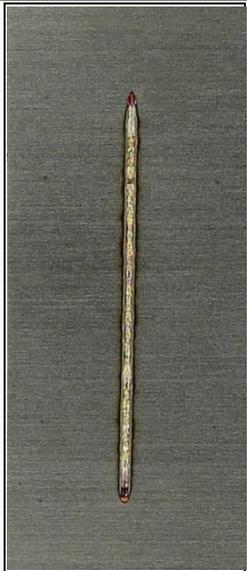
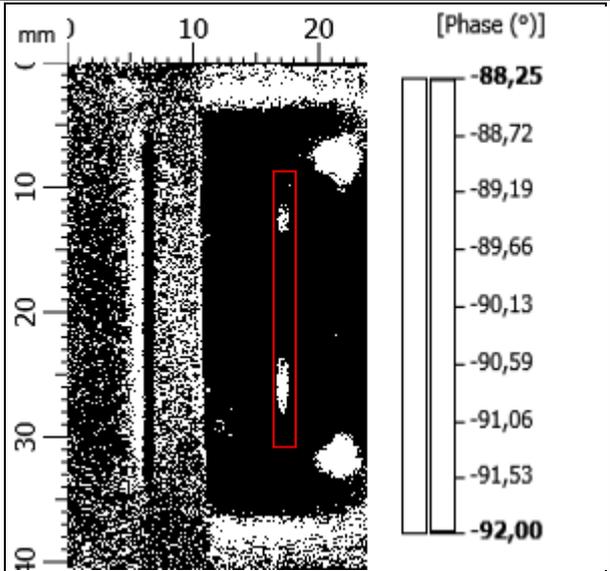
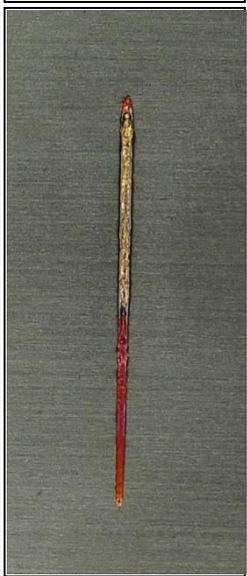
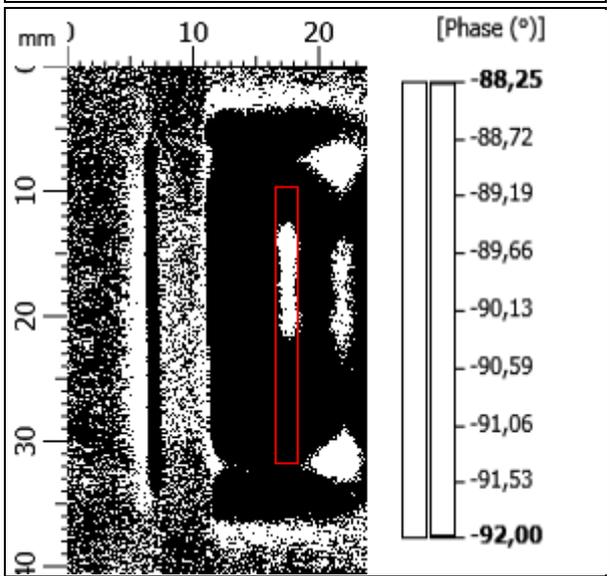
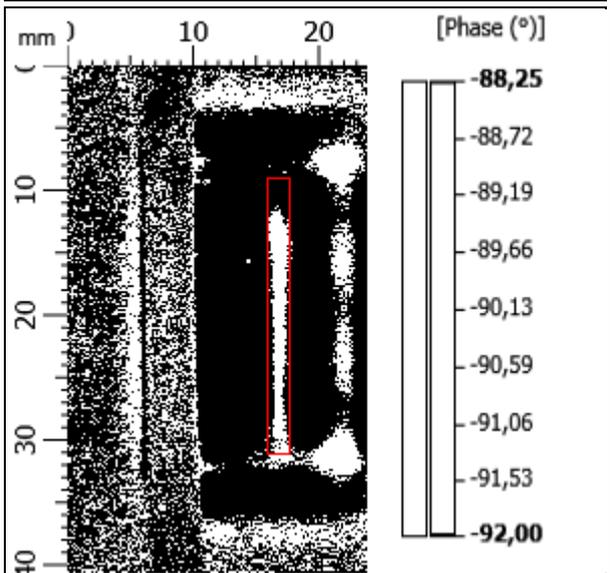
Name	Classification	Photo	Measurement Image	Joined Area
1-000	OK <input type="button" value="v"/>			24,448 mm ²
1-002	OK <input type="button" value="v"/>			18,253 mm ²

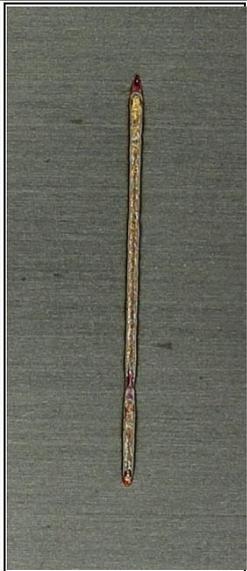
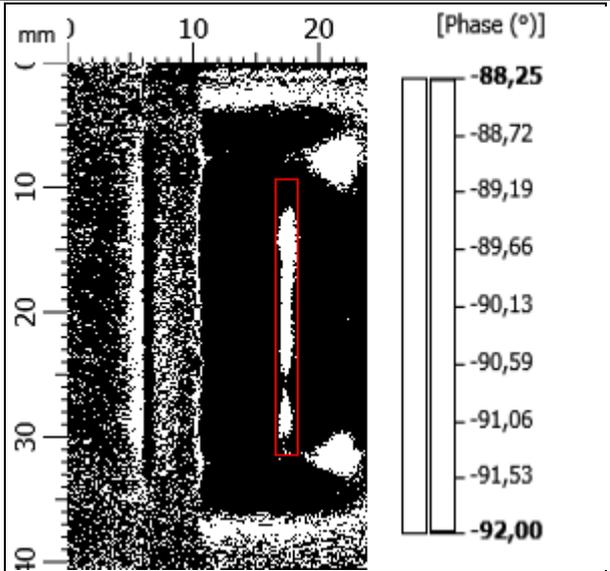
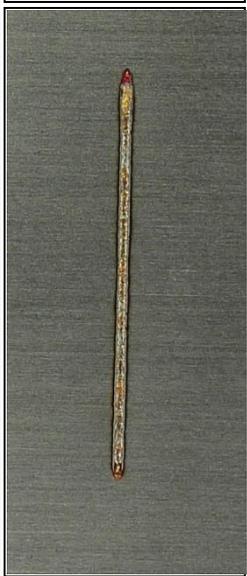
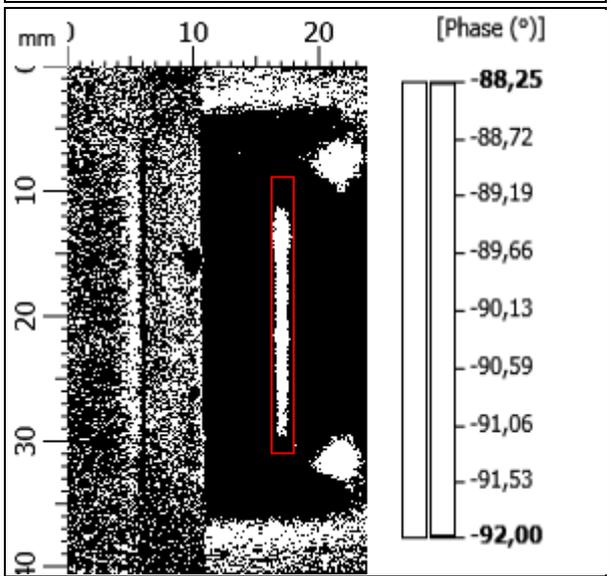
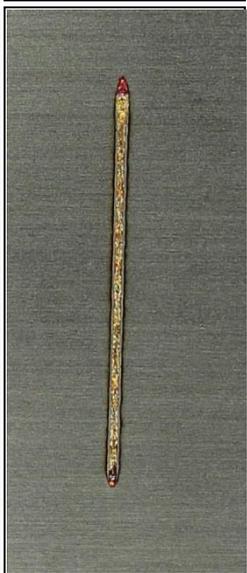
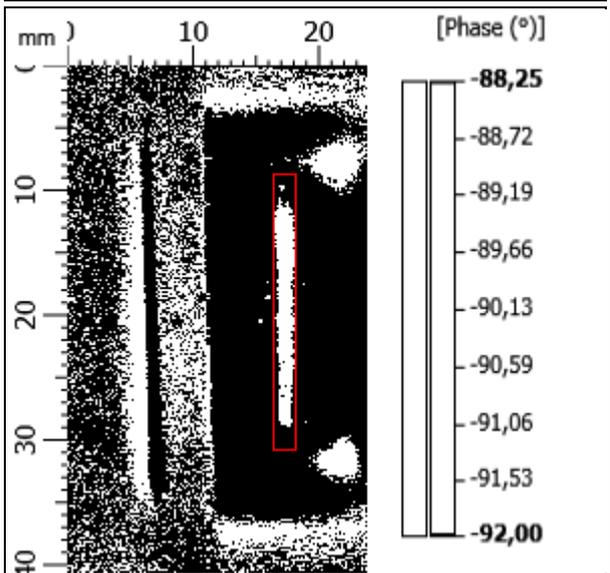
<p>1-004</p>	<p>OK</p>			<p>19,866 mm²</p>
<p>1-006</p>	<p>OK</p>			<p>21,811 mm²</p>
<p>1-008</p>	<p>OK</p>			<p>22,067 mm²</p>

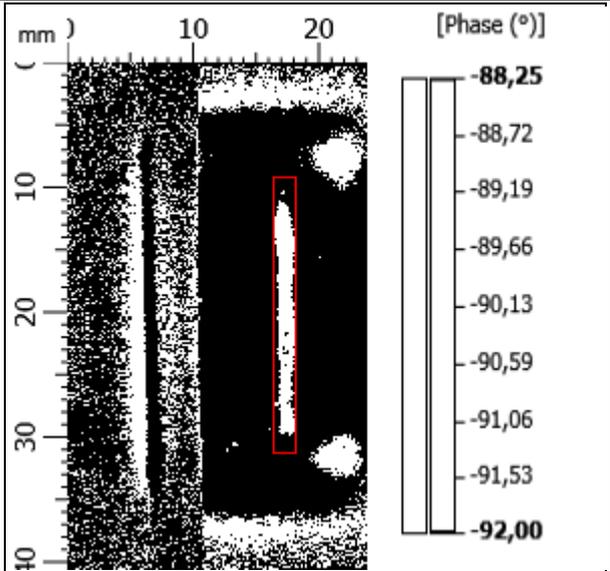
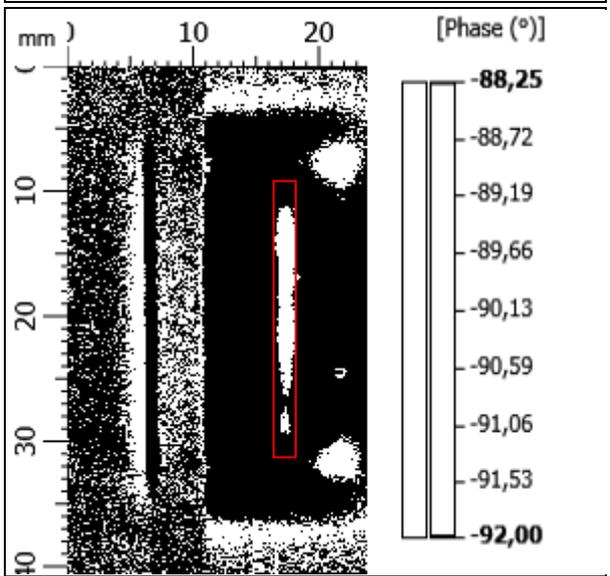
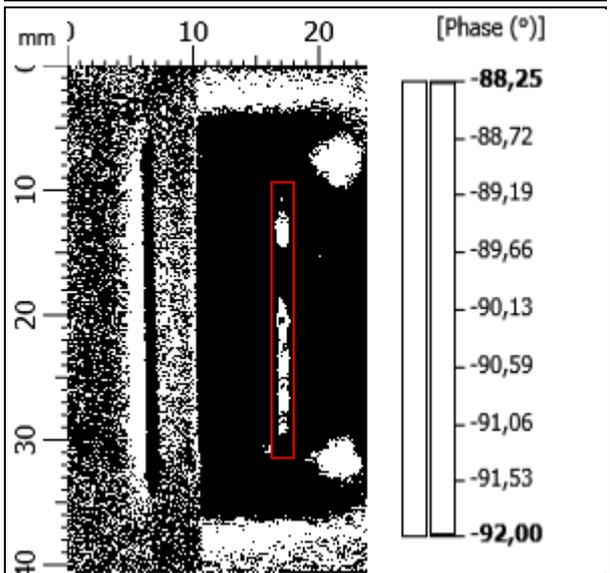
<p>1-010</p>	<p>OK ▼</p>			<p>21,043 mm²</p>
<p>1-012</p>	<p>OK ▼</p>			<p>12,416 mm²</p>
<p>1- REFE- RENZ</p>	<p>OK ▼</p>			<p>12,186 mm²</p>

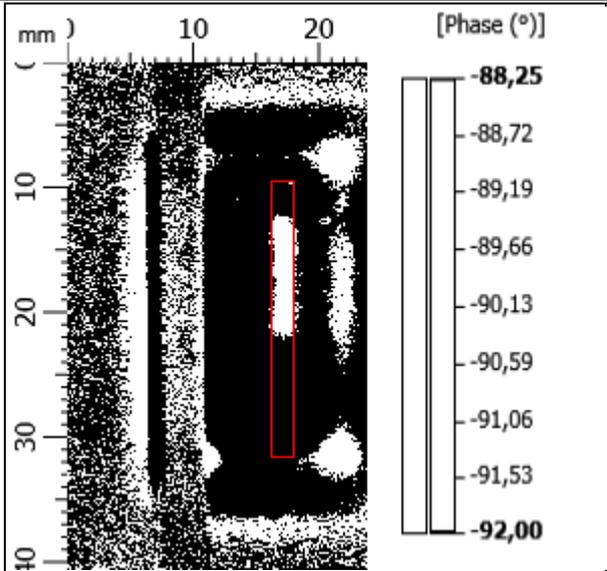
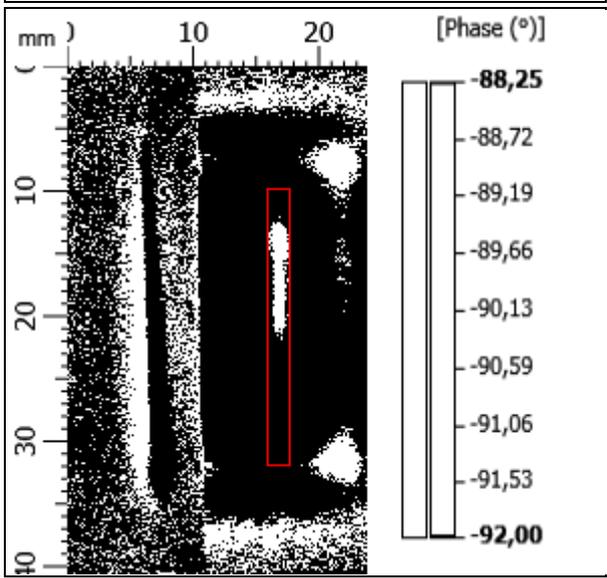
<p>2-000</p>	<p>OK</p>			<p>26,01 mm²</p>
<p>2-002</p>	<p>OK</p>			<p>20,582 mm²</p>
<p>2-004</p>	<p>OK</p>			<p>20,48 mm²</p>

<p>2-006</p>	<p>OK</p>			<p>22,938 mm²</p>
<p>2-008</p>	<p>OK</p>			<p>21,018 mm²</p>
<p>2-010</p>	<p>OK</p>			<p>21,581 mm²</p>

<p>2-012</p>	<p>NOK</p>			<p>4,224 mm²</p>
<p>2- REFE- RENZ</p>	<p>OK</p>			<p>11,392 mm²</p>
<p>3-000</p>	<p>OK</p>			<p>21,376 mm²</p>

<p>3-002</p>	<p>OK</p>			<p>16,614 mm²</p>
<p>3-004</p>	<p>OK</p>			<p>17,357 mm²</p>
<p>3-006</p>	<p>OK</p>			<p>21,862 mm²</p>

<p>3-008</p>	<p>OK</p>			<p>21,914 mm²</p>
<p>3-010</p>	<p>OK</p>			<p>19,174 mm²</p>
<p>3-012</p>	<p>NOK</p>			<p>9,421 mm²</p>

<p>3- REFE- RENZ</p>	<p>OK</p>			<p>16,282 mm²</p>
<p>4- REFE- RENZ</p>	<p>NOK</p>			<p>9,498 mm²</p>

Anlage 5 - Nahtfehlertypen beim Laserstrahlschweißen

Beim Laserschweißen von Dünnschichten können verschiedenartige Schweißnahtfehlertypen durch diverse Einflüsse entstehen. Aufgeführt sind diese Schweißnahtfehlertypen in der Norm EN ISO 13919. Diese gibt für einzelne Fehlertypen Grenzwerte an, welche als Richtwert dienen können. Nachfolgend sind Fehlertypen bei Laserschweißnähten erläutert, die auch an Ableiterkontakten auftreten können.[3] [12]

Fehlertyp „Riss“

Die Entstehung von Rissen in der Schweißnaht kann unterschiedliche Ursachen haben, z.B. Spannungsrisse in Folge zu schneller Abkühlung der Schmelze. Dadurch wird die mechanische Festigkeit der Schweißnaht stark beeinträchtigt. Bild 1 zeigt einen Riss direkt in der Schweißnaht, es sind aber auch Risse im Grundwerkstoff oder in der Wärmeeinflusszone möglich.[3; 4; 5]

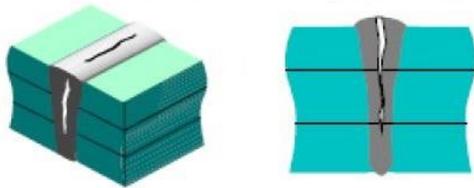


Bild A52: Schweißnahtfehler „Riss“ [6]

Fehlertyp „Pore“ und „Lunker“

Als Poren werden kleine Gaseinschlüsse in der Schmelze bezeichnet. Diese können bspw. durch schnelle Abkühlung der Schmelze, Feuchtigkeit oder Verunreinigungen entstehen. Diese können sichtbar auf der Nahtoberfläche auftreten oder unsichtbar im Nahtinneren. Häufen sich mehrere solcher Lunker an einem Ort an, spricht man von Porennestern, ersichtlich in Bild 2. Diese können die Schweißnahtfestigkeit ebenfalls stark beeinflussen. Lunker entstehen während der Erstarrung der Schmelze durch Schrumpfung und sind kleine Hohlräume in der Schweißnaht. [4; 5]

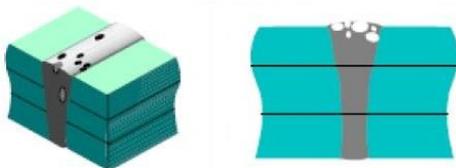


Bild A53: Schweißnahtfehler „Pore“ als Porennest [6]

Fehlertyp „falscher Freund“

Der Fehlertyp „falscher Freund“ der in der EN ISO 13919 auch als „ungenügende Durchschweißung“ beschrieben ist, bezieht sich auf eine Schweißnaht mit gut sichtbarer Oberraupe. Eine Anbindung der beiden zu verschweißenden Bleche hat sich jedoch nicht gebildet, wie in Bild 3 zu sehen. Zu erkennen ist dieser Fehlertyp nur schwer, er beeinträchtigt die Festigkeit der Schweißnaht stark. [3; 7]

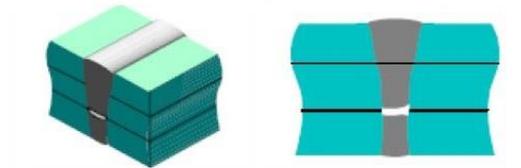


Bild A54: Schweißfehler „falscher Freund“ [6]

Fehlertyp „Bindefehler“

Unter einem Bindefehler, versteht man eine ungenügende Anbindung zwischen Schweißnaht, Schweißnahtlagen und Grundwerkstoff, ersichtlich in Bild 4. Mit einer Beeinträchtigung der Schweißnahtfestigkeit ist zu rechnen. Dieser Fehlertyp entsteht bspw. durch Spaltmaßschwankungen, Verschmutzungen oder unebene Fügeflächen entstehen. [4; 5; 6]

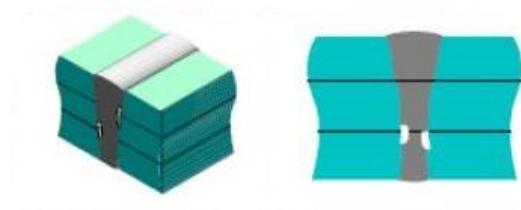


Bild A55: Fehlertyp „Bindefehler“ [6]

Fehlertyp „Einbrandkerben“

Als Einbrandkerben werden Kerben am Rand der Naht bezeichnet. Diese befindet sich entweder am Rand des Grundwerkstoffes oder des Schweißgutes. Infolge falsch gewählter Prozessparameter oder eines zu großen Schweißspaltes bei Überlappenschweißverbindungen kann ein solche Einbrandkerbe, ersichtlich in Bild 6, entstehen. [4; 5; 8]

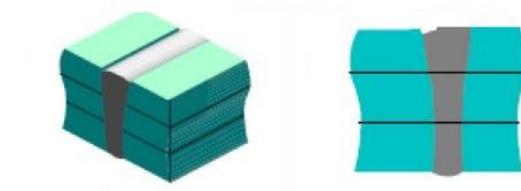


Bild A56: Schweißnahtfehler „Einbrandkerben“ [6]

Fehlertyp „Nahtunterwölbung“

In Bild () zu sehen ist eine Nahtunterwölbung, diese erkennt man durch einen sichtbaren Einfall des Schweißgutes an der Nahtoberseite. Hervorgerufen wird dieser Fehlertyp bspw. durch ein zu großes Spaltmaß bei Überlappschweißverbindungen. [5; 6]



Bild A57: Schweißnahtfehler „Nahtunterwölbung“ [6]

Fehlertyp „Nahtüberhöhung“

Im Gegensatz zur Nahtunterwölbung stellt sich bei der Nahtüberhöhung die Schweißnaht förmlich auf. Zu erkennen ist dieser Fehlertyp an einer Wölbung der Schweißnaht über den Grundwerkstoff hinaus. Zu sehen ist dieser Fehlertyp in Bild /(. [6]

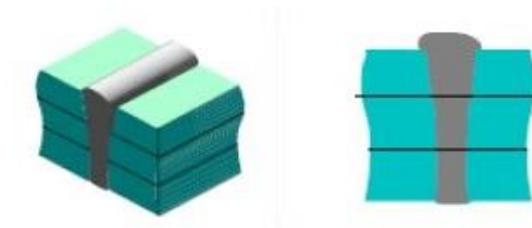


Bild A58: Schweißnahtfehler „Nahtüberhöhung“ [6]

Quellenverzeichnis

- [1] Erl GmbH Schweissen + Schneiden (Hrsg.): Fachwissen. Berechnung Streckenergie: [Online, Zugriff am 13.09.2019] Verfügbar unter: <https://www.erl-gmbh.de/home/fachwissen/berechnungen/streckenenergie/erklarungen.html>
- [2] Fischer, U.; Heinzler, M.; Näher, F.; Paetzold, H.; Gomeringer, R.; Kilgus, R.; Osterle, S.; Stephan, A.: Tabellenbuch Metall. Rückfederung beim Biegen. 44. Auflage. Haan-Gruiten: Europa Lehrmittel, 2008.
- [3] EN ISO 13919 2001-12 Schweißen – Elektronenstrahl- und Laserstrahl - Schweißverbindungen
- [4] Klock, H. Schweißen und Löten von Aluminiumwerkstoffen. Düsseldorf : Dt. Verl. fuer Schweisstechnik, 1977
- [5] DIN EN ISO 6520-1 2007-11 Schweißen und verwandte Prozesse – Einteilung von geometrischen Unregelmäßigkeiten an metallischen Werkstoffen – Teil 1: Schmelzschweißen
- [6] Mickel, Paul-Michael Methode zur Eigenschaftsdarstellung von Laserstrahlschweißnähten im Karosseriebau, Dissertation 2012
- [7] Reiniger, Claus-Dieter Fluidynamische Effekte beim Remote-Laserstrahlschweißen von Blechen mit Fügspalt, Dissertation 2015
- [8] Dorn, L. Schweißen und Löten mit Festkörperlasern. Berlin : Springer, 1992